

## ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 53.087.45

# ПРОТОТИП ДВУХКООРДИНАТНОГО ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РЕЗИСТИВНОЙ КАМЕРЫ С ПЛЕНКОЙ КАРБИДА БОРА, ОБОГАЩЕННОЙ ПО ИЗОТОПУ $^{10}\text{B}$

©2024 г. М. О. Петрова<sup>a,b,\*</sup>, А. А. Богдзель<sup>a</sup>, В. И. Боднарчук<sup>a, b</sup>,  
О. Даулбаев<sup>a, c</sup>, В. М. Милков<sup>a</sup>, А. К. Курилкин<sup>a</sup>, К. В. Булатов<sup>a</sup>,  
А. В. Дмитриев<sup>a</sup>, В. А. Бабкин<sup>a</sup>, М. М. Авдеев<sup>a</sup>, Е. И. Литвиненко<sup>a</sup>

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

Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>b</sup>Государственный университет “Дубна”

Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Университетская, 19

<sup>c</sup>Институт ядерной физики

Казахстан, 050032, Алматы, ул. Ибрагимова, 1

\*e-mail: mbelova@jinr.ru

Поступила в редакцию 06.02.2024 г.

После доработки 14.03.2024 г.

Принята к публикации 06.05.2024 г.

Представлен прототип двухкоординатного позиционно-чувствительного детектора на основе плоскопараллельной резистивной камеры с тонкой пленкой-конвертером (2 мкм) из карбида бора, обогащенной по изотопу  $^{10}\text{B} > 95\%$ . Размер активной области составляет  $75 \times 150 \text{ мм}^2$ , что соответствует 64 каналам регистрации по оси  $x$  и 128 каналам по оси  $y$ . Приведена конструкция детектора, результаты диагностики пленок-конвертеров методом рентгеновской рефлектометрии, спектр конверсионного гамма-излучения и результаты измерений с лабораторным источником  $^{252}\text{Cf}$ .

DOI: 10.31857/S0032816224060029 EDN: ELWQLQ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Нейтроннографические методы исследования конденсированных сред нашли широкое применение благодаря высокой проникающей способности медленных нейтронов, наличию у нейтрона магнитного момента и неоднородности изменения амплитуды когерентного рассеяния для различных массовых и зарядовых чисел ядер. В настоящий момент на станциях нейтронного рассеяния наиболее распространены системы регистрации нейтронов на основе проволочных  $^3\text{He}$ -детекторов и сцинтилляционных детекторов, содержащих  $^6\text{Li}$ . Для эффективной эксплуатации источников нейтронов нового поколения необходимо, чтобы станции нейтронного рассеяния были снабжены детекторными системами с рекордными загрузочной

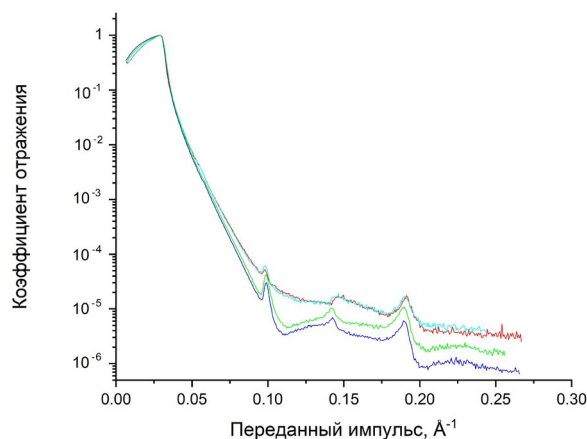
способностью, пространственным и временным разрешениями. Анализ ожидаемых характеристик детектора тепловых и холодных нейтронов на основе плоскопараллельной резистивной камеры с пленкой карбида бора, обогащенной по изотопу  $^{10}\text{B} > 95\%$ , ( $^{10}\text{B}$ -ППРК) показал потенциал достижения субмиллиметрового пространственного разрешения (до 100 мкм), высокой эффективности регистрации медленных нейтронов ( $>50\%$  в многослойной или наклонной архитектуре детектора) и быстрой синхронизации (временное разрешение менее 10 нс [1]). ППРК [2, 3] обладают рядом практических особенностей, например, нечувствительностью к магнитным полям, механизмом защиты от внутреннего разряда, высокой модульностью и масштабируемостью, а также низкой сто-

