

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

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.130>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА СВЕТОВОДА НА ПАРАМЕТРЫ СВЕТОСБОРА В
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРАХ НЕЙТРОНОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ДИФРАКЦИОННЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Научная статья

Трунов Д.Н.^{1,*}, Марин В.Н.², Садыков Р.А.³, Алтынбаев Е.В.⁴

¹ ORCID : 0000-0002-1966-083X;

³ ORCID : 0000-0002-3986-0994;

⁴ ORCID : 0000-0003-0148-0598;

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

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

⁴ Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Аннотация

Проведено сравнительное исследование влияния типа световода в сцинтилляционных детекторах нейтронов на параметры транспортировки фотонов. Для исследования был выбран прозрачный световод на основе PMMA и световод на основе полистирола со спектросмещающими добавками (PS + 1% pTP + 0,1% 3-HF). Также проведено исследование влияния использования сверхширокоугольной линзы с целенаправленно увеличенной дисторсией на количество фотонов. Показано, что световыход детектора со световодом на основе PMMA со съемом света в торцах более чем в 4 раза больше, чем для детектора на основе WLS. Для детекторов с линзами типа «рыбий глаз» световыход отличается более чем в 13 раз. Дополнительно проведено моделирование оптических параметров и получено ограничение на максимальную длину детекторов с оптически прозрачным световодом.

Ключевые слова: детекторы нейтронов, сцинтиллятор, спектросмещающие волокна, кремниевый фотоумножитель.

STUDY OF THE INFLUENCE OF LIGHT GUIDE TYPE ON LIGHT COLLECTION PARAMETERS IN
SCINTILLATION NEUTRON DETECTORS USED FOR DIFFRACTION EXPERIMENTS

Research article

Trunov D.N.^{1,*}, Marin V.N.², Sadikov R.A.³, Altynbaev E.V.⁴

¹ ORCID : 0000-0002-1966-083X;

³ ORCID : 0000-0002-3986-0994;

⁴ ORCID : 0000-0003-0148-0598;

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

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

⁴ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation

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

Abstract

A comparative study of the influence of the light guide type in neutron scintillation detectors on photon transport parameters has been carried out. A transparent PMMA-based light guide and a polystyrene-based light guide with spectroscopic additives (PS + 1% pTP + 0.1% 3-HF) were selected for the research. The effect of using an ultra-wide angle lens with purposely increased distortion on the number of photons was also examined. It is shown that the light output of the detector with PMMA-based light guide with light removal at the ends is more than 4 times higher than for the detector based on WLS. For detectors with "fisheye" lenses, the light output differs more than 13 times. In addition, modelling of optical parameters was carried out and a limit on the maximum length of detectors with optically transparent light guide was obtained.

Keywords: neutron detectors, scintillator, spectroscopic fibres, silicon photomultiplier.

Введение

В настоящее время сцинтилляционные детекторы нейтронов находят широкое применение в различных дифракционных установках в качестве замены для классических детекторов на основе гелий-3. Принцип работы сцинтилляционных детекторов основан на конвертации нейтрона в оптическое излучение различными сцинтилляторами, например ZnS(Ag):⁶LiF,ZnS(Ag):B₂O₃ и др. В свою очередь, фотоны, излучаемые сцинтиллятором, требуется транспортировать до детекторов фотонов, в качестве которого может использоваться Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) или Кремниевый фотоумножитель (SiPM).

Исторически сложилось, что наиболее широкое применение сцинтилляционные детекторы нейтронов нашли в области физики высоких энергий [1]. К ним предъявляются требования по большой чувствительной площади, и единственным вариантом съема и транспортировки фотонов с больших площадей сцинтиллятора является использование спектросмещающих волокон(WLS) [1], либо размещения сцинтиллятора в прямой видимости от фотоприемника [2].

Для детекторов, используемых при дифракционных измерениях, предъявляются другие требования. Одно из требований – компактные размеры, которые необходимы для достижения высокого углового разрешения. Также от них требуется высокая загрузочная способность, так как плотность потока нейтронов на образце достигает 10^{15} см²×с⁻¹ и выше [3], а также требуется высокая эффективность регистрации тепловых нейтронов, которая позволяет уменьшить время проведения эксперимента. Из-за высокой эффективности регистрации тепловых нейтронов при большом размере детектора также может возникнуть ситуация, когда станет невозможно разделять события регистрации нейтронов близкие по времени, т.к. типичное время высвечивания сцинтиллятора при регистрации нейтрона около 300 нм, но при этом имеет и более длительные компоненты [4].

