

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}B

©2024 г. М. О. Петрова^{a,b,*}, А. А. Богдзель^a, В. И. Боднарчук^{a, b},
О. Даулбаев^{a, c}, В. М. Милков^a, А. К. Курилкин^a, К. В. Булатов^a,
А. В. Дмитриев^a, В. А. Бабкин^a, М. М. Авдеев^a, Е. И. Литвиненко^a

^aОбъединенный институт ядерных исследований

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

^bГосударственный университет "Дубна"

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

^cИнститут ядерной физики

Казахстан, 050032, г. 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}B >95%. Размер активной области $75 \times 150 \text{ мм}^2$, который 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}Cf .

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 ^3He -детекторов и сцинтилляционных детекторов, содержащих ^6Li . 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}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, нечувствительность к магнитным полям, механизм защиты от внутреннего разряда, высокая модульность и масштабируемость, а также низкая стоимость 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}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 с толщиной 500 нм. Результаты измерения кривой отражения представлены на рис. 1.

Рис.1. Кривые отражения рентгеновских лучей от поверхности пленок-конвертеров

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

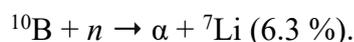
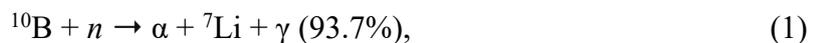
которая приводит к ослаблению зеркальной составляющей в соответствии с фактором Дебая–Уоллера [4].

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 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–Брегга.

Следующим шагом в изучении пленок-конвертеров было измерение спектра конверсионного гамма-излучения. Его измерение проводилось с лабораторным источником нейтронов ^{252}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.

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

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



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 $I = 1/2$, γ -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 ^7Li 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 ^7Li , а высота – от времени жизни уровня посредством закона экспоненциального затухания, как было продемонстрировано в работе [8].

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

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

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

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}B нейтрона образуется составное ядро, которое распадается в соответствии с (1). В силу того, что продукты конвертации разлетаются в противоположных 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}Cf , окруженного пластиковым сферическим замедлителем, схема измерения приведена на рис.4.

Рис.4. Схема измерения

Помимо источника нейтронов, в измерения 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 см³/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 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}B происходит по разности времени прихода сигнала на концы линии задержки. Для линии задержки использовались катушки 95 нГн и конденсаторы 39 пФ фирмы Murata. Размеры рабочей области детектора составили $75 \times 150 \text{ мм}^2$, а общая длительность линий задержки составила 118 и 236 нс для x - и y -координат 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.

Рис.5. Данные результатов измерений детектором ^{10}B -ППРК лабораторного источника ^{252}Cf , окруженного пластиковым сферическим замедлителем

На рис.5а наблюдается 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 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 конструкционными 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).

Рис.6. Формы сигнала

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 SF₆) и газа с большим потенциалом ионизации и колебательными переходами низколежащих уровней (например CH₄ или CF₄) 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.7. Результат измерений квазиравномерной засветки (а) и амплитудный спектр (б)

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 ¹⁰B-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 ¹⁰B-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 октября 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 Ciaccio 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. 35 (3b) • Sept 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-97332005000500018>
6. *Kok P.* Capture of thermal neutrons in ^{10}B and ^6Li 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 университет, 2013.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- 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.
- Рис. 2.** Спектр характеристического гамма-излучения конверсии нейтронов ядрами ^{10}B .
- Рис. 3.** Внутренний и внешний вид прототипа детектора ^{10}B -ППРК.
- Рис.4.** Схема измерения.
- Рис.5.** Данные результатов измерений детектором ^{10}B -ППРК лабораторного источника ^{252}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.
- Рис.6.** Формы сигнала: **а** – нормальная форма анодного сигнала, **б** – осциллирующая форма анодного сигнала, **в** – расположение сигналов с линии задержки в временном окне, открываемого 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.