имостью на единицу площади. Уникальное сочетание рабочих характеристик делает этот тип детекторов перспективным для применения в нейтронографических экспериментах, национальной безопасности и геологии. Классическая архитектура ППРК представляет собой плоскую камеру, работающую в лавинном режиме, узкие газовые промежутки формируются высокоомными плавающими электродами, разделенными монофиламентной леской с толщиной до 400 мкм, сигнал индуцируется на стрипах, нанесенных на печатные платы по краям стека.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для создания прототипа  $^{10}\text{B}$ -ППРК несколько пленок-конвертеров были нанесены на подложки из термополированного стекла в ESS Detector Coatings Workshop в университете Линкопинга с помощью магнетрона постоянного тока Chewbacca CemeCon CC800/9 при температуре 400 градусов с толщинами 0.5, 1 и 2 мкм. Для определения структуры и плотности пленок использовался рентгеновский дифрактометр PANalytical Empyrean, материалом трубки которого являлась медь, а соотношение длин волн  $K\alpha_2/K\alpha_1 = 0.500$  ( $\lambda K\alpha_1 = 1.5405980 \text{ \AA}$ ,  $\lambda K\alpha_2 = 1.5444260 \text{ \AA}$ ). Поскольку пленка была нанесена послойно, для изучения параметров структуры было принято решение об исследовании пленки толщиной 500 нм. Результаты измерения кривой отражения представлены на рис. 1.

Видно, что с ростом переданного импульса кривые отражения, полученные для пленок, на-



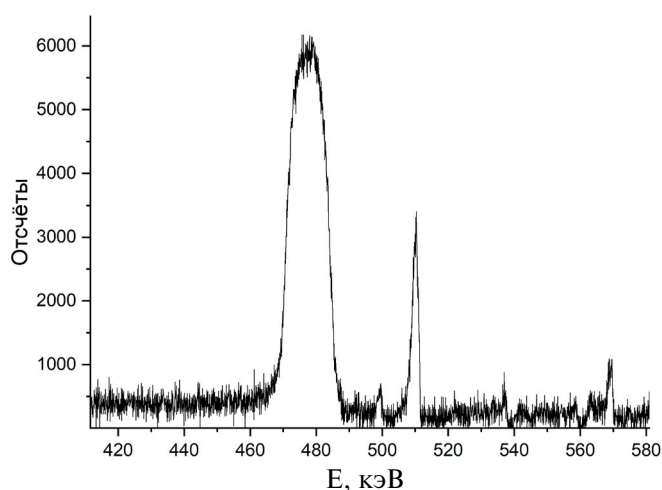
**Рис. 1.** Кривые отражения рентгеновских лучей от поверхности пленок-конвертеров толщиной 500 нм, нанесенных на подложки из термополированного стекла толщиной 280 и 400 мкм, снятые в двух точках для каждого образца.

несенных на подложки из термополированного стекла толщиной 400 мкм, спадают быстрее. Пленка-конвертер, нанесенная на подложку толщиной 400 мкм, обладает большей шероховатостью границ раздела слоев ввиду флуктуации этого параметра при нанесении, которая приводит к ослаблению зеркальной составляющей в соответствии с фактором Дебая—Уоллера [4].

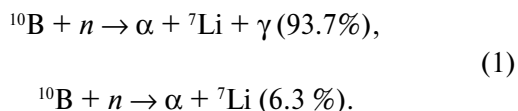
Однако, несмотря на разницу в ослаблении при  $Q > 0.005$ , кривые демонстрируют высокую степень подобия, одинаковую величину критического угла, а также обладают дифракционными пиками при одних и тех же  $Q$ , что говорит о подобии в структурной организации слоев образцов. Подгонка по методу наименьших квадратов показала, что пленка обладает плотностью  $2.47 \text{ г/см}^3$  и представляет собой сверхрешетку с характерными толщинами слоев 6.4 нм и 4.3 нм, пики от которых наблюдаются на рис. 1 в соответствии с условием Вульфа—Брэгга.

