

## ДЕТЕКТОРЫ ТЕПЛОВЫХ И ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

М.О. Петрова<sup>1,2</sup>, аспирант

В.И. Боднарчук<sup>1,2,3</sup>, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований

<sup>2</sup>Государственный университет «Дубна»

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

<sup>1,2</sup>(Россия, г. Дубна)

<sup>3</sup>(Россия, Москва)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-10-2-188-196

*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).*

**Аннотация.** Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований является одним из ведущих центров нейтронных исследований в России. В рамках работ по модернизации детекторных систем проведен обзор основных типов детекторов тепловых и холодных нейтронов, применяемых на спектрометрах реактора ИБР-2. Раскрываются особенности работы и недостатки современных детекторных систем, на основании чего была представлена перспективная альтернатива, лишенная недостатков существующих систем.

**Ключевые слова:** типы детекторов, тепловые и холодные нейтроны, спектрометры реактора ИБР-2.

Значительное увеличение задач, связанных с определением структурных параметров в кристаллических, биологических и наноразмерных объектах в последние десятилетия требуют развития методов исследования структуры вещества на атомном и надатомном масштабе. Среди множества таких методов наибольшую применимость обрели исследования структуры посредством рассеяния на нём пучка тепловых и холодных нейтронов. Нерегулярная зависимость амплитуд рассеяния нейтронов на ядрах позволяет эффективно определять параметры структуры, зависящие от расположения ядер атомов, а наличие магнитного момента у нейтрона позволяет изучать магнитную структуру образца. Помимо этого, нейтрон обладает высокой проникающей способностью, что позволяет изучать объемные образцы, а исследования с помощью рассеяния нейтронов характеризуются как неразрушающие. Вышеперечисленные причины привели к развитию нейтронных исследовательских установок, ключевой частью которых является детекторная систе-

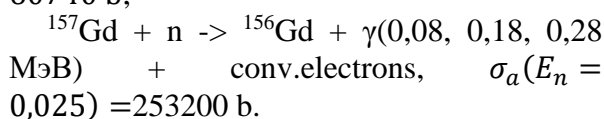
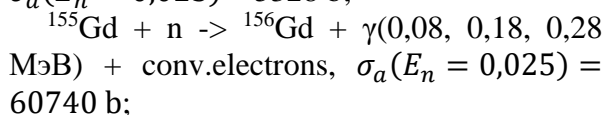
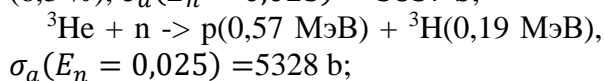
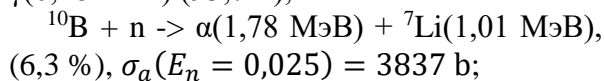
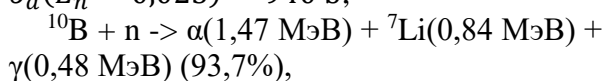
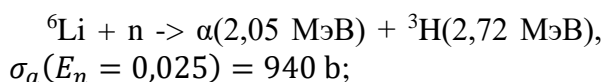
ма, регистрирующая распределение рассеянного на изучаемом образце потоке нейтронов во времени и в пространстве.

Особенности работы детекторов различных типов не позволяют выделить универсальный детектор, который был бы оптимален для задач и методик каждой отдельно взятой нейтронной установки. В статье будут рассмотрены основные типы современных детекторов тепловых нейтронов и их применимость на станциях нейтронного рассеяния.

#### **Конвертация нейтронов**

Как известно, нейтрон является косвенно-ионизирующим излучением. Это значит, что непосредственно нейтрон не будет рождать электронно-ионные пары в рабочем объеме детектора. По этой причине для регистрации нейтронов применяются материалы-конвертеры. Нейтронным конвертером называют ядро, которое после захвата нейтрона испытывает деление ( $n_{\text{capture}}$ , fission) или испускание частиц ( $n_{\text{capture}}$ , X). Именно дочерние ядра – продукты деления ядра-конвертера вызывают первичную ионизацию и возбуждение ядер