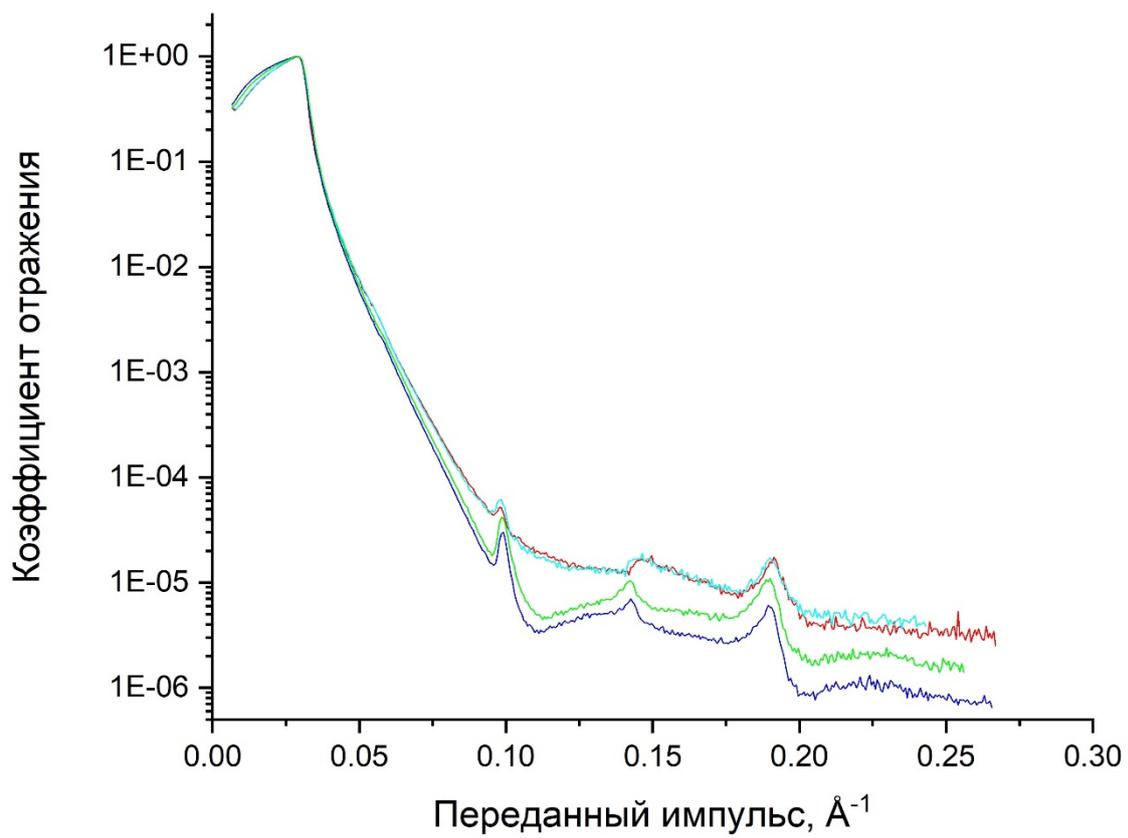


Рис. 1

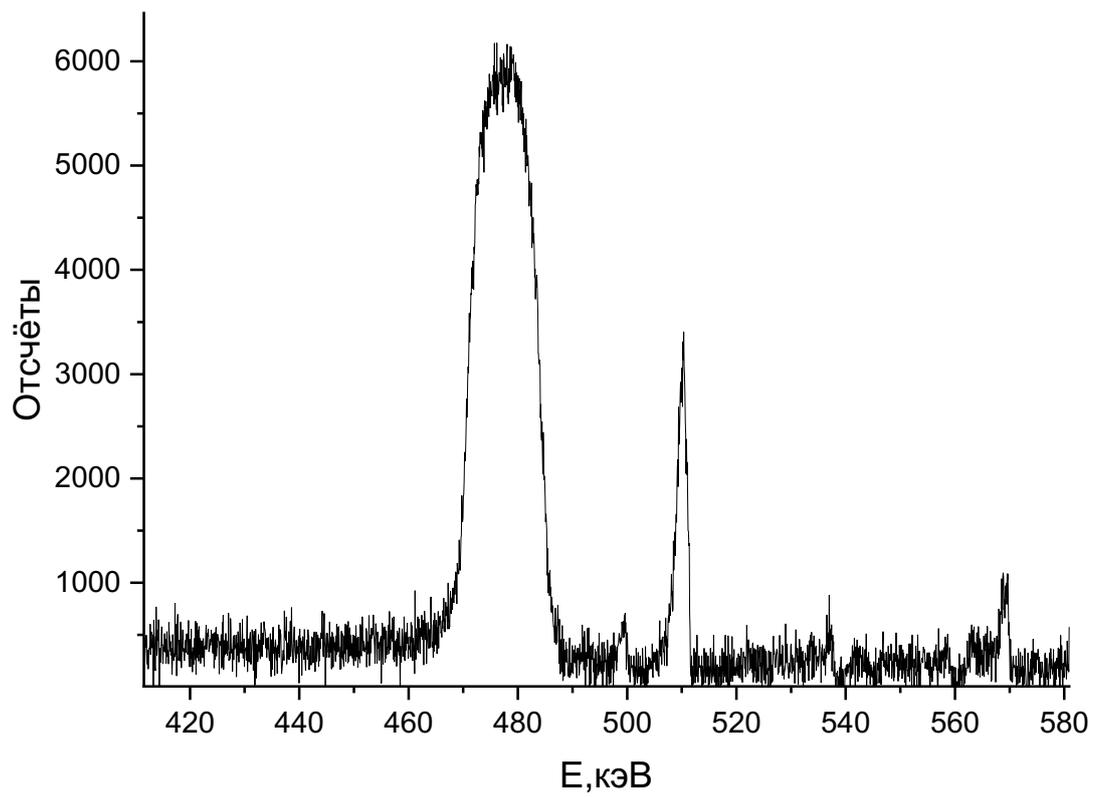