Следующим шагом в изучении пленок-конвертеров было измерение спектра конверсионного гамма-излучения. Его измерение проводилось с лабораторным источником нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ , окруженным пластиковым сферическим замедлителем. Стекло с  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  располагалось непосредственно на кристалле германиевого гамма-спектрометра Canberra GC10021, кристалл спектрометра и стекло с конвертером были окружены свинцовым колпаком толщиной 1 см. Результаты измерений представлены на рис. 2.

Захват теплового нейтрона  $^{10}\text{B}$  приводит к распаду составного ядра по двум каналам:



**Рис. 2.** Спектр характеристического гамма-излучения конверсии нейтронов ядрами  $^{10}\text{B}$ .



Как следует из (1), помимо тяжелых заряженных частиц, примерно в 94% случаев реакция конвертации сопровождается вылетом гамма-кванта с энергией 478 кэВ [5]. Максимальный доплеровский сдвиг этого перехода рассчитан в работе [6] и составил 7.6 кэВ. Поскольку уровень 478 кэВ имеет спин  $I = 1/2$ ,  $\gamma$ -излучение будет испускаться изотропно в системе центра масс относительно направления спина Li. Следовательно, в случае неполяризованных ядер бора и без учета разрешения детектора форма линии будет прямоугольной с максимальным уширением 15.2 кэВ. За время жизни, составляющее около 102 фс [7], возбужденные ядра  ${}^7\text{Li}$  могут столкнуться с окружающим веществом до того, как произойдет испускание фотона с энергией 478 кэВ, потеряв таким образом часть или всю свою энергию. Можно предположить, что вместо одной прямоугольной линии пик с энергией 478 кэВ состоит из гистограммного суммирования нескольких прямоугольников. Для каждого из этих прямоугольников его ширина будет зависеть от скорости ядер  ${}^7\text{Li}$ , а высота — от времени жизни уровня посредством закона экспоненциального затухания, как было продемонстрировано в работе [8].

В итоге, взаимодействие собственного  $\gamma$ -излучения с конструкционными материалами детектора, а в особенности со стеклами-электродами, приводит к генерации электронов внешнего фотоэффекта, которые дают вклад в амплитудный спектр энергосодержания в виде низкоэнергетичного малоинтенсивного пика [9], поддающегося разделению  $n/\gamma$ .

Внутренний и внешний виды прототипа детектора  $^{10}\text{B}$ -ППРК представлены на рис. 3.

Архитектура и конструкционные материалы подробно описаны в [9]. На рис. 3 справа представлены печатные платы, на которые полиамидным скотчем закреплены стекла-электроды, на обоих стеклах с внешней стороны от газового промежутка нанесена полупроводящая эмаль для формирования потенциала, потенциал на эмаль подается с медной полоски, соединенной с разъемом SHV кабелем МГТФ 0.5. На одной из плат располагаются отверстия, в которых закреплены пластиковые винты, они позволяют зафиксировать спейсеры в газовом промежутке и детектор в корпусе. На второй плате располагается стекло, на котором, помимо эмали, нанесена пленка  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  толщиной 2 мкм, располагающаяся непосредственно в газовом промежутке. После захвата ядром  $^{10}\text{B}$  нейтрона образуется составное ядро, которое распадается в соответствии с (1). В силу того, что продукты конвертации разлетаются в противоположных