рабочего вещества детектора. Зависимость сечения поглощения нейтрона ядром зависит от энергии нейтрона, поэтому для конвертации выбираются ядра, обладающие наибольшим сечением поглощения для определенного энергетического диапазона нейтронов. Помимо сечения, важными факторами в выборе материала конвертора является высокая концентрация требуемых ядер и коммерческая доступность. Наиболее распространёнными реакциями, используемыми в детекторах тепловых нейтронов, являются:



Несмотря на то, что изотопы гадолиния обладают наибольшим сечением захвата теплового нейтрона, распад составного ядра сопровождается электронами конверсии и гамма-квантами, которые также будут ионизировать рабочий газ, вызывая ложные срабатывания и снижая отношение сигнал-шум (С/Ш). Следующим претендентом на роль конвертора тепловых нейтронов выступает газ He-3. На большинстве нейтронных установок использу-

ется именно детекторы на основе He-3 под давлением до 20 атм.

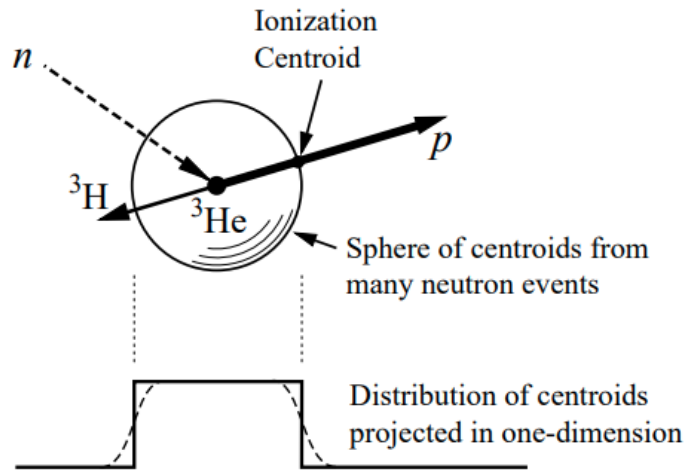
Далее по величине сечения абсорбции теплового нейтрона идет изотоп  ${}^{10}\text{B}$ . В недавнем прошлом в качестве рабочего вещества детектора использовался газ  $\text{BF}_3$ , который по ряду своих параметров уступал газовым детекторам на основе He-3. Современные возможности магнетронного напыления позволяют изготавливать тонкопленочные системы на основе изотопа В-10, использование которых в детекторах позволяет достигать эффективности регистрации, сопоставимой с гелиевыми детекторами.

Особое место занимают детекторы тепловых нейтронов на основе  ${}^6\text{Li}$ . Детекторы на основе лития, преимущественно, являются сцинтилляционными (литиевые стекла, ND-экраны), главное преимущество которых это возможность реализации детектирующей поверхности произвольной формы.

В статье приведен обзор используемых в настоящее время детекторов тепловых и холодных нейтронов. Отдельно обсуждается устройство и принцип действия детектора тепловых и холодных нейтронов на основе плоскопараллельной резистивной камеры, разрабатываемой автором.

### Детекторы на основе ${}^3\text{He}$

Гелиевые детекторы тепловых и холодных нейтронов, как правило, наполняются газовой смесью  ${}^3\text{He} + \text{CF}_4$  или  ${}^3\text{He} +$  инертный газ [1,2]. Это делается для уменьшения длины свободного пробега продуктов конвертации. На рис.1 представлен процесс конвертации нейтрона ядром гелия. противоположных

Рис. 1. Конвертация нейтрона ядром  ${}^3\text{He}$  [3]

Было показано, что средний радиус сферы центроиды связан пробегом протона как  $R_c = 0,4R_p$ , где  $R_c$  – радиус центроиды,  $R_p$  – пробег протона, а пространственное разрешение ПШПВ =  $0,8R_p$  [4]. Таким образом, для улучшения пространственно-

го разрешения необходимо уменьшать пробег протона в рабочем газе.

