

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ / INSTRUMENTS AND METHODS OF
EXPERIMENTAL PHYSICS

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.29>

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДИФРАКТОМЕТР СФЕРА

Научная статья

Трунов Д.Н.^{1,*}, Марин В.Н.², Аксенов С.Н.³, Литвин В.С.⁴, Бучный Д.А.⁵, Садыков Р.А.⁶

¹ ORCID : 0000-0002-1966-083X;

³ ORCID : 0000-0002-3702-778x;

⁴ ORCID : 0000-0002-5242-4249;

⁶ ORCID : 0000-0002-3986-0994;

¹ Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Гатчина, Российская Федерация

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук, Троицк, Российская Федерация

⁴ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (redmitr[at]yandex.ru)

Аннотация

Разработан многофункциональный дифрактометр СФЕРА. Основу дифрактометра составляют высокоэффективные детекторы нейтронов на основе сцинтиллятора ZnS(Ag):6LiF и кремниевых фотоумножителей. Детекторы расположены на 7 кольцах, общее количество детекторов 156 шт. За счет перемещения колец вдоль падающего пучка нейтронов обеспечивается захват нейтронов в диапазоне углов от 6° до 174° относительно падающего пучка. Также за счет расположения детекторов на кольце относительно образца обеспечивается возможность исследования с применением различных устройств: криостатов, криомагнитов, камер высокого давления и выявление текстуры образца. В случае, если не требуется выявление текстуры, возможно суммирование спектров с детекторов расположенных на одном кольце, что в свою очередь уменьшает время проведения эксперимента. За счет возможности изменения расстояния образец-детектор становится возможным варьировать разрешение. Проведено моделирование параметров дифрактометра для оценки разрешения дифрактометра. Разработана универсальная электроника, которая позволяет проводить измерения как на времяпролетном, так и на монохроматическом нейтронном пучке. Конструкция дифрактометра позволяет использовать его как универсальный порошковый дифрактометр с функцией определения текстуры и возможностью варьировать разрешение, а также обеспечить регистрацию нейтронов в широком диапазоне углов. Получен патент на разработанную конфигурацию дифрактометра.

Ключевые слова: сцинтилляционный детектор нейтронов, ZnS(Ag)/LiF, кольцевые детекторы нейтронов, дифрактометр, компактные источники нейтронов.

MULTIFUNCTIONAL DIFFRACTOMETER SPHERE

Research article

Trunov D.N.^{1,*}, Marin V.N.², Aksenov S.N.³, Litvin V.S.⁴, Buchnii D.A.⁵, Sadikov R.A.⁶

¹ ORCID : 0000-0002-1966-083X;

³ ORCID : 0000-0002-3702-778x;

⁴ ORCID : 0000-0002-5242-4249;

⁶ ORCID : 0000-0002-3986-0994;

¹ National Research Center "Kurchatov Institute", Gatchina, Russian Federation

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russian Federation

⁴ P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (redmitr[at]yandex.ru)

Abstract

A multifunctional diffractometer SPHERE has been developed. The diffractometer is based on highly efficient neutron detectors based on ZnS(Ag):6LiF scintillator and silicon photomultiplier tubes. Detectors are located on 7 rings, the total number of detectors is 156 pcs. By moving the rings along the incident neutron beam, neutrons are captured in the range of angles from 6° to 174° relative to the incident beam. Also, due to the location of the detectors on the ring relative to the sample it is possible to study with the use of various devices: cryostats, cryomagnets, high pressure chambers and to detect the texture of the sample. If texture detection is not required, it is possible to summarize spectra from detectors located on one ring, which in turn reduces the time of the experiment. Due to the possibility of changing the sample-detector distance, it becomes possible to vary the resolution. Modelling of diffractometer parameters for estimation of diffractometer resolution is carried out. A universal electronics has been developed, which allows to carry out measurements on both time-of-flight and monochromatic neutron beams. The design of the diffractometer lets to use it as a universal powder diffractometer with the function of texture determination and the possibility to vary the resolution, as well as to provide neutron registration in a wide range of angles. A patent was obtained for the developed configuration of the diffractometer.

Keywords: neutron scintillation detector, ZnS(Ag)/LiF, ring neutron detectors, diffractometer, compact neutron sources.