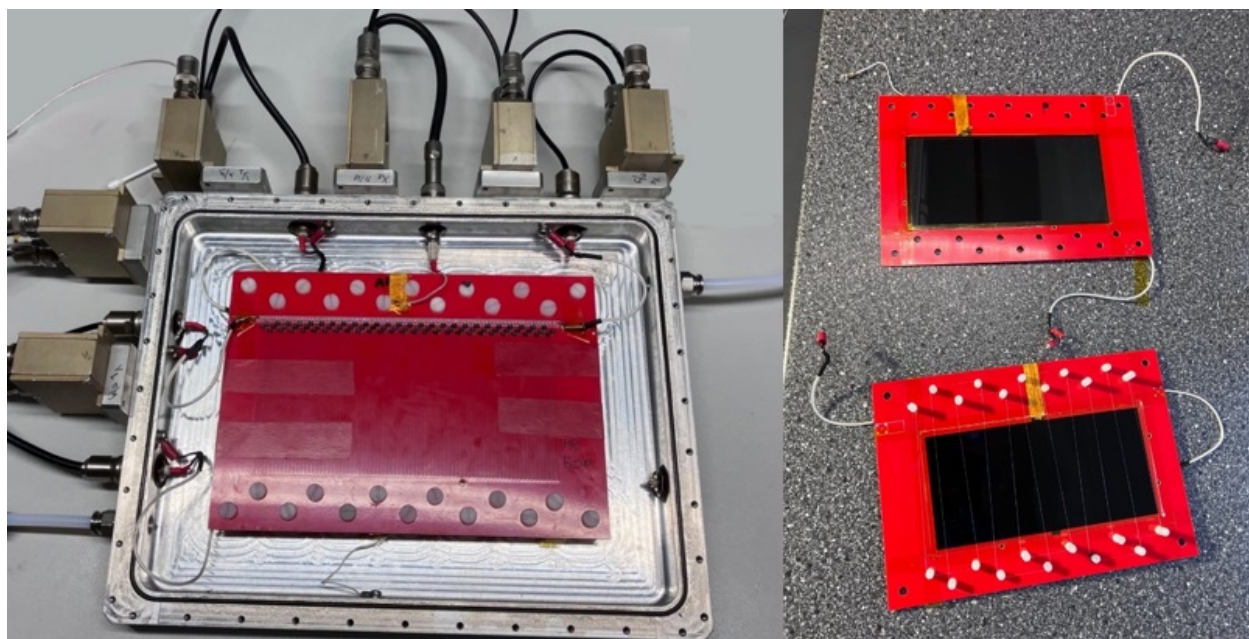


Рис. 3. Внутренний и внешний виды прототипа детектора  $^{10}\text{B}$ -ППРК.

направлениях, в газовый промежуток выходит только одно из дочерних ядер. Это ядро вызывает рождение кластеров первичной ионизации ( $e-I$ ), первый из которых появится непосредственно у поверхности конвертера. Для повышения надежности и эффективности регистрации путь электронов до ионизации делается равным ширине всего газового промежутка путем приложения на электрод без пленки-конвертера положительного потенциала. Движение электронов первичной ионизации под действием приложенного электрического поля будет вызывать вторичную ионизацию. Этот процесс носит лавинообразный характер и определяется в основном давлением газа, величиной напряженности поля и потенциалом ионизации молекул газа. Движение заряда лавины индуцирует сигнал на считывающие электроды-стрипы.

Изучение работоспособности прототипа также было выполнено с использованием лабораторного источника  $^{252}\text{Cf}$ , окруженного пластиковым сферическим замедлителем, схема измерения приведена на рис. 4.

Помимо источника нейтронов, в измерениях использовались: баллон тетрафторэтана ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ ),

который коммерчески доступен и производится как хладагент R-134A с ротаметром для контроля расхода газа, скорость продувки составила  $3 \text{ см}^3/\text{мин}$ ; источник высокого напряжения и диджитайзер фирмы CAEN; 5 предусилителей, из которых один — анодный (канал 0) с  $K=800$ , который является триггером и открывает окно в  $300 \text{ нс}$  для сигналов с линий задержки, и четыре — с концов линии задержки (каналы 2–5), по два на каждую координату, с  $K=1200$ . Для определения координаты используется линия задержки, к которой подключены считывающие стрипы. После индукции сигнала на стрипы он начинает распространяться по линии задержки в направлениях обоих концов. Линия задержки — набор  $L$ - и  $C$ -компонент, каждая пара которых задерживает распространяющийся сигнал на время  $\sqrt{LC}$ . Определение координаты взаимодействия нейтрона с  $^{10}\text{B}$  происходит по разности времени прихода сигнала на концы линии задержки. Для линии задержки использовались катушки  $95 \text{ нГн}$  и конденсаторы  $39 \text{ пФ}$  фирмы Murata. Размеры рабочей области детектора составили  $75 \times 150 \text{ мм}^2$ , а общая длительность линий задержки —  $118$  и  $236 \text{ нс}$  для  $x$ - и  $y$ -координат