Ионизационные потери для тяжелых заряженных частиц при энергиях  $E_{\text{кинетическая}} \ll E_{\text{покоя}}$ , которые в основном определяют пробег заряженной частицы в веществе, выражаются формулой:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ionization}} = -\frac{4\pi z^2}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I}\right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (1)$$

Учитывая, что плотность электронов вещества  $n_e = Zn_A$ , где  $n_A$  – плотность ядер вещества,  $Z$  – заряд ядер в единицах заряда электрона, можно выразить  $n_e$  через параметры среды:  $n_e = Zn_A = Z\rho N_A/A$  ( $N_A$  – число Авогадро,  $A$  – массовое число ядер

вещества среды,  $\rho$  – плотность вещества среды в  $\text{г/см}^3$ ). Тогда формула удельных ионизационных потерь тяжелых частиц преобразуется к виду, более удобному для вычислений:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ionization}} = 3,1 \cdot 10^5 \cdot \frac{Zz^2 \rho}{A\beta^2} \left( 11,2 + \ln \frac{\beta^2}{Z(1-\beta^2)} \right) \frac{\text{эВ}}{\text{см}} \quad (2)$$

Исходя из формулы (2) можно заключить, что для повышения разрешающей способности детекторов на основе гелия-3 необходимо либо увеличивать плотность газовой смеси, либо увеличивать эффективный зарядовый номер. Увеличение плотности газа достигается путем заполнением детекторов газовой смесью с давлением вплоть до 30 атм, однако такое высокое давление обуславливает наличие толстых стенок или толстого входного окна у детектора ( $>1$  мм) из сплавов типа АМГ-6 или подобных ему. Толстые стенки детектора сильно отражают и рассеивают поток холодных нейтронов, что приводит

к искажению измеряемого распределения рассеянного пучка нейтронов, что в свою очередь затрудняет определение структурных параметров изучаемых объектов. Второй путь повышения локализации места конвертации нейтрона – увеличение эффективного зарядового числа газовой смеси. Для этого, как правило, используются инертные газы – Ar, Kr, Xe, которые позволяют увеличить  $Z$  с минимальным влиянием на работу детектора – они практически не вступают в химические реакции с конструкционными материалами детекторов.

Гелиевые детекторы нейтронов можно разделить на счетчики и позиционно-чувствительные детекторы одно- или двухкоординатные. Примером однокоор-

динатного детектора может служить цилиндр-катод с резистивной нитью-анодом в центре, наполненный газом под давлением 10-20 атм (рис. 2).

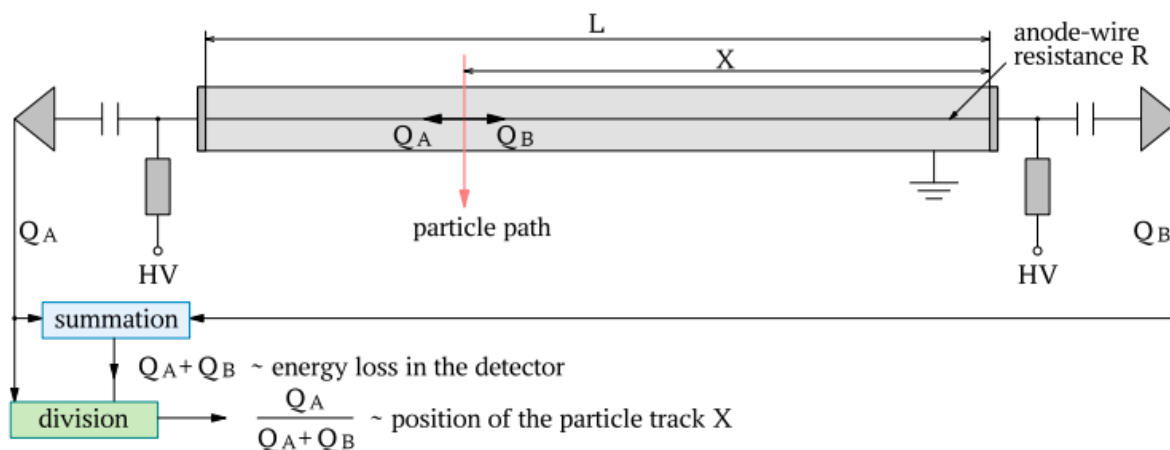


Рис. 2. Схематичное изображение гелиевого счетчика с резистивной нитью

В случае одномерного счетчика с резистивной нитью локализация места захвата нейтрона производится по различию амплитуд сигналов на концах анодной нити детектора. Условно это можно представить так, что сигнал от ионизации снимается с резисторов с различным сопротивлением, которое определяется от места захвата до соответствующего конца анодной нити. Сопротивление участка нити определяет амплитуду снимаемого сигнала. Работают такие детекторы, как правило, в пропорциональном режиме.