Введение

В настоящее время ввиду активного развития нейтронных исследовательских центров в России возникает необходимость обеспечения их современными исследовательскими установками. В частности, готовится к запуску исследовательский реактор ПИК (г. Гатчина) [1], Импульсный источник нейтронов «Омега» (г. Протвино) [2]. Помимо этого, активно развивается направление создания компактных научно-учебных источников нейтронов, например проект «DARIA» [3]. Параллельно с этим возникает необходимость разработки современных исследовательских станций, на которых возможно проводить широкий спектр исследований с применением различных устройств: криостатов, криомагнитов и камер высокого давления.

В свою очередь для оптимизации эксплуатационных расходов, время работы должно стремиться к 100%, что можно обеспечить относительно универсальной дифракционной установкой. Предложен вариант универсального дифрактометра, который возможно использовать для порошковой дифракции, а также за счет размещения детекторов вокруг образца, становится возможной определение текстуры образца. Также возможно использовать различные устройства воздействия на образец во время проведения эксперимента. Что также немаловажно, за счет большого количества высокоэффективных детекторов, возможно использовать дифрактометр на источниках с малой интенсивностью, в частности, на компактных источниках нейтронов.

В качестве детекторов для дифракционных исследований активно развиваются различные виды детекторов на основе сцинтиллятора [4], [5]. Связано это с высокой эффективностью регистрации нейтронов сцинтилляционными экранами, а также с высоким световыходом фотонов, возникающих в результате захвате нейтрона (до $1,6 \cdot 10^5$ фотонов на один нейтрон). Кроме того, световыход ZnS(Ag) имеет как быстрые компоненты (до 50 нс), соответствующие легким частицам, в т.ч. гамма-квантам, так и медленные, соответствующие нейтронам, – до 1 мкс, что позволяет разделять сцинтилляции от гамма-квантов и заряженных частиц, рождающихся в процессе захвата нейтронов. В качестве детекторов для разработанного дифрактометра используются детекторы, основанные на ZnS(Ag):⁶LiF и кремниевых фотоумножителях [6].

Сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов

Основу дифрактометра составляют многослойные сцинтилляционные детекторы нейтронов. В подобных детекторах эффективность регистрации нейтрона напрямую зависит от количества слоев [7]. Из результатов моделирования показано значительное увеличение эффективности (около 13%) при увеличении количества слоев до 3-х. Для дифрактометра специально разработана новая конструкция детекторов.

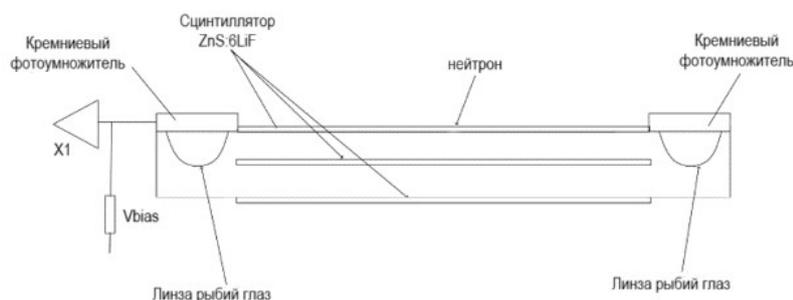


Рисунок 1 - Принципиальная схема разработанного детектора
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.29.1>

Схема разработанного детектора представлена на рисунке 1. В качестве сцинтиллятора использован сцинтиллятор с эффективностью 42% от Saint-Gobain из которого вырезались пластины размером 5x50 мм. Для световода использован прозрачный полиметилметакрилат (ПММА), из которого вырезался прямоугольник размером 5x5x60 мм. На торцах световода сделаны углубления, заполненные оптическим клеем, образуя таким образом линзы «рыбий глаз», в фокусах которых размещены кремниевые фотоумножители Sensl MICROFC-30050 с размером чувствительной области 3x3 мм.

Для размещения третьего слоя сцинтиллятора в объеме световода вырезался прямоугольник размером 5x0,5x50 мм в котором с помощью клея типа оптический цемент крепится сцинтиллятор. После размещения сцинтилляторов световод покрывался диффузным отражателем на основе фторопласта. Финальная сборка детектора покрывалась непрозрачной термоусадочной пленкой для защиты от внешнего освещения. На рисунке 2 показан внешний вид детекторов, размещённых на кольце.