Рис. 2

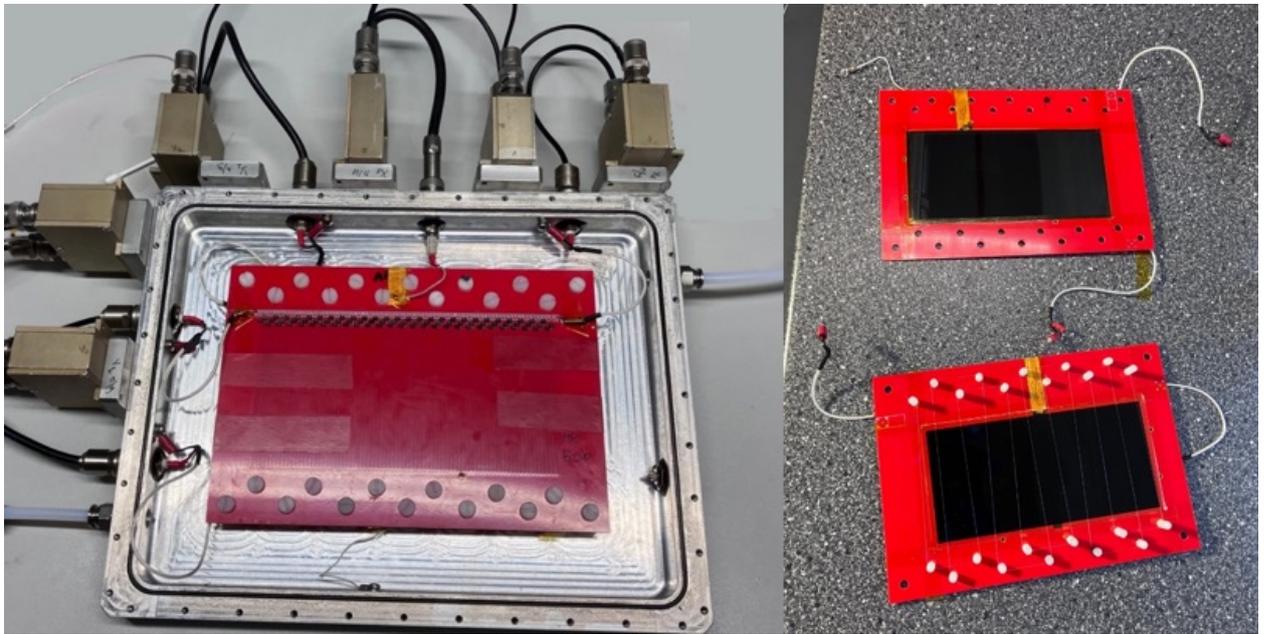


Рис. 3



Рис. 4

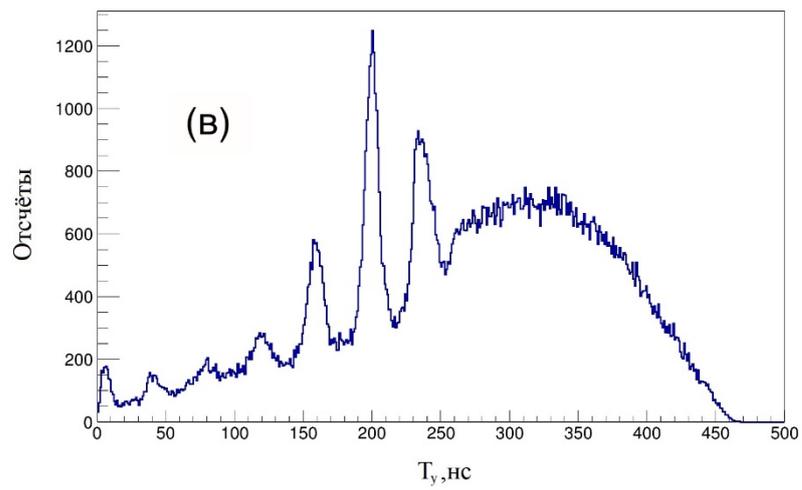