Многопроволочные пропорциональные камеры (МПК) могут быть как однокоор-

динатными, так и двухкоординатными. Схема двухкоординатной многопроволочной камеры представлена на рисунке 3.

В данному случае позиция конвертации определяется методом центра тяжести амплитуд соседних проволочек. В силу плоской геометрии корпуса детектора многопроволочные камеры работают при избыточном давлении газовой смеси менее 12 атм. Однако даже такое относительно невысокое давление обеспечивает эффективность конвертации тепловых ( $1,8 \text{ \AA}$ ) нейтронов на уровне 60%.

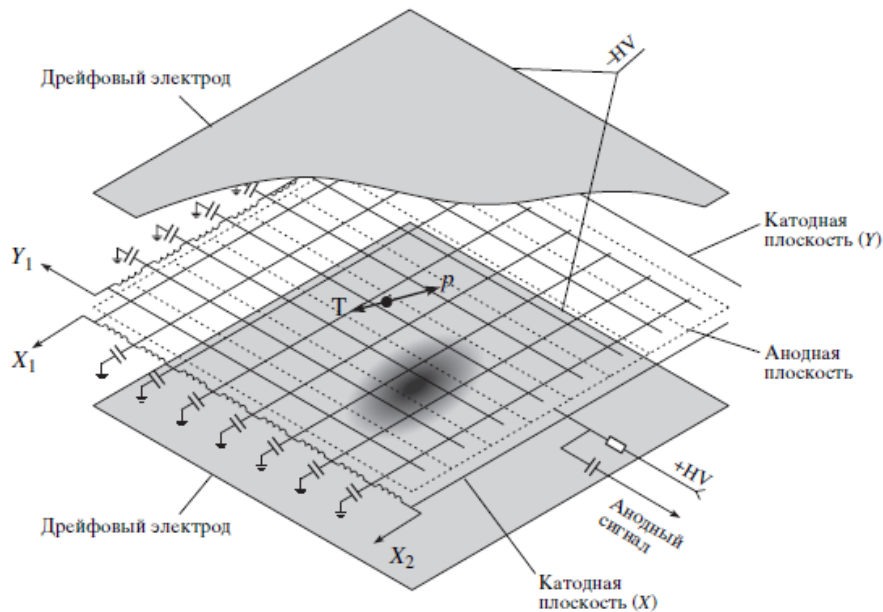


Рис. 3. Схематическое изображение многопроволочной пропорциональной камеры [1]

К общим недостаткам гелиевых детекторов можно отнести:

- радиально спадающее поле, которое обеспечивает газовое усиление только вблизи анодной проволоки, из-за чего длительность сигнала составляет  $\sim 1$  мкс, что ограничивает загрузочную способность и временное разрешение в ряде экспериментов;

- толстые стенки или входное окно, что ограничивает прохождение холодных нейтронов;

- выгорание анодных проволок со временем и их полная деструкция. Перетяжка анодных проволок требует не только откачки газа, но и фиксации новых проволок с тем же натяжением, что является весьма трудоемкой задачей.

Однако несмотря на все особенности работы детекторов на основе гелия-3 такие системы остаются наиболее популярными на станциях нейтронного рассеяния.

#### Детекторы на основе ${}^6\text{Li}$

Детекторы тепловых и холодных нейтронов на основе лития являются, в основном, сцинтилляционными. Существует два основных типа сцинтилляционных детекторов на основе лития – это литиевые стекла и ND-экраны. Стоит отметить, что в последнее время появились работы посвященные кристаллам  $\text{LiInSe}$ , которые

одновременно обладают сцинтилляционными и полупроводниковыми свойствами.