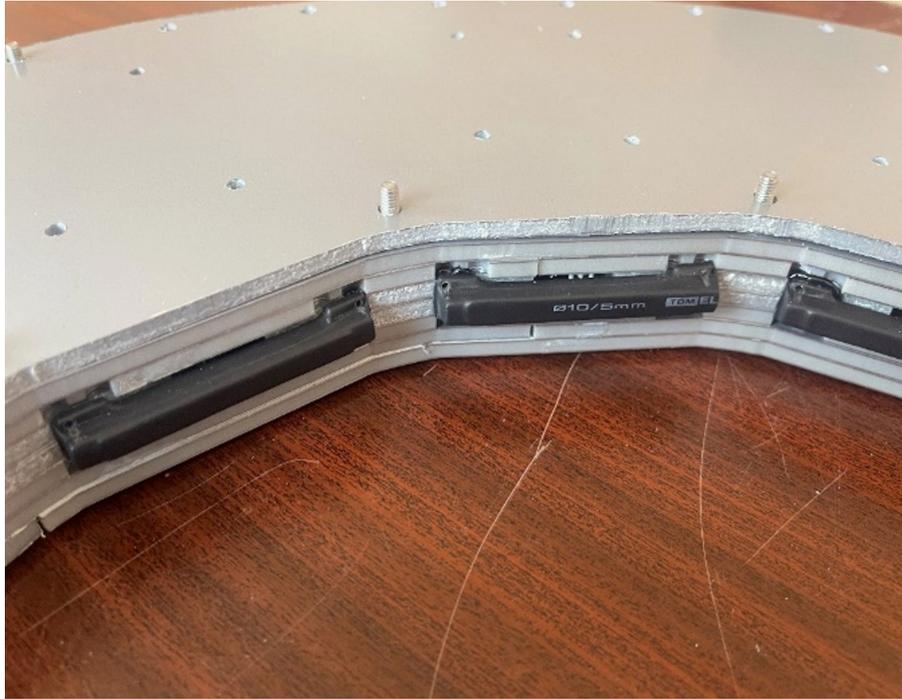


Рисунок 2 - Внешний вид детекторов, установленных в кольце дифрактометра СФЕРА
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.29.2>

Конструкция дифрактометра

Разработанная схема дифрактометра показанная на рисунке 3.

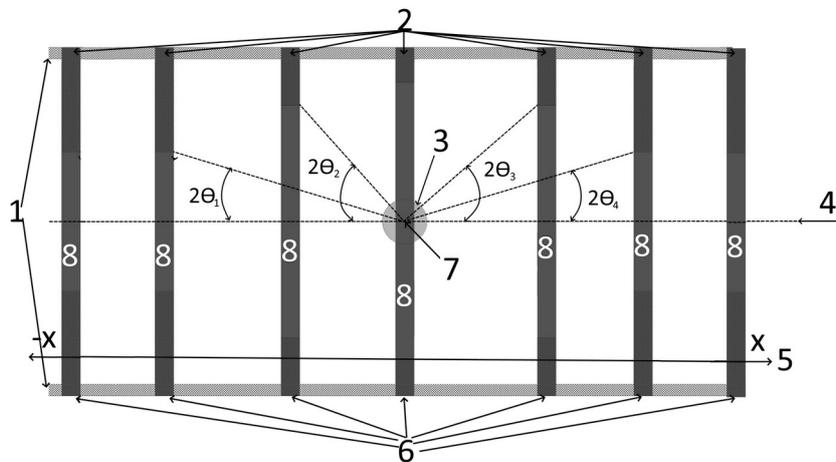


Рисунок 3 - Блок схема разработанного дифрактометра
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.29.3>

Дифрактометр состоит из 7 (8) независимых колец диаметром от 300 до 600 мм расположенных на каретках (6), закреплённых на рельсовых направляющих (1). Кольца приводятся в движение независимыми шаговыми двигателями (7). Принцип работы дифрактометра: нейтроны (4) падают на образец (7) расположенному по центру среднего кольца на столе образца (3). Падающие нейтроны рассеиваются под углами $2\theta_1$, $2\theta_2$, и т.д. Перемещая кольца вдоль оси X (5) меняя расстояние образец-детектор, возможно настраивать принимаемые детектором углы отражения и варьировать разрешение. Общее количество детекторов 156 шт. Расстояние 1 кольцо – 7 кольцо 1900 мм. Угловой диапазон 6° - 174° . На данную схему дифрактометра получен патент [8].

Электронная схема

Электронная схема управления дифрактометром состоит из нескольких частей и представлена на рисунке 4.