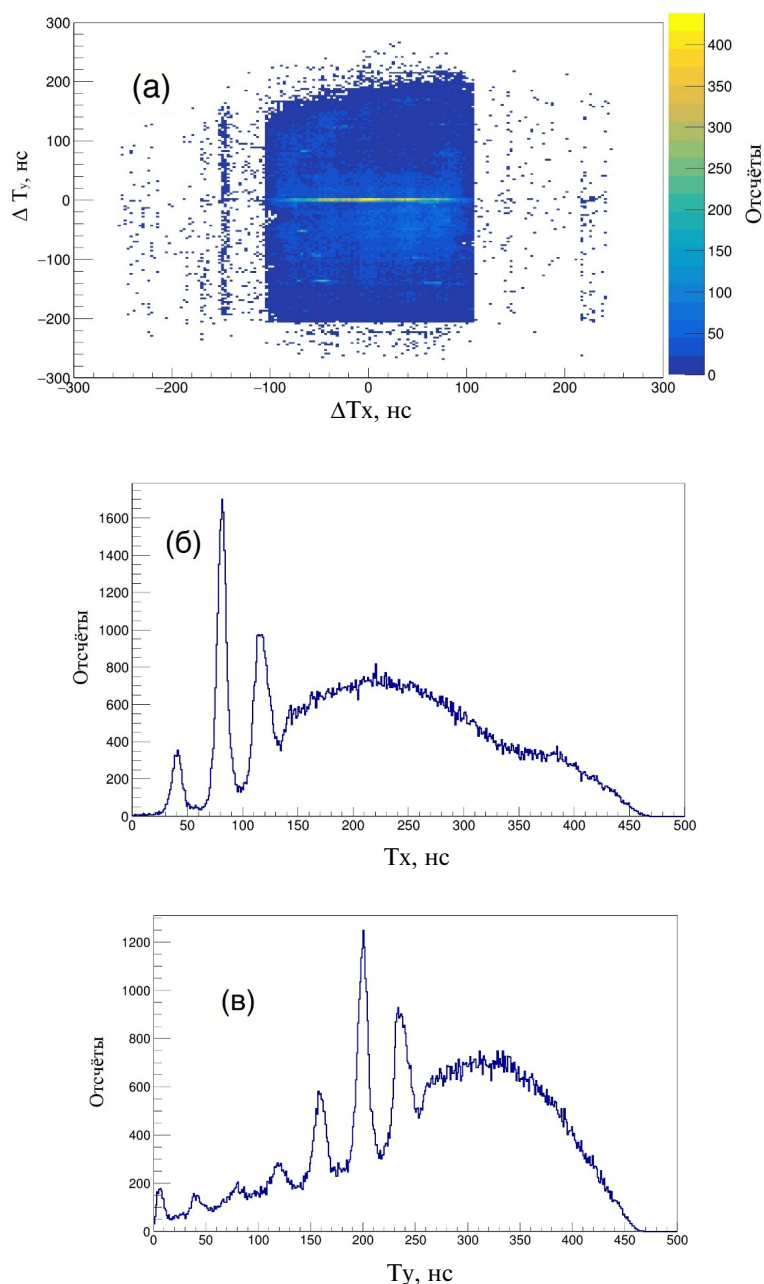


Рис. 4. Схема измерения.



соответственно. Реализация метода линии задержки позволяет существенно сократить количество требуемых каналов регистрации при сохранении высокого пространственного разрешения, которое при реализации метода следящего порога (leading edge) определяется частотой дискретизации диджитайзера, в CAEN6730 она составляет 500 МГц [10]. Данные результатов измерений при квазиравномерной засветке представлены на рис.5.