Литиевые стекла были очень популярны в конце 90-х начале 0-ых годов для регистрации тепловых нейтронов в силу относительно невысокой стоимости и прозрачности к собственному излучению, что позволяло увеличивать толщину для повышения эффективности регистрации. Из недостатков стекол, подтолкнувших к дальнейшему развитию литиевых конвертеров, можно отнести малый выход фотонов на нейтрон ( $\sim 6000$ ), высокая гамма-чувствительность и радиационное изменение оптической плотности [5]. Основным преимуществом литиевых стекол можно назвать малое время высвечивания (75 нс), что обеспечивает высокую скорость счета и загрузочную способность на уровне  $> 1$  МГц. В зависимости от потребностей экспериментаторов для съема света применяются ФЭУ, SiPM или ФЭУ вместе со спектрометрическими оптическими волокнами (COB).

ND-экран (neutron detection) – это спрессованная пластина из порошка  $\text{LiF}$  и  $\text{ZnS(Ag)}$  [6]. В силу того, что такие пластины, особенно небольшой площади, являются пластичными, эта особенность позволяет изготавливать детекторы со сложной поверхностью регистрации [8] (см. рис. 4).

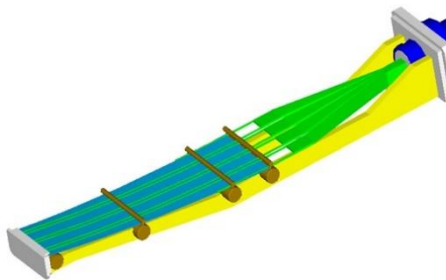


Рис. 4. Внутренней устройство модуля детектора АСТРА [8]

Основными недостатками этого детектора являются «рваная» форма сигнала (см. рис. 5), непрозрачность к собственному излучению и длительностью высвечивания на уровень в 10% ~ 8 мкс [8]. Ос-

новным преимуществом, по сравнению с литиевыми стеклами, является сниженная на два порядка чувствительность к гамма-квантам.

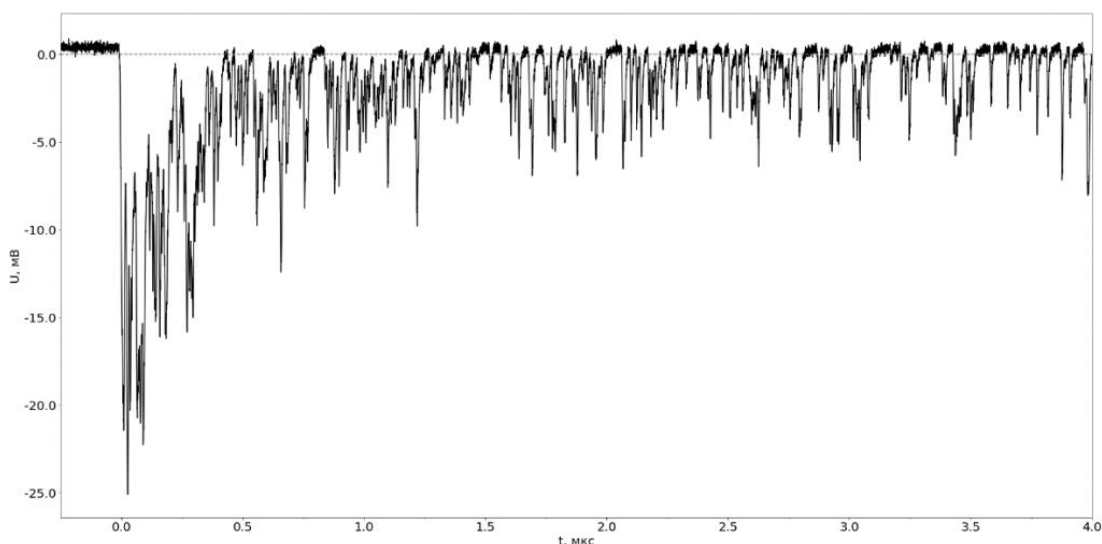


Рис. 5. Сигнал от попадания нейтрона, полученный со сцинтилляционного детектора (ND-экран +ФЭУ)

Аналогично литиевым стеклам, свет ND-экранов может быть зарегистрирован напрямую ФЭУ/SiPM или системой СОВ+ФЭУ/SiPM.