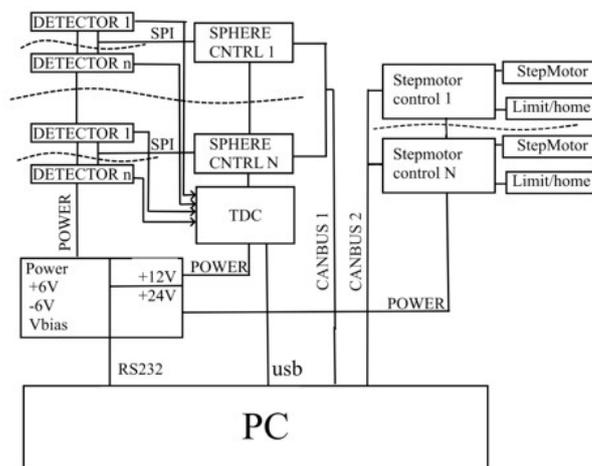


Рисунок 4 - Блок-схема электроники дифрактометра СФЕРА
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.29.4>

1. Предусилитель детектора с регулируемым порогом.

Для усиления и обработки сигналов, получаемых с кремниевых фотоумножителей, требуется их предварительное усиления. В качестве предусилителей используется модификация схемы, описанная в работе [6]. В новой версии предусилителя добавлено цифровое управление порогом дискриминатора, а также схема динамического смещения. Схема динамического смещения служит для компенсации времени зарядки кремниевого фотоумножителя и устранения послеимпульса, который влияет на порог дискриминатора [8]. Использование схемы динамического смещения позволило увеличить загрузочную способность в 2,7 раза и уменьшить мертвое время, что в свою очередь важно при высокой загрузке детектора.

Цифровое управление порогом осуществляется по шине SPI, детекторы одного кольца соединены параллельно. Для управления порогом разработано устройство управления порогом кольца, которая принимает по шине CANBUS номер предусилителя и порог, и записывает значение в память цифрового резистора [10];

2. Время – цифровой преобразователь.

Для проведения времяпролетных нейтронных исследований, определение энергии нейтрона происходит по времени прошедшему от события генерации нейтронов до момента регистрации нейтрона детектором. Регистрируя время и расстояние, прошедшее нейтроном, можно определить его скорость/длину волны.

Принцип работы ВЦП основан на разделении времени от момента генерации нейтрона на равные интервалы и счета количества событий, происходящих за этот интервал. Разработанный ВЦП имеет 160 каналов для детекторов и 1 канал синхроимпульса, который задает стартовый импульс для начала отсчета. ВЦП основан на микросхеме ПЛИС Xilinx Kintex-7 и подключается по USB к ПК. Для унификации ВЦП может работать как во времяпролетном режиме, так и в режиме измерения монохроматического излучения, где требуется считать импульсы на определенном угле [11];

3. Система перемещения.

Для управления системой перемещения используются 7 контроллеров шаговых двигателей с интерфейсом CANBUS. Каждое кольцо имеет независимый двигатель, а также систему концевых выключателей, которые определяют начальное положение кольца, а также защищают от соударения при перемещении. Для перемещения используется зубчатая передача. Для этого на одной из стенок дифрактометра установлена зубчатая рейка, по которой перемещаются кольца.

Моделирование

Целью моделирования является оценка параметров геометрии блока детекторов «Сфера» для дифрактометра, чтобы добиться разрешения до 2% при компактных размерах, ограниченном количестве счетчиков нейтронов (не более 200) и простоте конструкции.

Предпочтительным методом при моделировании нейтронографических установок является Монте-Карло трассировка нейтронных траекторий. Используется квазиклассическое приближение, в рамках которого для всех нейтронов в каждый момент времени t симуляции определены значения координаты q и импульса p . Приближение дает хорошие результаты для энергий нейтронов, применяемых для исследования вещества. При моделировании использовались программный пакет VITESS и язык программирования общего назначения Python. Построенная модель включает в себя эксперимент по рассеянию нейтронов на поликристаллическом образце карбонадо (кубическая решетка, $Fd3m$, $a=3,567$) и последующей их регистрации многослойными нейтронными счетчиками блока детекторов «Сфера» при различных углах рассеяния и расстояниях до образца. При этом спектральные характеристики подаваемого на образец пучка соответствуют импульсному источнику «РАДЭКС» ИЯИ РАН. Модель линейного счетчика также учитывает рассеяние нейтронов в его прозрачных ПММА-слоях, обусловленное наличием атомов водорода. Разрешающая способность установки вычислялась исходя из ширины полученных в ходе эксперимента брэгговских пиков. Эффективность регистрации нейтронов счетчиками оценивалась как доля поглощенных в слоях скинтилляторов нейтронов относительно общего их количества, геометрически попавшего на лицевую поверхность счетчика. Для соблюдения технической простоты проектируемого блока детекторов «Сферы» было решено допускать только две возможные ориентации слоев линейных счетчиков – параллельно либо

