

УДК 539.1.074.823

МНОГОПРОВОЛОЧНЫЙ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ С ДВУМЯ СЛОЯМИ БОРА-10

© 2024 г. С. И. Поташев^{a, b, *}, А. А. Афонин^a, Ю. М. Бурмистров^a, А. И. Драчев^a,
А. А. Каспаров^a, С. Х. Караевский^a, И. В. Мешков^b, В. Н. Пономарев^a, В. И. Разин^a

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bФизический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

*e-mail: potashev@inr.ru

Поступила в редакцию 11.11.2023 г.

После доработки 28.01.2024 г.

Принята к публикации 28.01.2024 г.

Разработан многопроволочный позиционно-чувствительный детектор нейтронов с двумя слоями из бора-10, предназначенный для регистрации как тепловых, так и быстрых нейтронов. Чувствительные размеры детектора для измерения двух координат нейтрона составляют 50×50 мм. Его характеристики приведены в сравнении с параметрами детектора 100×100 мм, построенного и используемого нами ранее в измерениях пространственного распределения нейтронного потока. Плоскопараллельная конструкция нового детектора имеет симметричную структуру относительно проволочного анода и включает в себя также две промежуточные сетки и два катода из параллельных проволок с шагом 2 мм и две кремниевые подложки с нанесенными на них слоями из бора-10 толщиной по 0.003 мм. Геометрия детектора, состав и давление рабочего газа подобраны так, чтобы обеспечить поглощение вторичной альфа-частицы из реакции с тепловым нейтроном в половине толщины газовой среды детектора. Координаты нейтрона определены из измеренных величин амплитуд ионизационных потерь вторичных ядер. Ожидаемая эффективность детектора к тепловым нейтронам составляет около 5%. Детектор можно применять в установках малоуглового и дифракционного рассеяния в физике конденсированного состояния.

Ключевые слова: тепловые нейтроны, изотоп бор-10, позиционно-чувствительный детектор, малоугловое рассеяние, конденсированное состояние вещества.

DOI: 10.31857/S1028096024080058, EDN: ELRONX

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования параметров решетки кристаллов и других периодических структур используют нейтронные дифрактометры [1, 2]. Для исследования упорядоченной решетки магнитных квазичастиц (скирмионов) и спиновых волн в нецентросимметричных магнетиках и структуры поликристаллических веществ и порошков в физике конденсированного состояния применяются установки малоуглового рассеяния [3]. Ключевым элементом этих установок и дифрактометров является позиционно-чувствительный детектор тепловых нейтронов [4]. К настоящему времени наиболее востребованным для этой цели инструментом является детектор на основе пропорциональной камеры с наполнением газовой смесью,

в составе которой содержатся ядра изотопа ^3He [5–7] с большим сечением захвата тепловых нейтронов $5730 \cdot 10^{-24}$ см². Он характеризуется высокой эффективностью до 70% в диапазоне длин волн от 1.8 до 4 Å и позиционным разрешением до 2 мм, которые хорошо подходят для исследования структуры кристаллитов, вихревой структуры в сверхпроводниках [8] и изучения биологических молекул [9]. Однако рабочий газ гелий-3 является дорогим веществом, производимым только в России и США в ограниченных количествах. Кроме того, высокая диффузионная способность гелия-3, находящегося под давлением, может привести к утечке, это требует использовать толстые стенки и окна в детекторах, а положение плоскости, в которой происходит взаимодействие

нейтрона с ^3He , имеет неопределенность по глубине газового слоя в несколько сантиметров. Это, в свою очередь, приводит к неопределенности по времени пролета на короткой пролетной базе. Кроме того, появляется высокая чувствительность к фону рассеянных нейтронов, то есть теряется свойство избирательности к направлению потока нейтронов.