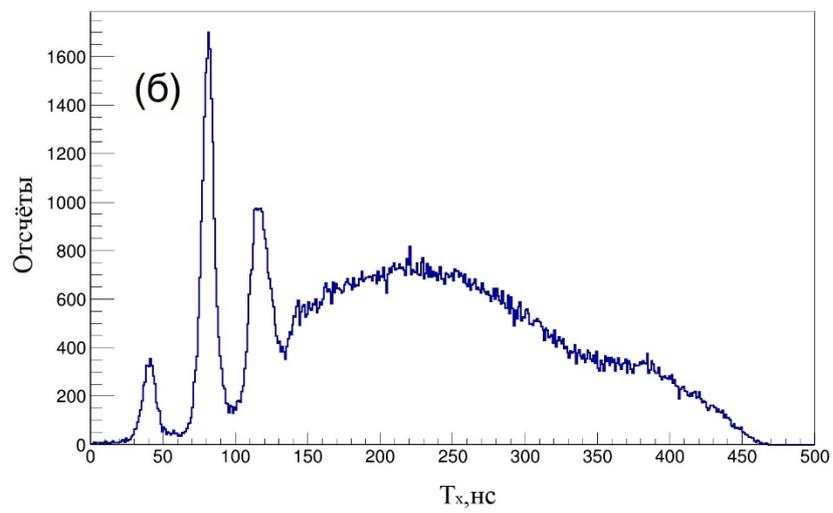
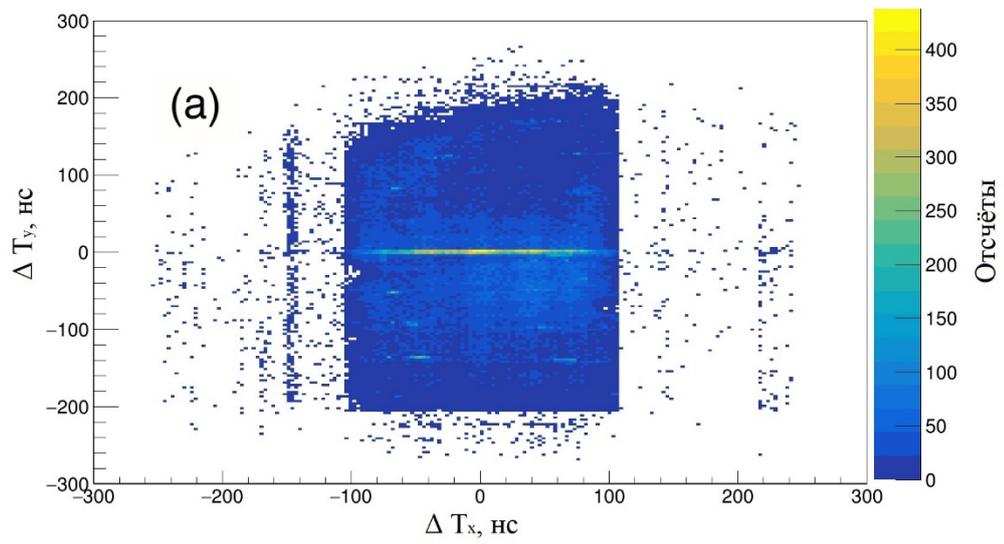