перпендикулярно плоскостям несущих колец. В результате ориентация слоев счетчика относительно падающего на него пучка рассеянных нейтронов от образца зависит от угла рассеяния. Подробнее методика и результаты моделирования представлена в статье [12]. В ходе моделирования рассмотрены двухслойная и трехслойная конфигурации линейных счетчиков. Можно видеть, что выигрыш в эффективности регистрации нейтронов для трехслойной конфигурации не имеет существенной зависимости от угла рассеяния нейтронов, т.е. от ориентации его слоев относительно потока регистрируемых тепловых нейтронов (рис. 5, а). Также из данного графика видно, что эффективность слабо зависит от угла дифракции в диапазоне 2θ от 30° до 80° . Поэтому было принято решение использовать ориентацию счетчиков со сцинтилляторами параллельно оси пучка, как обеспечивающую максимальную эффективность в широком диапазоне углов дифракции и позволяющую использовать каждое кольцо-детектор также для широкого диапазона углов. Разрешение модельного дифрактометра на углах рассеяния 2θ от 20° до 150° составляет 2-7,7% (рис. 5, б). При этом существенную долю составляет погрешность, вносимая длительностью нейтронного импульса, которая может быть уменьшена путем увеличения пролетной базы проектируемой установки.

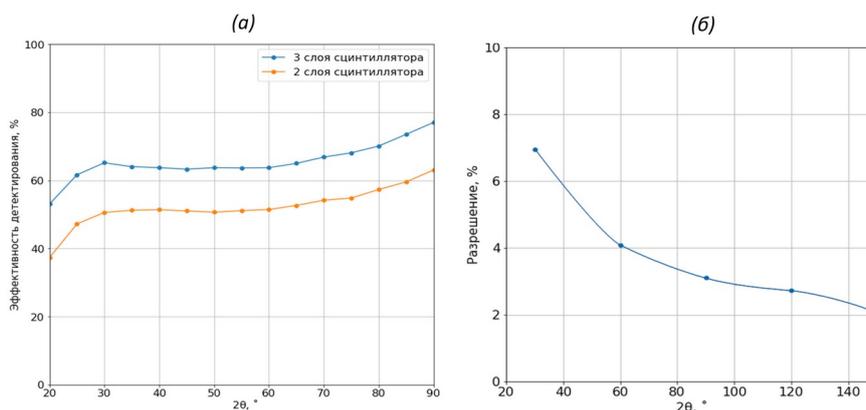


Рисунок 5 - Эффективность регистрации нейтронов счетчиками с двумя и тремя слоями детектирующих слоев при различных углах рассеяния нейтронов 2θ (а), разрешающая способность нейтронного счетчика как функция угла рассеяния $30^\circ < 2\theta < 150^\circ$ (б)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.29.5>

Еще одним фактором, влияющим на разрешение дифрактометра является угловой размер образца. Это дает возможность повысить разрешение ценой интенсивности поступающих на счетчик нейтронов, увеличив расстояние образец-детектор. Благодаря подвижным несущим кольцам блок детекторов может работать в конфигурациях подобных рисунку 6, а. Кольцевой детектор, регистрирующий рассеяние под углом 30° , выносится вдоль оси пучка за исходную сферическую поверхность ($R1 = 30$ см), образуя «конус» повышенного разрешения на расстоянии $R2 = 50$ см от образца. На рисунке 6, б изображено сравнение модельных брэгговских пиков в стандартной сферической и конусообразной конфигурации, при этом улучшение разрешающей способности составляет порядка 1%. Смещение пиков на модельных спектрах обусловлено различным расстоянием образец-детектор и связанным с этим изменением разрешением. Ошибка в определении межплоскостных расстояний составит 7% для 30 см, и 6% для 50 см.