В последние годы высокий интерес возник к гибридным детекторам, совмещающим слой распространенного и дешевого твердого бора-10 и пропорциональную камеру [10–13]. Преимущество использования в качестве конвертера нейтронов бора-10 состоит в том, он имеет достаточно большое сечение захвата нейтронов с энергией более 1 МэВ, которым не обладают гелий-3 и литий-6. Поэтому такой детектор имеет чувствительность к нейтронам с энергией от тепловых до несколько МэВ, то есть является всеволновым. Лучший результат по эффективности регистрации тепловых нейтронов с длиной волны $\lambda = 4.9 \text{ \AA}$ составляет 54%, который был получен при использовании 10 слоев ^{10}B [12]. Размеры чувствительной области составляли $200 \times 200 \text{ мм}$, позиционное разрешение 3 мм. Большинство из этих детекторов [10–12] используют в качестве электродов сетки электронного умножения (GEM-сетки), они представляют собой каптоновые (полиимидные) пленки с отверстиями диаметром $\sim 20\text{--}150 \text{ мкм}$. Это означает, что образовавшиеся вторичные ядра преимущественно не могут преодолеть данный электрод и дают сигнал только в одном газовом зазоре.

Мы предложили использовать сетки из проволок диаметром $\sim 20 \text{ мкм}$ и, тем самым, расширить функциональность детектора [13–15]. Появилась возможность измерять ионизационные потери вторичного ядра (в частности, ^4He) в двух и более зазорах и использовать корреляции сигналов от одного ядра для идентификации отдельных ядерных реакций, в том числе, под действием быстрых нейтронов [16]. Такой детектор продемонстрировал избирательность к направлению потока нейтронов и возможность измерения в условиях фона рассеянных нейтронов [17]. В отличие от ядра ^3He сечение ядерных реакций под действием нейтрона на ядре ^{10}B в диапазоне энергий от 1 до 7 МэВ находится на уровне $(0.1 \div 1) \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$, достаточное для детектирования в потоках нейтронов от $10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Развитием этого детектора является новый позиционно-чувствительный детектор, который может быть настроен для регистрации амплитуд как быстрых, так и тепловых нейтронов [18].

КОНСТРУКЦИЯ НОВОГО ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА РАЗМЕРОМ $50 \times 50 \text{ мм}$

Новый позиционно-чувствительный детектор [19] содержит два слоя конвертера из ^{10}B , нанесенного на кремниевые пластины каждая толщиной 0.38 и диаметром 70 мм. Слои ^{10}B внутри детектора расположены навстречу друг другу и служат катодами 1 и 2, как показано на рис. 1. Между катодами расположена рамка с проволочным анодом 3, по обеим сторонам которого размещены две пары рамок 4, 5, 6 и 7, с проволочными сетками для измерения координат. Параллельные проволочки сеток 4 и 6 для измерения координат X_1 и X_2 ориентированы ортогонально параллельным проволочкам сеток 5 и 7 для определения координат Y_1 и Y_2 . Между рамками с сетками и анодом установлены прокладочные шайбы 8, которые определяют расстояние между проволочными плоскостями. Расстояние между каждым катодом и анодом выбрано 9.5 мм, что вполне достаточно для поглощения ядер ^4He и ^7Li из реакции:

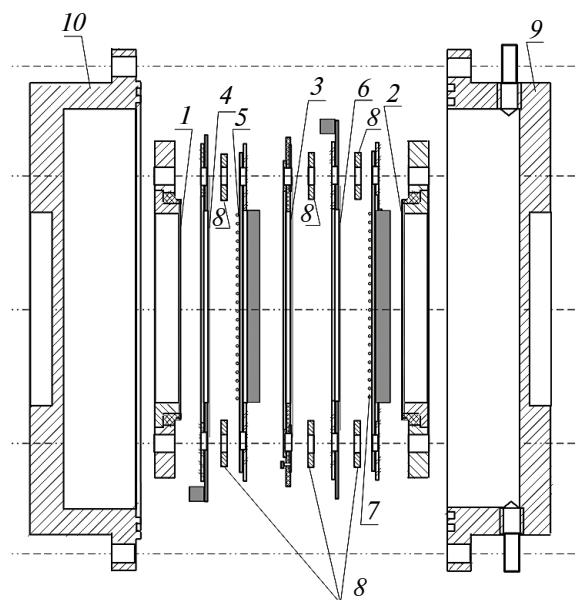


Рис. 1. Устройство позиционно-чувствительного детектора: 1 — первый слой конвертера из бора-10 на кремниевой подложке; 2 — второй слой конвертера из бора-10 на кремниевой подложке; 3 — рамка с анодными проволочками с базовым высоким напряжением питания; 4 — рамка с проволочками для измерения координаты X_1 ; 5 — рамка с проволочками для измерения координаты Y_1 ; 6 — рамка с проволочками для измерения координаты X_2 ; 7 — рамка с проволочками для измерения координаты Y_2 ; 8 — прокладочные шайбы; 9 — основание герметичного корпуса; 10 — крышка герметичного корпуса.

Диаметр золоченых вольфрам-рениевых проволок анода составляет 0.02 мм, а диаметр золоченых проволок из бериллиевой бронзы сеток составляет 0.05 мм. Шаг проволок равен 2 мм. Рамки, на которых натянуты проволоки, являются склеенными из стеклотекстолитовой рамки с рисунком металлизированных дорожек толщиной 1 мм и из Al_2O_3 -керамической подложки также толщиной 1 мм. Такая рамка отличается высокой плоскостностью и электрической прочностью до 20 кВ/мм. Для экономии электронных каналов каждые 3 проволоки электрически соединены на выходном разъеме для каждой координатной сетки X_1 , X_2 , Y_1 или Y_2 , и наведенные сигналы с них подаются на 8 электронных каналов платы усилителя УЛБ-8 [20]. При условии превышения порога в одном из каналов координаты X_1 и в одном из каналов координаты Y_1 , либо при превышении порога в одном из каналов координаты X_2 и в одном из каналов координаты Y_2 сигналы со всех 32 выходных каналов с четырех плат УЛБ-8 поступают на цифровой сигнальный процессор CAEN DT5550, данные с которого в виде осциллограмм записываются на диск компьютера. Координата определяется как центр тяжести распределения амплитуд восьми наведенных зарядов. Таким образом, новый детектор имеет два активных слоя и вдвое большую эффективность по сравнению с предыдущим однослойным детектором размером 100×100 мм.

ИЗМЕРЕНИЯ

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ДЕТЕКТОРОМ РАЗМЕРОМ 100×100 ММ

Особенности работы нового позиционно-чувствительного детектора нейтронов размером 50×50 мм можно проанализировать исходя из данных, полученных с помощью детектора размером 100×100 мм с наполнением газовой смесью $\text{Ag} + 25\%\text{CO}_2$. Данный детектор 100×100 мм был размещен на выходном коллимированном канале нейтронного источника на базе линейного ускорителя электронов с энергией от 5 до 8 МэВ [21]. Информацию о каждой координате определяли из величин амплитуд, поступающих с двух концов цепочки резисторов, выводы отдельных резисторов которой присоединены к отдельным проволокам. Для определения позиционного разрешения тепловых нейтронов выполняли измерения потока нейтронов из канала с маской из кадмия, в которой имелись три отверстия диаметром 2 мм, расположенные на одной линии и находящиеся на расстоянии 20 мм друг от друга, как это представлено на рис. 2. Кроме того, для сравнения