Как и в случае с радиационным изменением прозрачности литиевых стекол, оптический клей, применяемый в изготовлении детекторов на основе системы ND-экрана и СОВ, подвержен радиационному старению. Под действием потока ионизирующих излучений оптический клей со временем желтеет, увеличивая оптическую плотность и снижая эффективность работы всей детекторной системы.

#### Детекторы на основе $^{10}\text{B}$

Несмотря на большое количество созданных прототипов на основе  $\text{BF}_3$  [9-11] борные детекторы не нашли широкого применения, так как значительно уступают в эффективности гелиевым при одинаковом избыточном давлении. К тому же трифторид бора является высокотоксичным газом и коррозионно-активным, что приводит к быстрой деградации рабочей газовой смеси.

Развитие методов электровакуумного осаждения тонких пленок дали детекторам тепловых и холодных нейтронов на основе бора второй шанс на активное использование. Уже сейчас МПК и плоскопараллельные резистивные камеры (ППРК), а также

детекторы типа Multi-blade и Multi-grid с пленками карбида бора, обогащенные по изотопу  $^{10}\text{B}$ , начинают набирать популярность в современных центрах нейтронных исследований [12-17].

Появившиеся в 1980-ых годах [18], плоскопараллельные резистивные камеры нашли широкое применение в физике вы-

соких энергий [19-23] благодаря временным характеристиками и относительной дешевизне при высокой эффективности и возможности покрытия больших телесных углов.

Классическая архитектура однозорной ППРК представлена на рисунке 6.

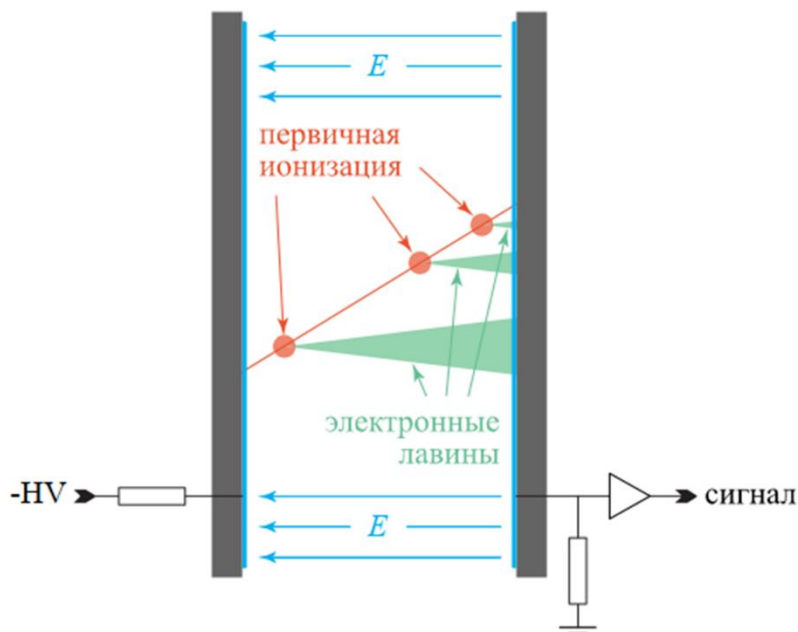


Рис. 6. Архитектура классической ППРК

Различие между классической (используемой в физике высоких энергий) и нейтронной ППРК заключается только в наличии пленки-конвертера  $\text{B}_4\text{C}$ , обогащенной по изотопу  $^{10}\text{B} > 95\%$  и расположенной газовом промежутке.

Работают такие детекторы в проточном режиме (рабочая газовая смесь постоянно обновляется). Эта особенность исключает потребность в толстом входном окне, что открывает возможность работы с холодными нейтронами ( $> 10 \text{ \AA}$ ).