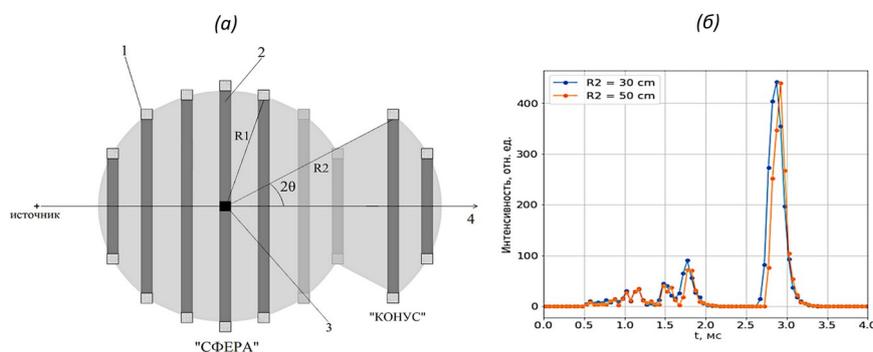


Рисунок 6 - Схема блока детекторов в конфигурации с кольцевыми детекторами под углом 30° с увеличенным до 50 см расстоянием образец-детектор (а), времяпролетные спектры, зарегистрированные кольцевыми детекторами под углом 30° при стандартном расстоянии образец-детектор 30 см (синий) и в конфигурации блока детекторов с увеличенным до 50 см расстоянием образец-детектор (оранжевый) (б)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.29.6>

Примечание: 1 – образец, 2 – кольцо детектора, 3 – кольцевой нейтронный детектор, 4 – ось пучка

Из результатов моделирования получены рекомендации по проектированию геометрии установки, а именно:

1. Следует использовать трехслойные детекторы при любых углах рассеяния для увеличения эффективности регистрации нейтронов (65% для двухслойных, 78% для 3-х слойных);
2. Оптимальный радиус сферы – 300 мм. При ширине счетчиков нейтронов 5 мм это позволит сэкономить дорогостоящий материал сцинтиллятора;
3. Оптимальная ширина счетчиков нейтронов, образующих кольцевые детекторы, составляет 5 мм;
4. Для достижения максимальной эффективности ориентация счетчиков нейтронов, находящихся на углах рассеяния $2\theta < 20^\circ$ и $2\theta > 160^\circ$, должна соответствовать перпендикулярному расположению плоскостей детектирующих слоев относительно оси подаваемого на образец нейтронного пучка. Планируется изготовить детектирующие кольца с такой ориентацией счетчиков для обратного рассеяния и рассеяния на малые углы;
5. При углах рассеяния менее 30° следует увеличить расстояние образец-детектор до 500 мм, чтобы улучшить разрешение.

Заключение

Разработан и создан многофункциональный дифрактометр СФЕРА с возможностью регистрации нейтронов в диапазоне углов от 6 до 174 градусов. Также за счет размещения детекторов на кольце по окружности возможно определение текстуры образца. Если определение текстуры не требуется, возможно суммировать показания детекторов с одного кольца, тем самым увеличивая телесный угол захвата нейтронов и уменьшая время проведения эксперимента. На рисунке 7 представлены фотографии дифрактометра.



Рисунок 7 - Внешний вид дифрактометра СФЕРА
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.29.7>

Разработана электроника для обработки сигналов с нейтронного детектора, а также универсальная электроника для накопления данных, которая позволяет использовать данный дифрактометр как на импульсном нейтронном пучке, так и на монохроматическом.

Проведено моделирование параметров детектора, разрешение дифрактометра на углах рассеяния 2θ от 20° до 150° составляет 2-7,7%.

В дальнейшем планируется монтаж и использование дифрактометра на времяпролетном нейтронном источнике «РАДЭКС» в ИЯИ РАН.

Финансирование

Результаты получены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования по проекту «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа», соглашение №075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The results were obtained with the financial support of the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education under the project “Development and Creation of Elements of Experimental Stations on Pulsed or Constant Type Neutron Sources”, agreement No. 075-10-2021-115 dated October 13, 2021 (internal number 15.SYN.21.0021).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Ковальчук М.В. Исследовательский реактор ПИК / М.В. Ковальчук, С.Л. Смольский, К.А. Коноплев // Кристаллография. — 2021. — № 2. — С. 184-190. — DOI: 10.31857/S0023476121020053.