Рис. 5

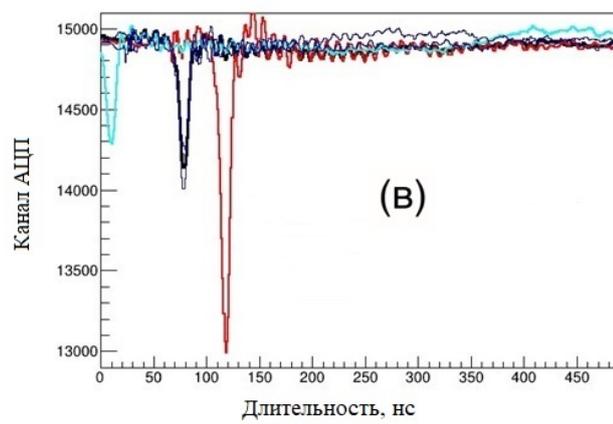
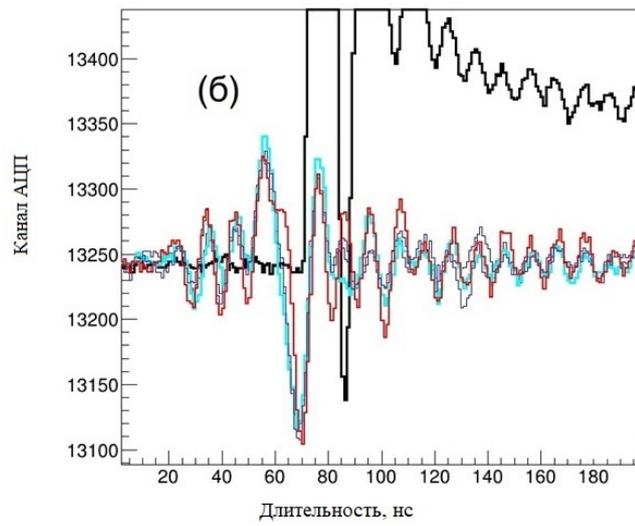
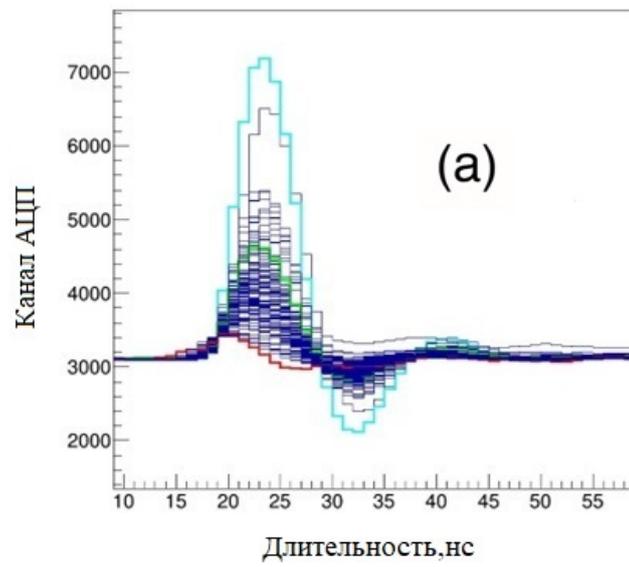