На рис.5а наблюдаются несколько аномалий, а именно: снижение плотности засветки по бокам в форме подковы, обусловленное экранированием индукции сигнала на считывающие стрипы медными полосками, подающими напряжение; снижение плотности засветки в верхней части детектора, обусловленное несимметричным расположением подающих напряжение медных полосок; резкий рост плотности засветки в центре детектора часто



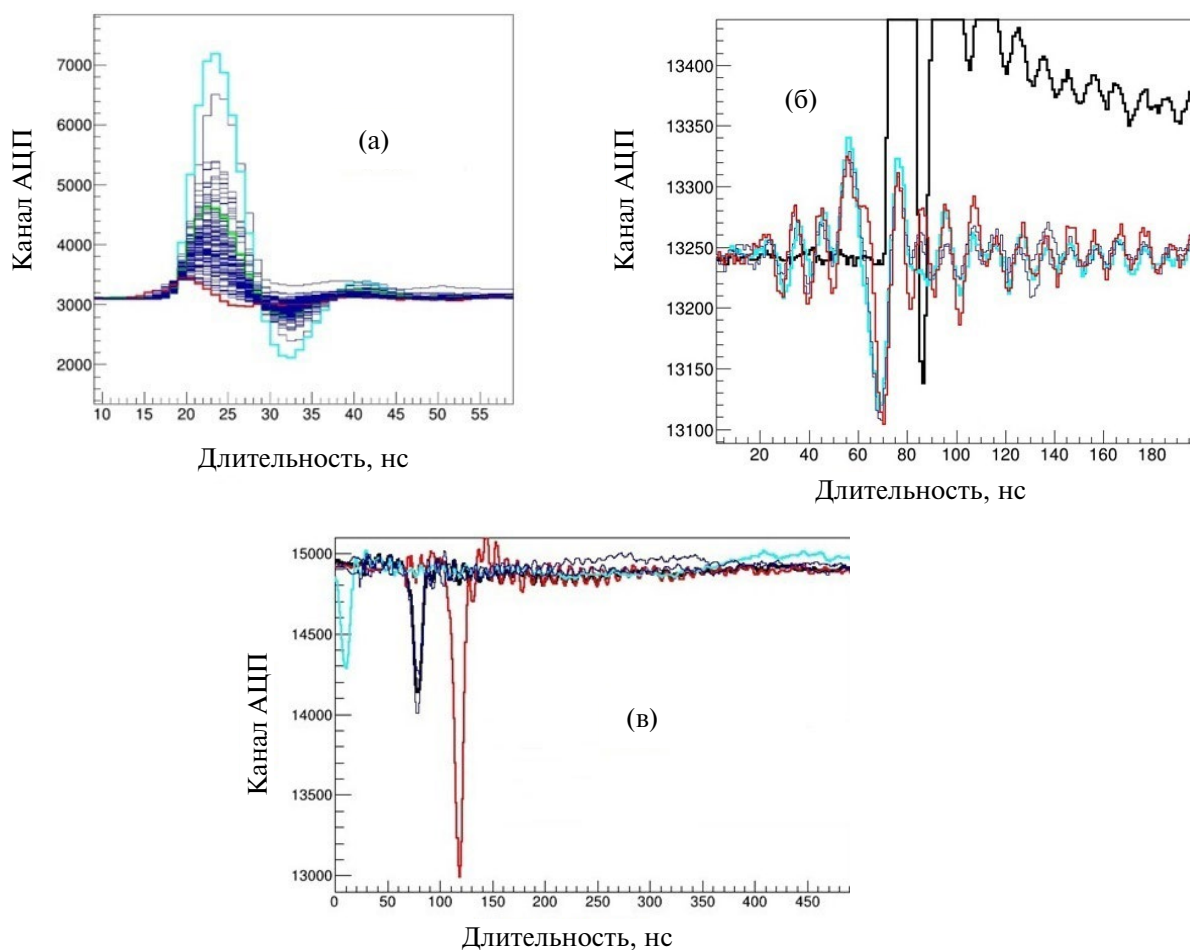
**Рис. 5.** Данные результатов измерений детектором  $^{10}\text{B}$ -ППРК лабораторного источника  $^{252}\text{Cf}$ , окруженного пластиковым сферическим замедлителем: **а** — квазиравномерная засветка; **б** — сумма времени прихода сигналов на оба конца  $x$ -линии задержки относительно анода; **в** — сумма времени прихода сигналов на оба конца  $y$ -линии задержки относительно анода.