Плоскопараллельная резистивная камера может включать в себя один или несколько газовых промежутков, образованных электродами с допуском по плоскости менее 1 мкм. Такие требования предъявляются к электродам ввиду того, что газовые зазоры в детекторах такого типа, как правило, колеблются в диапазоне 200-400 мкм. Отклонение от плоскости на поверхности электрода может привести к изменению направления и амплитуды вектора

напряженности электрического поля, что приведет к изменению режима газового усиления. Помимо этого, для создания многозорного детектора необходимо, чтобы применяемые электроды были бы «прозрачны» для индукции сигнала на считывающие электроды. Соответствующий вышеуказанным требованиям и коммерчески доступный материал это термополированное стекло. Идеально ровная поверхность термополированного стекла обусловлена технологией его производства – разогретая кварцево-известковая смесь выливается на поверхность жидкого легкоплавкого металла (как правило – олова), а диэлектрическая проницаемость  $\epsilon=5$  обеспечивает наведение сигнала достаточной амплитуды на стрипы, выступающих в роли считывающих электродов. Система нескольких газовых промежутков и электродов их образующих составляют стек, крайние электроды которого выступают в роли анода и катода. Для формирования

электрического поля в газовом промежутке на внешние в стеке электроды, на поверхность, не находящуюся в газовом промежутке, наносится полупроводящая эмаль с поверхностным сопротивлением 5–20 Ом/□. Высокое напряжение подается на эмаль из-за чего в газовом промежутке формируется однородное электрическое поле. Движение лавины, рожденной первичной ионизацией, индуцирует сигнал на считывающие электроды – стрипы. Стрипы, изготовленные как правило из меди, располагаются на печатной плате из стеклотекстолита.

Многозорная архитектура ППРК включает в себя помимо внешних электродов, покрытых эмалью, внутренние «плавающие» электроды. Внутренние электроды не соединены с питающей це-

пью и не заземлены. Эффекта накопления заряда не происходит ввиду компенсации лавин разного знака из соседних зазоров.

Существенным преимуществом плоскопараллельной геометрии является однородное электрическое поле. Это значит, что газовое усиление будет происходить сразу же после рождения первичной ионизации в отличие проволочных камер, где заряд еще какое-то время дрейфует до места, в котором напряженность поля достаточна для ускорения электрона и вторичной ионизации газа.

Основными недостатком такого типа детектора является относительно быстрое накопление заряда, а также постоянный поиск компромисса между эффективностью и площадью.

#### Библиографический список

1. Одномерный позиционно-чувствительный детектор тепловых нейтронов / А.В. Белушкин и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 6. – С. 23-29.
2. Neutron spectrometry with He-3 proportional counters / M. Manolopoulou et al. 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 366 012033.
3. High Precision Thermal Neutron Detectors / V. Radeka et al 1996 Neutrons in Biology. – P. 57-67.
4. Fischer J., Radeka V. and Boie R.A. (1983) High Position Resolution and Accuracy in He3 Two-dimensional Thermal Neutron Detectors. Workshop on The Position-Sensitive Detection of Thermal Neutrons, ILL, Grenoble, France 11-12 October 1982. Proceedings edited by P. Convert and J.B. Forsyth (Academic Press, London). – 129 p.
5. Neutron PSDs for the next generation of spallation neutron sources / Carel W.E. van Eijk / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 477 (2002) 383–390
6. Kreyssig A., Irmer K., Hartung U. ZnS/6Li scintillation material as an alternative to 6Li-glass scintillators for neutron detection in time focusing geometry // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 1994. 0. 349. №. 292-294.
7. Электронный ресурс: сайт производителя экранов SCINTACOR. – URL: <https://scintacor.com/products/neutron-detection-screens/>.
8. Белушкин и др. Опыт разработки и создания детекторов тепловых нейтронов в НЭОКС ИБР-2 // Приборы и техника эксперимента. – 2022. – № 4. – С. 5-17.
9. Rubina Nasir, Faiza Aziz, Sikander M. Mirza, Nasir M. Mirza/ Experimental and theoretical study of BF3 detector response for thermal neutrons in reflecting materials // Nuclear Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 50, Iss. 3. – P. 439-445.
10. Kouzes R.T., Ely J.H., Lintereur A.T., Siciliano E.R., Woodring M.L. BF3 Neutron Detector Tests // Pacific Northwest National Laboratory Richland, Washington 99352.
11. Construction and Development of a BF3 Neutron Detector at Brookhaven National Laboratory (BNL) / C. Czajkowski, C. Finfrock, P. Philipsberg, V. Ghosh// Submitted to the Journal of Nuclear Materials Management (March 2012) Brookhaven National Laboratory.
12. Margato L.M.S. et al. Boron-10 lined RPCs for sub-millimeter resolution thermal neutron detectors: Feasibility study in a thermal neutron beam // 2019 JINST 14 P01017 [arXiv:1809.09677].



