

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

© 2026 г. П. В. Зубарев^а, А. Н. Квашнин^а, В. В. Поросев^{а, б, *}, С. Ю. Таскаев^{а, б},
В. А. Хильченко^а, С. В. Щукин^а

^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^б Новосибирский государственный университет
Российская Федерация, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

* E-mail: porosev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 07.11.2025

После доработки 08.11.2025

Принята к публикации 13.01.2026

С появлением источников нейтронов на базе ускорителей для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) возникла необходимость создания независимой системы измерения генерируемого потока частиц. Для этой цели в ИЯФ СО РАН был разработан быстрый детектор нейтронов на базе сцинтиллятор-оптоволоконно-микروпиксельный лавинный фотодиод, использующий три различных датчика, что позволяет измерять поток нейтронов, а также оценивать локальную дозу, наведенную гамма-излучением. Система детектирования оптических сигналов на основе кремниевых фотоумножителей обладает высокой квантовой эффективностью, а применение счетного режима регистрации событий позволило достичь уровня собственных шумов порядка нескольких десятков отсчетов в секунду. При этом счетная характеристика электроники регистрации хорошо описывается непродлевающим мертвым временем 24.6 ± 0.1 нс, что позволяет регистрировать события с минимальными просчетами даже при высокой загрузке детектора.

DOI: 10.7868/S3034564226020039

1. ВВЕДЕНИЕ

Бор-нейтронозахватная терапия представляет собой метод избирательного уничтожения клеток злокачественных опухолей посредством облучения их тепловыми и эпитепловыми нейтронами, при котором в опухолевых клетках предварительно накапливается бор — ^{10}B . Тепловые нейтроны взаимодействуют с ^{10}B и приводят к гибели этих клеток за счет большого локального энерговыделения образующихся α -частиц и ядер ^7Li . При этом вследствие малого пробега образующихся частиц, окружающие нормальные клетки получают минимальные повреждения. Для исследования методики БНЗТ в Институте ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера был создан ускорительный источник нейтронов ВИТА, который состоит из электростатического tandemного ускорителя заряженных частиц, литиевой нейтроногенерирующей мишени

и системы формирования потока эпитепловых нейтронов [1]. Высокая планируемая интенсивность разрабатываемых ускорительных источников нейтронов привела к необходимости создания нового поколения сопутствующего диагностического оборудования. В частности, ожидаемый поток генерируемых эпитепловых нейтронов составляет около 10^9 н/(см²·с) [2].

Для контроля стабильности параметров ускорителя в ИЯФ СО РАН был разработан быстрый детектор нейтронов (БДН). Датчики данного детектора, каждый из которых содержит три независимых оптических канала регистрации, имеют одинаковую конструкцию. Первый канал основан на сцинтилляторе СЦ-331 с бором, второй на основе сцинтиллятора СЦ-301 без бора и третий — оптоволоконно без сцинтиллятора. Сцинтилляторы на основе полистирола имеют время высвечивания около 2 нс и изготавливаются в Институте физики высоких энер-

гий ИФВЭ, г. Протвино [3]. Чувствительный элемент датчика представляет собой цилиндр диаметром 1 мм и длиной 1 мм. Малый размер сцинтилляторов позволяет уменьшить регистрируемый поток до уровня нескольких миллионов событий в секунду. Свет от сцинтилляторов передается по кварцевым световодам к считывающей электронике, а регистрация оптических импульсов осуществляется с помощью охлаждаемых микропиксельных лавинных фотодиодов (SiPM) AFBR-S4K33C0135L (Broadcom). Сигнал с выхода SiPM усиливается и поступает на входы компараторов и далее попадает на счетчики импульсов. Число зарегистрированных событий за 10 мс передается в компьютер для дальнейшей обработки. Разница в отсчетах датчиков с бором и без бора позволяет оценить вклад нейтронной компоненты, а разность отсчетов в канале детектора без бора и числа событий, зарегистрированных в канале без сцинтиллятора, дает сигнал, пропорциональный дозе гамма-излучения в точке измерения, поскольку позволяет исключить вклад черенковского излучения, образующегося в оптоволокне.

2. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ

Первая версия системы регистрации детектора была разработана на основе специализированных микросхем для работы с микропиксельными лавинными фотодиодами OMEGA EASIROC (в новой версии CITIROC) [4]. Несмотря на успешное применение данного детектора для измерения параметров, генерируемого на установке потока нейтронов [5], система обладала рядом существенных недостатков. В частности, интегральное исполнение схемы аналогового формирования импульсов не учитывает характеристик подключаемых к ее входам микропиксельных лавинных фотодиодов, что приводит к неоптимальному формированию импульсов, к искажению импульсов больших амплитуд и, как следствие, к формированию большого мертвого времени — не менее 50 нс. Кроме того, эти микросхемы в настоящее время коммерчески не доступны. На рис. 1 показаны характерные формы импульсов на выходе биполярного формирователя микросхемы CITIROC. Для устранения перечисленных выше недостатков была разработана новая версия системы регистрации, в которой используется формирование импульсов с замещением

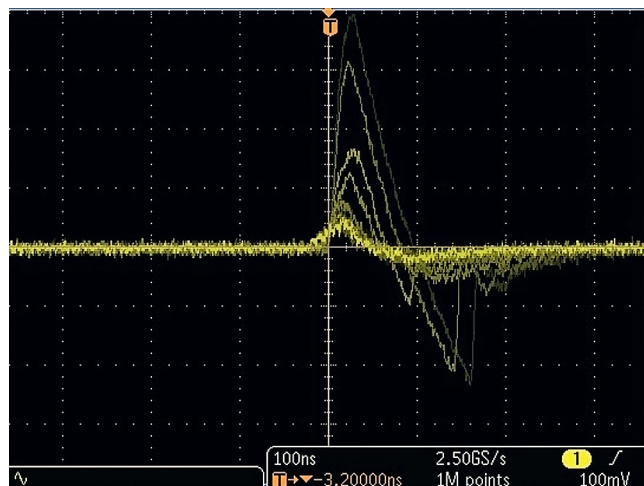


Рис. 1. Форма импульса на выходе биполярного формирователя микросхемы CITIROC

константы времени, обусловленной временем перезарядки ячеек микропиксельного лавинного фотодиода около 40 нс, меньшим по величине значением, равным примерно 15 нс. На рис. 2 показан фрагмент блок-схемы системы регистрации, а на рис. 3 — характерная форма импульса до и после усилителя-формирователя. Применение схемы активного восстановления постоянной составляющей и пассивного формирования однополярных импульсов с помощью цепочки $R - LR$ позволило существенно повысить быстродействие регистрирующей электроники. Наличие двух компараторов, подключенных к выходу формирователя в каждом канале, позволяет выбрать порог регистрации, зависящий от подключенного к данному каналу типа сцинтиллятора.

Эффективная ширина импульса определяет мертвое время системы регистрации, которое приводит к тому, что измеренные скорости счета импульсов будут ниже реальных. Это искажает статистические распределения зарегистрированных событий. Тем не менее истинная скорость счета может быть восстановлена при известных параметрах системы. Измеренная скорость счета R определяется по формуле $R = N \exp(-N\tau)$ для системы с продлевающим мертвым временем τ , входным (истинным) потоком N и по формуле $R = N/(1 + N\tau)$ для системы с непродлевающим мертвым временем.

Для определения типа системы используется тот факт, что форма распределения интервалов времени между зарегистрированными импульсами для этих двух случаев различается [6]. Так, плотность вероятности распределения интер-