встречается в детекторах медленных нейтронов и обусловлен потоком гамма-квантов, который часто сопровождает нейтронный поток и обладает большей плотностью; последняя аномалия связана с периодическим ростом плотности засветки в виде линий с постоянным шагом, что связано с наличием в газовом промежутке спейсеров, загрязненных потожировыми следами в процессе изготовления прототипа. Приведенные выше аномалии обусловлены конструктивными особенностями прототипа и могут быть устранены.

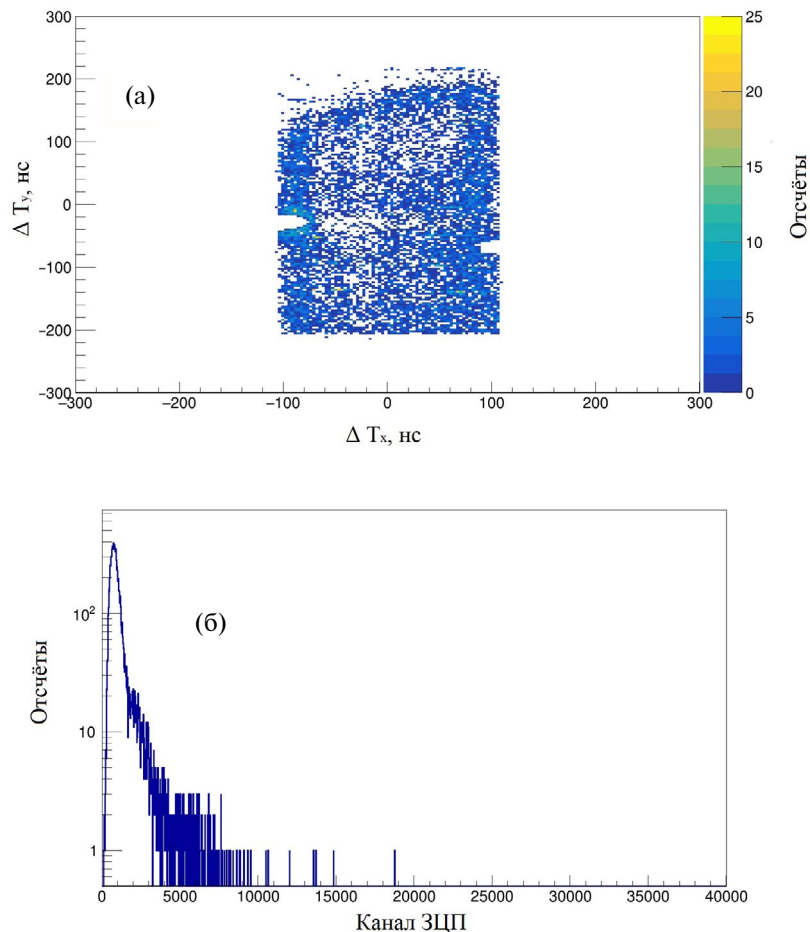
На рис. 5б и 5в представлены суммы времени прихода сигналов на оба конца линии задержки для  $x$ - и  $y$ -координат соответственно. Они содержат, помимо основного пика, соответствующего общей длительности линии задержки, побочные пики. Побочные пики возникают в сумме времени прихода сигнала из-за осциллирующей формы некоторых анодных сигналов (рис. 6а).

Ввиду осциллирующей формы анодного сигнала триггер на открытие временного окна для сигналов с линий задержки срабатывает от разных частей колебания, из-за чего на спектре сумм времени прихода сигналов появляются пики с частотой следования, соответствующей частоте осцилляций анодного сигнала (см. рис. 5б и 5в). Этот эффект авторы связывают с накоплением ионов и последующей вынужденной разрядкой детектора. Предполагается, что добавление электроотрицательного газа для “нейтрализации” ионов (например  $SF_6$ ) и газа с большим потенциалом ионизации и колебательными переходами низлежащих уровней (например  $CH_4$  или  $CF_4$ ) подавит этот эффект [11].