13. Margato L.M.S., Morozov A. Boron-10 lined RPCs for sub-millimeter resolution thermal neutron detectors: conceptual design and performance considerations // 2018 JINST 13 P08007. [arXiv:1806.07167].
14. Margato L.M.S., Morozov A., Blanco A., et al. Towards high-rate RPC-based thermal neutron detectors using low-resistivity electrodes // 2021 JINST 16 P.07009. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/07/P07009>.
15. Stefanescu I. et al. 2017 JINST 12 P01019 / Neutron detectors for the ESS diffractometers / doi:10.1088/1748-0221/12/01/P01019.
16. Potashev S.I., Burmistrov Yu., Drachev A.I. et al. Two-dimensional solid state gaseous detector based on 10B layer for thermal and cold neutrons // December 2016, Journal of Physics Conference Series 798 (1), DOI: 10.1088/1742-6596/798/1/012160.
17. G. Mauri et al/ The Multi-Blade Boron-10-based neutron detector performance using a focusing reflectometer // 2020 JINST 15 P03010.
18. Santonico R., Cardarelli R. Development of Resistive Plate Counters, Nuclear Instruments and Methods A. – 1981. – № 187. – 377 p.
19. Lippmann C. Detector Physics of Resistive Plate Chambers, Dr. Dissertation, Frankfurt am Main, 2003.
20. Babkin V., Baskov V., Burdyko A. and oth. Beam test results of the MRPC prototype for the new NA61/SHINE ToF system // NIM A. – 2022. – Vol. 1034. – 166735. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166735>.
21. Polese G., Paolucci P., Gomez-Reino R. and oth. The detector control systems for the CMS resistive plate chamber // J.Phys.Conf.Ser. 219 (2010) 022019 DOI: 10.1088/1742-6596/219/2/022019.
22. Akindinov A., Anselmo F., Basile M. and oth. The multigap resistive plate chamber as a time-of-flight detector // NIM A. – 2000. – Vol. 456, Iss. 1-2. – P. 16-22. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)00954-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00954-2).
23. The ARGO-YBJ Collaboration: G. Aielli, et al ARGO-YBJ constraints on very high energy emission from GRBs // Astroparticle Physics. – 2009. – Vol. 32, Iss. 1. – P. 47-52. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2009.05.005>.

## THERMAL AND COLD NEUTRON DETECTORS

**M.O. Petrova**<sup>1,2</sup>, *Postgraduate Student*

**V.I. Bodnarchuk**<sup>1,2,3</sup>, *Candidate of Physical and Mathematical Sciences*

<sup>1</sup>**Joint Institute for Nuclear Research**

<sup>2</sup>**Dubna State University**

<sup>3</sup>**National Research Center "Kurchatov Institute"**

<sup>1,2</sup> **(Russia, Dubna)**

<sup>3</sup> **(Russia, Moscow)**

**Abstract.** *The I.M. Frank Neutron Physics Laboratory of the Joint Institute for Nuclear Research is one of the leading neutron research centers in Russia. As part of the work on the modernization of detector systems, a review of the main types of thermal and cold neutron detectors used on the spectrometers of the IBR-2 reactor was carried out. The features of the work and disadvantages of modern detector systems are revealed, on the basis of which a promising alternative was presented, devoid of the disadvantages of existing systems.*

**Keywords:** *types of detectors, thermal and cold neutrons, spectrometers of the IBR-2 reactor.*