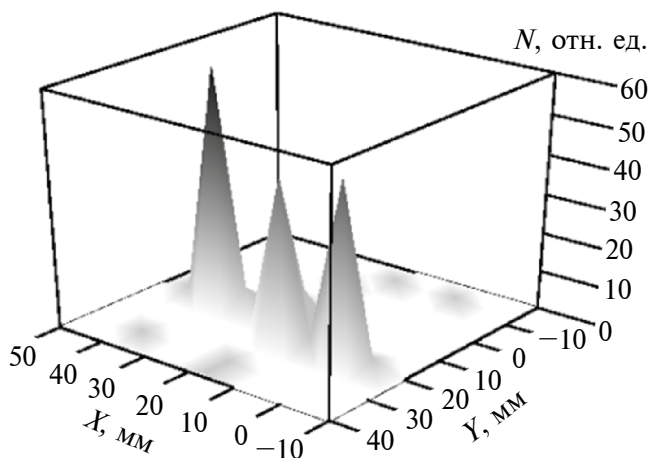


Рис. 2. Измеренное детектором размером 100×100 мм распределение потока нейтронов N на расстоянии 3 м от бериллиевой мишени из канала с маской из кадмия с тремя отверстиями диаметром 2 мм, расположенными на одной линии и находящимися на расстоянии 20 мм друг от друга.

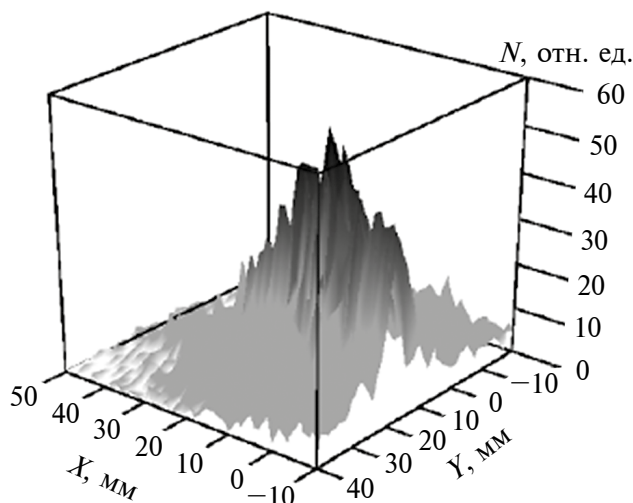


Рис. 3. Измеренное детектором 100×100 мм распределение потока нейтронов N на расстоянии 3 м от бериллиевой мишени из канала фотонейтронного источника.

на рис. 3 представлено распределение нейтронов без маски. Расстояние от центра нейтронообразующей (бериллиевой) мишени до детектора составляло около ~ 3 м. Пространственное разрешение как полная ширина пика на половине высоты максимума составило ~ 2 мм вдоль оси X и ~ 4 мм вдоль оси Y . Эти величины согласуются с результатами моделирования и соответствуют расстоянию от поверхности со слоем ^{10}B до плоскости проволочного анода 2 мм и расстоянию до плоскости полоскового катода 4 мм соответственно [22]. Эффективность детектора к тепловым нейтронам составила в экспериментах

от 3 до 1.5% в зависимости от максимальной энергии нейтронов источника от 3.5 до 6 МэВ. Она была получена на фотонейтронном источнике с использованием стандартного ^3He -счетчика с известными характеристиками для нормирования потока нейтронов. Следует заметить, что этот счетчик является чувствительным не только к нейтронам потока из канала, но и к рассеянными нейтронам в экспериментальном зале. В измерениях с ^3He -счетчиком учитывали только нейтроны с энергией от 0.02 до кадмиевой границы 0.55 эВ, определяемой по времени пролета. Для ^{10}B -детектора учитывали также нейтроны с энергией ниже 0.55 эВ. Кроме того, из источника на детекторы падал спектр нейтронов, а не нейтроны с выделенной энергией. Тем не менее наблюдали плавное падение эффективности ^{10}B -детектора с ростом максимально возможной энергии нейтронов из источника, как это показано на рис. 4.

ОЖИДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОВОГО ДЕТЕКТОРА

Новый позиционно-чувствительный детектор разрабатывали, прежде всего, как детектор быстрых нейтронов с измерением энергии нейтрона по величинам ионизационных потерь и углам вылета вторичных ядер ^4He и ^7Li . Для этого должна быть использована информация о распределении зарядовых сигналов со всех четырех проволочных сеток. Однако для тепловых нейтронов детектор можно рассматривать как два независимых последовательных детектора, и в этом случае его эффективность удваивается, а энергию нейтронов можно определить по времени пролета. Как и в детекторе размером 100×100 мм, мы предполагаем использовать газовую смесь $\text{Ar} + 25\%\text{CO}_2$. Используя разработанную нами программу моделирования для расчета ионизационных потерь в последовательных параллельных плоскостных слоях газа и тонких слоях твердых веществ и приняв упрощенно, что середина трека ионизации вторичного ядра является приближенно координатой нейтрона, мы получили координатное распределение по X , как показано на рис. 5а, и по Y , как представлено на рис. 5б. В результате аппроксимации этих кривых с помощью распределения Гаусса, а кривой на рис. 5б также и распределения Больцмана, была получена величина полной ширины пика на половине высоты максимума, равная 2 мм для координаты X и 4 мм для координаты Y , которые мы принимаем как позиционное разрешение. Расчетная оценка эффективности такого двухслойного детектора дает для тепловых нейтронов ~5%.

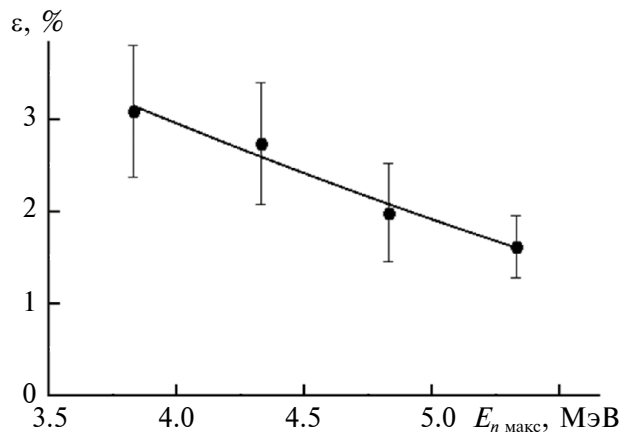
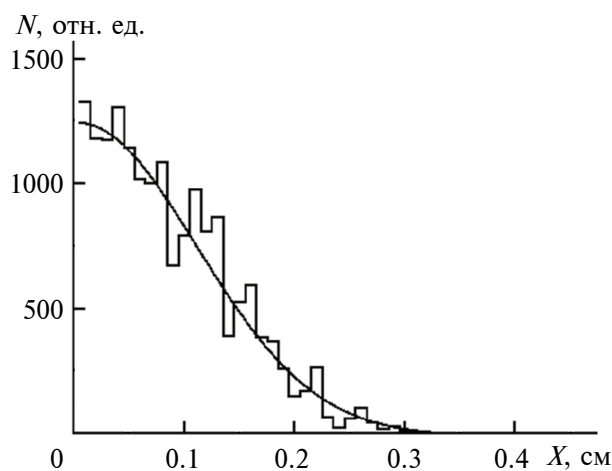


Рис. 4. Зависимость эффективности ^{10}B -детектора от максимальной энергии нейтронов источника.

(а)



(б)

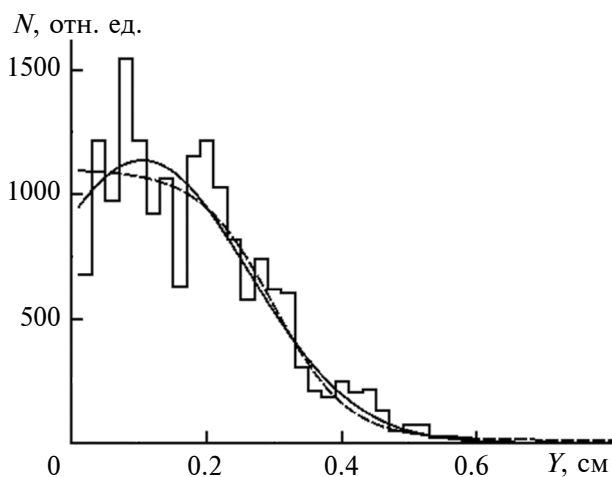


Рис. 5. Ожидаемое расчетное координатное распределение нейтронов N для детектора размером 50×50 мм по осям X (а) и Y (б). Сплошные кривые — аппроксимация с помощью распределения Гаусса, штриховая кривая — аппроксимация с помощью распределения Больцмана.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан двухслойный позиционно-чувствительный детектор нейтронов размером 50×50 мм на основе двух слоев ^{10}B с эффективностью к тепловым нейтронам до 5%. На основе сравнения с результатами экспериментов с детектором размером 100×100 мм и расчетов даны оценки позиционного разрешения 2 мм по координате X и 4 мм по координате Y .