При выделении из спектров сигналов, соответствующих пикам общей длительной задержки линий  $x$  и  $y$ , были получены результаты, представленные на рис. 7.



**Рис. 6.** Формы сигнала: **а** — нормальная форма анодного сигнала, **б** — осциллирующая форма анодного сигнала, **в** — расположение сигналов с линии задержки во временном окне, открываемом разными частями колебания осциллирующего анодного сигнала.



**Рис. 7.** Результат измерений квазиравномерной засветки (а) и амплитудный спектр (б) для выделенных из массива данных, соответствующих полным длительностям линий задержки.

На рис. 7а отчетливо видно, что аномалии, связанные с конструкционными особенностями, никуда не исчезли, а вот резкий рост плотности засветки в центре детектора был подавлен. Распределение амплитуд “чистых” сигналов соответствует распределению Ландау, что было спрогнозировано путем Монте-Карло-моделирования детектора [9].

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание детектора большой площади на основе  $^{10}\text{B}$ -ППРК для станций нейтронного рассеяния является нетривиальной задачей, требующей разрешения большого количества конструкционных и операционных трудностей, связанных с повышением качества получаемых данных, надежности и эффективности регистрации детекторной системы. Созданный прототип продемонстрировал многообещающие результаты, что говорит о необходимости дальнейшего развития

позиционно-чувствительных детекторов тепловых и холодных нейтронов на основе  $^{10}\text{B}$ -ППРК.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Роберта Холл-Уилтона, Чжун-Чуань Лай и Линду Робинсон за помощь в нанесении пленок-конверторов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-10-2021-115 от 13.10.2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blanco A., Cabanelas P., Belver D. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2009. V. 602. P. 691.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.091>

2. *Santonico R., Cardarelli R.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. 1981. V. 187. P. 377.  
[https://doi.org/10.1016/0029-554X\(81\)90363-3](https://doi.org/10.1016/0029-554X(81)90363-3)
3. *Cardarelli R., Di Ciaccioet A., Santonico R.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. 1993. V. 333. P. 399.  
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)91182-M](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)91182-M)
4. *Zhou X.-L., Sow-Hsin Chen S.-H.* // Phys. Rep. 1995. V. 257. P. 223.  
[https://doi.org/10.1016/0370-1573\(94\)00110-O](https://doi.org/10.1016/0370-1573(94)00110-O)
5. *De Oliveira J.M.Jr.* // Applied Physics and Instrumentation. Braz. J. Phys. 2005. V. 35 (3b).  
<https://doi.org/10.1590/S0103-97332005000500018>
6. *Kok P.* Capture of thermal neutrons in  $^{10}\text{B}$  and  $^6\text{Li}$  applications in spectroscopy and in the study of weak nucleon interactions. PhD Thesis (defense: Jul, 1986; Report number: ECN-184).
7. *Mughabghab S.F., Divadeenam M., Holden N.E.* Neutron Cross Sections: Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections, Part A:  $Z = 1-60$ . Elsevier Science, New York, 1981.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-509701-7.X5001-9>
8. *Deruytter A.J., Pelfer P.* // J. Nucl. Energy. 1967. V. 21. P. 833.  
[https://doi.org/10.1016/0022-3107\(67\)90094-9](https://doi.org/10.1016/0022-3107(67)90094-9)
9. *Петрова М.О., Антонов С.В., Боднарчук В.И.* // Прикладная физика и математика. 2023. Т. 5. С. 57.  
<https://doi.org/10.25791/pfim.06.2023.1282>
10. Caen User Manual UM5960, CoMPASS: Multiparametric DAQ Software for Physics Applications. Rev. 20 — September 23rd. 2022.
11. *Гайнов Р.Р., Дулов Е.Н., Вагизов Ф.Г.* Регистрация радиоактивности. Счетная характеристика счетчика Гейгера. Учебно-методическое пособие. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный ун-т, 2013.