2. Ковальчук М.В. Импульсный нейтронный источник на основе испарительно-скалывающей реакции на базе протонного синхротрона У-1.5 / М.В. Ковальчук, Н.Е. Тюрин, С.В. Иванов и др. // Кристаллография. — 2022. — № 5. — С. 795-800. — DOI: 10.31857/S0023476122050101.
3. Кулевой Т.В. Компактный источник нейтронов DARIA / Т.В. Кулевой // Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2023: Сборник научных трудов IX Международной конференции. — Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2023. — С. 276.
4. Stoykov A. Evaluation of a ZnS: 6 LiF Based Scintillation Neutron Detector at High Counting Rates / A. Stoykov, J.-B. Mosset, M. Hildebrandt // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — № 936. — P. 34-35. — DOI: 10.1016/j.nima.2018.10.183.
5. Kolesnikov S.V. Characteristics of ZnS(Ag) + 6LiF Scintillator-Based Detector Used as a Neutron Dosimeter / S.V. Kolesnikov, A.P. Denisenko, E.V. Ryabeva // At Energy. — 2023. — № 133. — P. 212-216. — DOI: 10.1007/s10512-023-00998-1.
6. Марин В.Н. Кольцевой детектор нейтронов для времяпролетного дифрактометра, состоящий из линейных сцинтилляционных детекторов на основе кремниевых фотоумножителей / В.Н. Марин, Р.А. Садыков, Д.Н. Трунов // Приборы и техника эксперимента. — 2018. — № 1. — С. 5-12. — DOI: 10.7868/S003281621801007X.
7. Trunov D.N. Multilayer High-Performance Neutron Scintillation Counter Based on SiPM and an Organic Light Guide / D.N. Trunov, V.N. Marin, R.A. Sadykov // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2022. — № 5. — P. 826-830. — DOI: 10.1134/s102745102205038x.
8. Пат. 2796123 Российская Федерация, МПК G01N 23/20. Широкодиапазонный кольцевой времяпролетный дифрактометр нейтронов с регулируемым разрешением / Д.Н. Трунов, В.Н. Марин, В.С. Литвин и др.; заявитель и патентообладатель Институт ядерных исследований Российской академии наук. — №2022134284; заявл. 26.12.22; опубл. 17.05.23, Бюл. №14. — 7 с.
9. Пат. 2782417 Российская Федерация, МПК G01T 1/208. Устройство для регистрации излучения / Д.Н. Трунов, В.Н. Марин, Е.В. Алтынбаев; заявитель и патентообладатель Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт". — №2022105038; заявл. 25.11.21; опубл. 26.10.22, Бюл. №30. — 9 с.
10. Пат. 2022664139 Российская Федерация. Программа модуля микроконтроллера для управления и настройки предусилителей детектора СФЕРА (Sphere detector control) / Д.Н. Трунов; заявитель и патентообладатель Институт ядерных исследований Российской академии наук. — №2022663133; заявл. 12.07.22; опубл. 25.07.22, Бюл. №8.
11. Пат. 2022664140 Российская Федерация. Программа ПЛИС модуля для регистрации и накопления импульсов с детекторов ионизирующих излучений (Fast impulse counts 16) / Д.Н. Трунов; заявитель и патентообладатель Институт ядерных исследований Российской академии наук. — №2022663134; заявл. 12.07.22; опубл. 25.07.22, Бюл. №8.
12. Бучный Д.А. Моделирование эффективности и разрешения регистрации нейтронов сцинтилляционным счетчиком на базе ZnS(Ag):6LiF / Д.А. Бучный, В.С. Литвин, Д.Н. Трунов и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2022. — № 12. — С. 38-47. — DOI: 10.31857/S1028096022120081.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Koval'chuk M.V. Issledovatel'skij reaktor PIK [PIK Research Reactor] / M.V. Koval'chuk, S.L. Smol'skij, K.A. Konoplev // Kristallografija [Crystallography Reports]. — 2021. — № 2. — P. 184-190. — DOI: 10.31857/S0023476121020053. [in Russian]
2. Koval'chuk M.V. Impul'snyj nejtronnyj istochnik na osnove isparitel'no-skalyvajuschej reaktsii na baze protonnogo sinhrotrona U-1.5 [Pulsed Neutron Source Based on the Evaporation-cleavage Reaction Based on the U-1.5 Proton Synchrotron] / M.V. Koval'chuk, N.E. Tjurin, S.V. Ivanov et al. // Kristallografija [Crystallography Reports]. — 2022. — № 5. — P. 795-800. — DOI: 10.31857/S0023476122050101. [in Russian]
3. Kulevoj T.V. Kompaktnyj istochnik nejtronov DARIA [Compact Neutron Source DARIA] / T.V. Kulevoj // Lazernye, plazmennye issledovaniya i tekhnologii – LaPlaz-2023: Sbornik nauchnyh trudov IX Mezhdunarodnoj konferencii [Laser, Plasma Research and Technology – LaPlaz-2023: Collection of scientific papers of the IX International Conference]. — Moscow: National Research Nuclear University "MIFI", 2023. — P. 276. [in Russian]
4. Stoykov A. Evaluation of a ZnS: 6 LiF Based Scintillation Neutron Detector at High Counting Rates / A. Stoykov, J.-B. Mosset, M. Hildebrandt // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — № 936. — P. 34-35. — DOI: 10.1016/j.nima.2018.10.183.
5. Kolesnikov S.V. Characteristics of ZnS(Ag) + 6LiF Scintillator-Based Detector Used as a Neutron Dosimeter / S.V. Kolesnikov, A.P. Denisenko, E.V. Ryabeva // At Energy. — 2023. — № 133. — P. 212-216. — DOI: 10.1007/s10512-023-00998-1.
6. Marin V.N. Kol'tsevoj detektor nejtronov dlja vremjaproletnogo difraktometra, sostojaschij iz linejnyh stsintilljatsionnyh detektorov na osnove kremnievyh fotoumnozhitel'ej [Ring Neutron Detector for a Time-of-flight Diffractometer, Consisting of Linear Scintillation Detectors Based on Silicon Photomultipliers] / V.N. Marin, R.A. Sadykov, D.N. Trunov // Pribory i tehnika jeksperimenta [Instruments and Experimental Techniques]. — 2018. — № 1. — P. 5-12. — DOI: 10.7868/S003281621801007X. [in Russian]
7. Trunov D.N. Multilayer High-Performance Neutron Scintillation Counter Based on SiPM and an Organic Light Guide / D.N. Trunov, V.N. Marin, R.A. Sadykov // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2022. — № 5. — P. 826-830. — DOI: 10.1134/s102745102205038x.
8. Pat. 2796123 Russian Federation, IPC G01N 23/20. Shirokodiapazonnyj kol'tsevoj vremjaproletnyj difraktometr nejtronov s reguliruемым razresheniem [Wide-range Ring Time-of-flight Neutron Diffractometer with Adjustable