Рис. 6

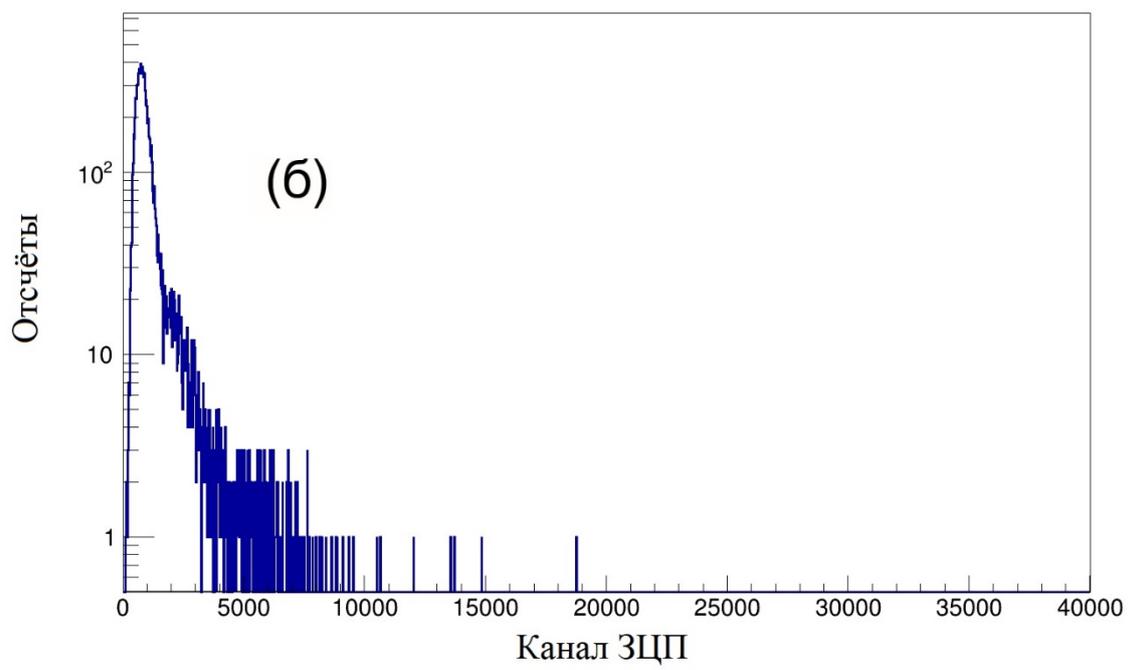
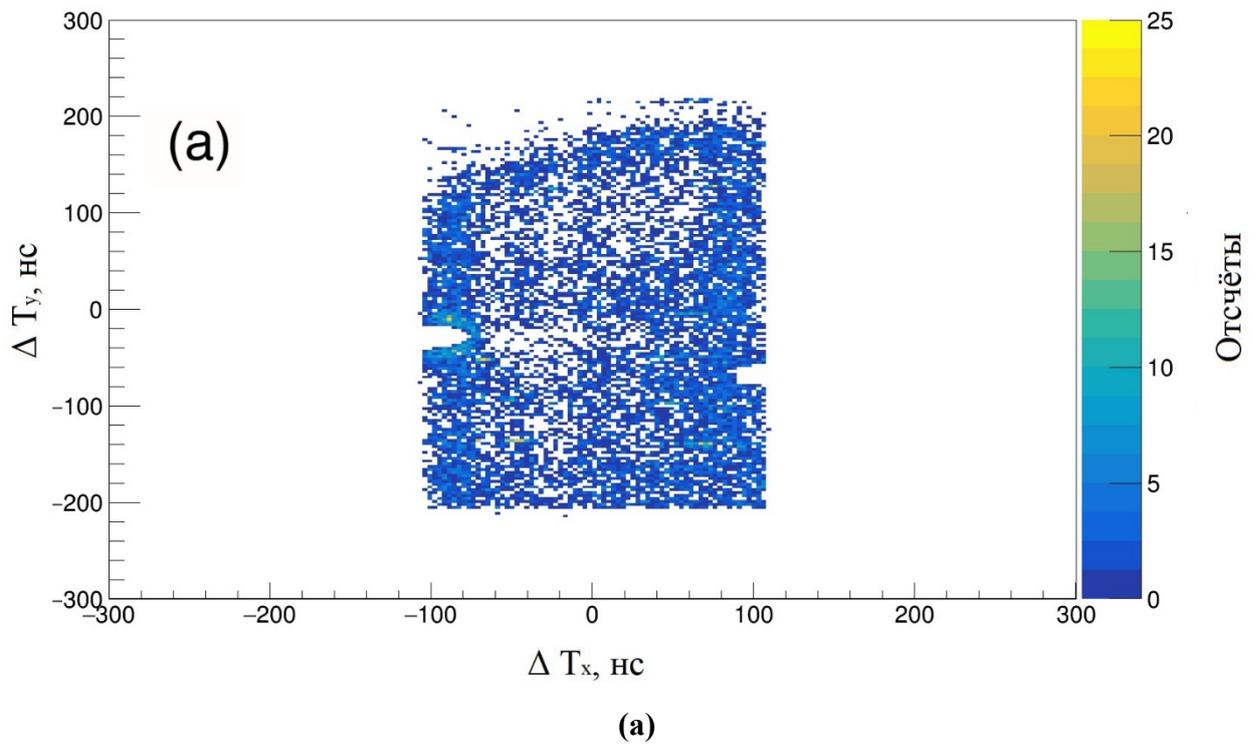


Рис. 7

Для связи с авторами:

Петрова Мария Олеговна

Е-mail: mbelova@jinr.ru

Тел.: 8-950-555-95-71 (моб.)