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов В.Л., Балагуров А.М. // УФН. 1996. Т. 166. № 9. С. 955.
<https://www.doi.org/10.3367/UfNr.0166.199609e.0955>
2. Кузнецов С.П., Мешков И.В., Садыков Р.А., Литвин В.С., Лапушкин Ю.А., Алексеев А.А., Коптелов Э.А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2013. Т. 40. № 9. С. 3.
<https://www.doi.org/10.3103/S1068335613090017>
3. Grigoriev S.V., Potapova N.M., Moskvina E.V., Dyadkin V.A., Dewhurst Ch., Maleyev S.V. // JETP Lett. 2014. V. 100. № 3. P. 238.
<https://www.doi.org/10.7868/S0370274X14150132>
4. Jiang X.-F., Zhou J.-R., Luo H., Xiao L., Zhou X.-J., Xu H., Xia Y.-G., Wu X.-G., Zhu L., Yang W.-Q., Yang G.-A., Guan B.-J., Zhang H.-Y., Zhao Y.-B., Sun Z.-J., Chen Y.-B. // Nucl. Sci. Tech. 2022. V. 33. № 7. P. 89.
<https://www.doi.org/10.1007/s41365-022-01067-1>
5. Андреев В.А., Ганжа Г.А., Иванов Е.А., Ильин Д.С., Коваленко С.Н., Колхидашвили М.Р., Кривиш А.Г., Надточий А.В., Рунов В.В., Соловей В.А., Шабанов Г.Д. // ФТТ. 2010. Т. 52. № 5. С. 964.
6. Белушкин А.В., Богдзель А.А., Журавлев В.В., Кутузов С.А., Левчановский Ф.В., Литвиненко Е.И., Че Л.Е., Пантелеев Ц.Ц., Приходько В.И., Черников А.Н., Чураков А.В., Швецов В.Н. // ФТТ. 2010. Т. 52. № 5. С. 961.
7. Kampmann R., Marmotti M., Haese-Seiller M., Kudryashov V. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2004. V. 529. P. 342.
8. Jin W., Muhlbauer S., Bender P., Liu Y., Demirdis S., Fu Z., Xiao Y., Nandi Sh., Cao G.-H., Su Y., Bruckel T. // Phys. Rev. B. 2022. V. 105. № 18. P. L180504.
<https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.105.L180504>
9. Aksenov V.L., Balagurov A.M., Kozlenko D.P. // Phys. Part. Nuclei. 2016. V. 47. № 4. P. 627.
<https://www.doi.org/10.1134/S106377961604002X>
10. Uno S., Uchida T., Sekimoto M., Murakami T., Miyama K., Shoji M., Nakano E., Koike T., Morita K., Satoh H., Kamiyama T., Kiyonagi Y. // Phys. Procedia. 2012. V. 26. P. 142.
<https://www.doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.019>
11. Kohli M., Allmendinger F., Haubler W., Schroder T., Klein M., Meven M., Schmidt U. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. V. 828. P. 242.
<https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.014>
12. Zhou J., Xiu Q., Zhou X., Zhou J., Ma L., Schmidt C.J., Klein M., Xia Yu., Zhu G., Huang Ch., Sun G., Hu B., Sun Zh., Chen Yu. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2020. V. 953. P. 163051.
<https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2019.163051>
13. Potashev S.I., Drachev A.I., Burmistrov Yu.M., Karaevsky S.Kh., Kasparov A.A., Ponomarev V.N., Solodukhov G.V. // EPJ Web Conf. 2020. V. 231. P. 05010.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/202023105010>
14. Поташев С.И., Бурмистров Ю.М., Конобеевский Е.С., Мешков И.В., Зуев С.В., Марин В.Н. // Поверхность. Рентген., синхротрон. нейтрон. исслед. 2021. Т. 10. С. 108.
<https://www.doi.org/10.31857/S1028096021100162>
15. Поташев С.И., Афонин А.А., Бурмистров Ю.М., Драчев А.И., Зуев С.В., Караевский С.Х., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С., Мешков И.В., Пономарев В.Н., Разин В.И., Солодухов Г.В. // Известия РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 4. С. 532.
<https://www.doi.org/10.31857/S0367676520040225>
16. Поташев С.И., Каспаров А.А., Пономарев В.Н. // Известия РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 9. С. 1304.
<https://www.doi.org/10.31857/S0367676522090241>
17. Мешков И.В., Поташев С.И., Афонин А.А., Бурмистров Ю.М., Драчев А.И., Зуев С.В., Караевский С.Х., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С., Кузнецов С.П., Марин В.Н., Пономарев В.Н., Солодухов Г.В. // Известия РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 4. С. 497.
<https://www.doi.org/10.31857/S0367676520040195>
18. Каспаров А.А., Поташев С.И., Афонин А.А., Бурмистров Ю.М., Драчев А.И. // Известия РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 5. С. 694.
<https://www.doi.org/10.31857/S0367676521050124>
19. Патент 2788834 (РФ). Позиционно-чувствительный детектор медленных и быстрых нейтронов. / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН). Поташев С.И., Драчев А.И., Каспаров А.А., Бурмистров Ю.М. // 2023.
20. Гюльханданьян О.М., Джилкибаев Р.М., Радченко О.М., Штрахих И.В. Электроника пропорциональных камер с аналоговым съемом информации. Препринт П-0237. Москва: ИЯИ РАН, 1982.
21. Патент № 2634330 (РФ). Фотонейтронный источник. / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН). Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Латышева Л.Н., Мордовской М.В., Пономарев В.Н., Солодухов Г.В., Соболевский Н.М. // 2017.
22. Karaevsky S.Kh., Potashev S.I., Drachev A.I., Burmistrov Yu.M. // Phys. Atom. Nuclei. 2019. V. 82. № 12. P. 1686.
<https://www.doi.org/10.1134/S1063778819120147>