Eesolution] / D.N. Trunov, V.N. Marin, V.S. Litvin et al.; applicant and patentee Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. — №2022134284; appl. 26.12.22; publ. 17.05.23, Bul. 14. — 7 p. [in Russian]

9. Pat. 2782417 Russian Federation, IPC G01T 1/208. Ustrojstvo dlja registratsii izluchenija [Device for Detecting Radiation] / D.N. Trunov, V.N. Marin, E.V. Altynbayev; applicant and patentee B.P. Konstantinov St. Petersburg Institute of Nuclear Physics of the National Research Center "Kurchatov Institute". — №2022105038; appl. 25.11.21; publ. 26.10.22, Bul. №30. — 9 p. [in Russian]

10. Pat. 022664139 Russian Federation. Programma modulya mikrokontrollera dlya upravleniya i nastrojki predusilitelej detektora SFERA (Sphere detector control) [Microcontroller Module Program for Controlling and Configuring Preamplifiers of the Sphere Detector Control] / D.N. Trunov; applicant and patentee Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. — №2022663133; appl. 12.07.22; publ. 25.07.22, Bul. №8. [in Russian]

11. Pat. 2022664140 Russian Federation. Programma PLIS modulya dlya registratsii i nakopleniya impul'sov s detektorov ioniziruyushchih izluchenij (Fast impulse counts 16) [FPGA Module Program for Recording and Accumulating Impulses from Ionizing Radiation Detectors (Fast impulse counts 16)] / D.N. Trunov; applicant and patentee Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences. — №2022663134; appl. 12.07.22; publ. 25.07.22, Bul. №8. [in Russian]

12. Buchnyj D.A. Modelirovanie effektivnosti i razresheniya registratsii nejtronov stsintilljatsionnym schetchikom na baze ZnS(Ag):6LiF [Modeling the Efficiency and Resolution of Neutron Registration with a Scintillation Counter Based on ZnS(Ag):6LiF] / D.A. Buchnyj, V.S. Litvin, D.N. Trunov et al. // Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya [Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques]. — 2022. — № 12. — P. 38-47. — DOI: 10.31857/S1028096022120081. [in Russian]