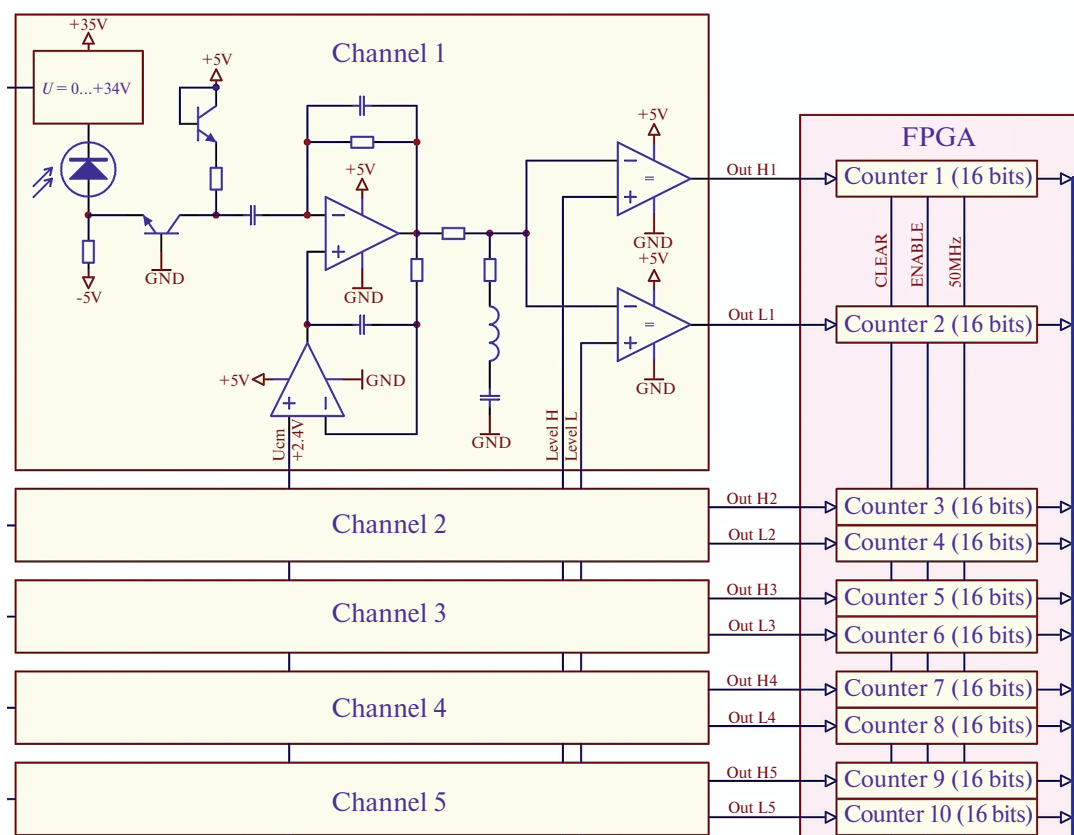


Рис. 2. Фрагмент блок-схемы аналоговой обработки сигнала детектора БДН

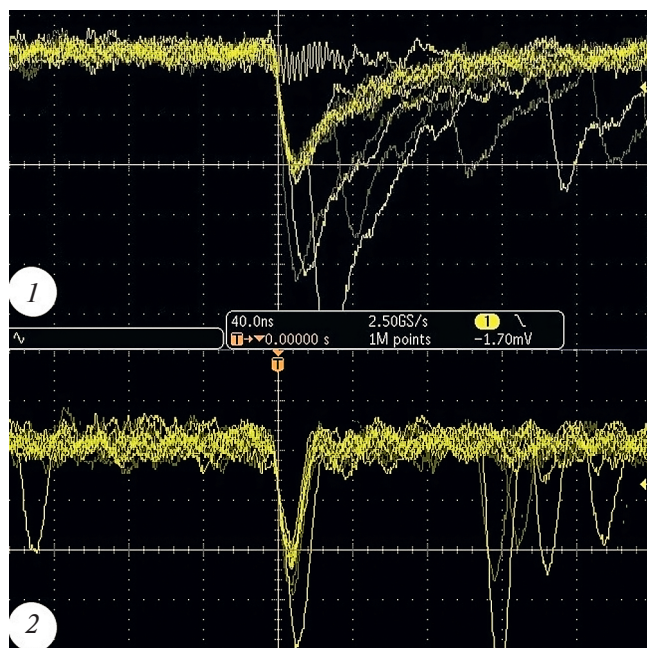


Рис. 3. Форма импульса до (1) и после (2) схемы формирования детектора БДН

валов для непродлевающего мертвого времени описывается простой формулой:

$$f(t) = \theta(t - \tau) N e^{-N(t-\tau)},$$

в то время как для продлевающего мертвого времени она описывается более сложным выражением [7, 8]

$$f(t) = N \sum_{j=1}^{\infty} \theta(t - j\tau) \frac{(-N(t - j\tau))^{j-1}}{(j-1)!} e^{-jN\tau}$$

и имеет характерное искажение формы в максимуме распределения.