Multiwire Position-Sensitive Neutron Detector with Two Layers of Boron-10

**S. I. Potashev^{1, 2, *}, A. A. Afonin¹, Yu. M. Burmistrov¹, A. I. Drachev¹, A. A. Kasparov¹,
S. Kh. Karaevsky¹, I. V. Meshkov², V. N. Ponomarev¹, V. I. Razin¹**

¹Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow, 117312 Russia

²P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991 Russia

**e-mail: potashev@inr.ru*

Multiwire position-sensitive neutron detector with two layers of boron-10 was developed to detect both thermal and fast neutrons. Sensitive dimensions of two coordinate neutron detector are 50×50 mm. New detector characteristics are compared with ones of 100×100 mm detector built earlier which we used in neutron flux spatial distribution measurement. Plane-parallel design of new detector has symmetrical structure with respect to wire anode and also includes two intermediate grids and two cathodes made of parallel wires with 2 mm pitch and two silicon substrates coated boron-10 layers of 0.003 mm thickness. Detector geometry, working gas mixture and pressure are chosen so as to ensure full absorption of secondary alpha particle from reaction with thermal neutron within detector gas medium half thickness. Neutron coordinates are determined from measured ionization loss pulse heights produced by secondary nucleus. Detector expected efficiency to thermal neutrons is about 5%. The detector can be used in small-angle and diffraction scattering setups in condensed matter physics.

Keywords: thermal neutrons, boron-10 isotope, position-sensitive detector, small-angle scattering, condensed matter state.