3. МЕРТВОЕ ВРЕМЯ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ

Определение величины мертвого времени системы регистрации проводилось в процессе облучения датчиков на ускорительном источнике нейтронов и при облучении рентгеновским излучением. При облучении нейтронами максимальный поток событий составлял примерно $4 \cdot 10^5$ отсчетов в секунду, что определялось параметрами действующего ускорителя. Для достижения больших по величине регистрируемых потоков использовалась рентгеновская трубка при напряжении 95 кВ и установленном добавочном фильтре Си толщиной 0.3 мм. В процессе измерения с помощью цифрового осциллографа Tektronix DPO3032 проводилась запись

осциллограмм на выходе компараторов с шагом по времени 2 нс и длиной выборки 1 000 000 точек при различной интенсивности облучения детектора. На основе полученных данных формировались гистограммы распределений интервалов между событиями и их аппроксимация аналитическими выражениями, откуда определялось мертвое время системы и величина входного потока. Пример такого распределения представлен на рис. 4. На этом же рисунке показаны результаты аппроксимации экспериментальных данных аналитическими выражениями для двух типов мертвого времени — продлевающего и непродлевающего. На рисунке видно, что в распределениях интервалов между событиями мы не наблюдаем характерного плато в интервале от τ до 2τ , которое должна присутствовать в распределениях для систем с продлевающим мертвым временем. Среднее значение непродлевающего мертвого времени, полученное из эксперимента, составляет 24.6 ± 0.1 нс. На рис. 5 представлена зависимость скорости счета детектора БДН от величины входного потока. Для сравнения представлены данные для “идеального” детектора и результаты аппроксимации экспериментальных данных формулой, описывающей счетную характеристику детектора с непродлевающим мертвым временем, равным

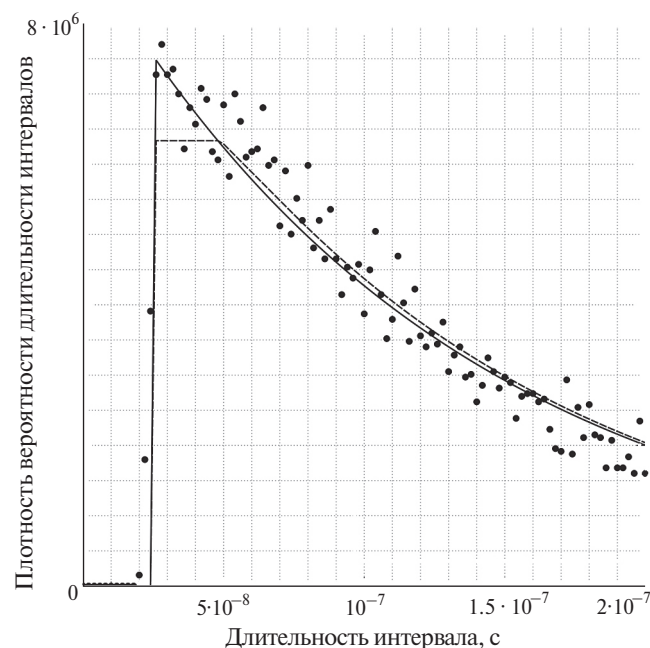


Рис. 4. Распределение интервалов времени между событиями (точки) и результат аппроксимации данных выражениями для непродлевающего (штриховая кривая) и продлевающего (сплошная кривая) мертвого времени

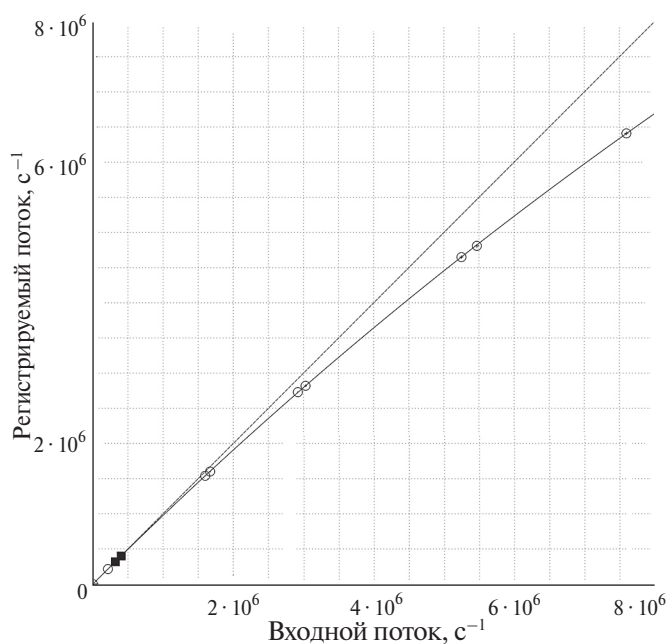


Рис. 5. Зависимость скорости счета детектора от входной загрузки для идеального детектора без просчетов (штриховая линия) и детектора БДН (сплошная линия). Показаны результаты изменений с нейтронами (черные квадраты) и рентгеновскими фотонами (кружки)

24.6 нс. Сравнительный анализ показывает, что просчеты электроники не превышают 20 % при входном потоке до 10^7 отсчетов в секунду и то, что для восстановления величины “истинного” потока достаточно скорректировать измеренные значения, основываясь на величине мертвого времени.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты измерения быстродействия новой системы регистрации быстрого детектора нейтронов, который планируется использовать на ускорительном источнике нейтронов ВИТА в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина. Реализация схемы формирования импульсов с учетом времени перезарядки ячеек микропиксельных лавинных фотодиодов позволила существенно повысить быстродействие регистрирующей электроники, по сравнению с использованным ранее аналогом на основе специализированных микросхем. На основе измерений, проведенных на действующей установке в ИЯФ СО РАН, распределения интервалов между импульсами хорошо описываются непродлевающим мертвым временем 24.6 ± 0.1 нс, что позволяет регистрировать

события с минимальными просчетами даже при высокой интенсивности входных событий и использовать это значение для восстановления величины “истинного” потока событий на детектор.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M. et al.* Biology. 2021. V. 10. № 5. P. 350.
<https://doi.org/10.3390/biology10050350>
2. International Atomic Energy Agency. Advances in Boron Neutron Capture Therapy. Non-serial Publications. IAEA, Vienna. 2023.
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CRCP-BOR-002_web.pdf
3. *Бритвич Г.И., Васильченко В.Г., Гилицкий Ю.В. и др.* ПТЭ. 2004. № 5. С. 5.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17757053> [Britvich G.I., Vasil'chenko V.G., Gilitsky Yu.V. et al. IET. 2004. № 47. P. 571.
<https://doi.org/10.1023/B:INET.0000043862.12092.b0>].
4. *Bykov T.A., Kasatov D.A., Koshkarev A.M., Makarov A.N., Porosev V.V., Savinov G.A., Shchudlo I.M., Taskaev S.Yu.* J. Instrum. 2019. V. 14. P. P12002.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/12/P12002>
5. *Bykov T.A., Kasatov D.A., Koshkarev A.M. et al.* J. Instrum. 2021. V. 16. P. P10016.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/10/P10016>
6. *Müller J.W.* Nucl. Instrum. Meth. 1973. V. 112. № 1-2. P. 47.
[https://doi.org/10.1016/0029-554X\(73\)90773-8](https://doi.org/10.1016/0029-554X(73)90773-8)
7. *Pomme S., Denecke B., Alzetta J.-P.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 1999. V. 426. P. 564.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00016-9)
8. *Pomme S.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 1999. V. 437. P. 481.
[https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(99\)00791-3](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(99)00791-3)