Дифракция нейтронов на образце образует кольца Дебая-Шеррера, и, в идеальном случае, детекторы должны размещаться вертикально по радиусу кольца от образца. Это нужно для сохранения одинакового расстояния образец-детектор, которое влияет на разрешения дифракционной установки. Таким образом, детекторы для дифракции должны одновременно иметь небольшую ширину, чтобы можно было добиться высокого пространственного разрешения, и одновременно с этим небольшую длину, чтобы исключить ухудшение разрешения за счет сильного различия расстояния образец-детектор и не вызывать перегрузку из-за высокой эффективности.

При проектировании сцинтилляционных детекторов важно учитывать теорему Лиувилля о сохранении фазового объема. В случае оптических систем она отвечает на вопрос о том, сколько света будет потеряно на согласовании размеров фотоприёмника и световода [5]. Если поверхность фотодетектора меньше световода, то количество света попадающего на фотодетектор, уменьшается в соотношении площади этих поверхностей. Из-за этого эффективность сбора света может быть очень низкой, если небольшой фотодетектор считывает большой лист сцинтилляционного материала [6].

В дифракционных экспериментах типичный диапазон размеров детекторов – ширина 3-10 мм, длина 50-150 мм. В данном случае использование WLS для сбора света приводит только к усложнению конструкции детектора — так как ширина детектора соответствует размерам SiPM, а количество фотонов, достигаемых торцов световода на длине световода до 200 мм достаточно, чтобы достоверно зарегистрировать событие. Также, что немаловажно, квантовая эффективность приемника зависит от длины волны. Для большинства SiPM максимальная квантовая эффективность (PDE) достигается для фотонов ~450 нм. Например, для SiPM SensL и NDL PDE (для 450 нм) равна 40%, а при длине ~500 нм (что соответствует длине переизлучения WLS) составляет 30% [7]. Таким образом, за счет отсутствия сдвига длины волны компактные детекторы на основе прозрачного световода и кремниевого фотоумножителя имеют большую эффективность регистрации фотонов.

При исследованиях с помощью нейтронов достаточно часто используются различные устройства, создающие сильное магнитное поле, например спин-флипперы [8] и устройства создания магнитного поля на образце [9]. В свою очередь, SiPM нечувствительны к магнитному полю [10], (в отличие от ФЭУ [11]), что определяет их использование в магнитных полях.

Таким образом, в нейтронных детекторах для дифракционных измерений отказ от световода на основе WLS позволит, во-первых, увеличить количество фотонов, достигающих торцов световода, а также увеличить эффективность регистрации фотонов за счет отсутствия переизлучения. Одновременно с этим за счет близких размеров контактного пятна световода и SiPM можно согласовать размеры и исключить потери света при согласовании размеров световода и фотоприемника. За счет большего количества фотонов становится возможно увеличить эффективность регистрации, используя сцинтиллятор большой толщины, на котором меньше световых выходов [12]. Что немаловажно, отсутствие WLS и крепление SiPM на световоде позволит упростить конструкцию и уменьшить габариты детектора.

Целью работы стояла задача сравнить световоды из прозрачного пластика и WLS, а также влияние на параметры транспортировки фотонов сверхширокоугольной линзы с целенаправленно увеличенной дисторсией («рыбий глаз»). Дополнительно поставлена задача определить максимальную длину сцинтилляционного детектора на основе прозрачного световода.

Описание исследуемых детекторов

Для исследования параметров транспортировки фотонов было проведено сравнительное тестирование детекторов, которые имеют одинаковую геометрию, но различный тип световода. Особенность кремниевых фотоумножителей в том, что на выходе образуется сигнал, пропорциональный числу одновременно «сработавших» ячеек, а следовательно, и фотонов [13]. Таким образом, измерение сигнала (осциллограммы) получаемого сигнала позволит сравнить количество фотонов, получаемых со световода (в случае использования трансимпедансного усилителя (TIA), в котором напряжение на выходе прямо пропорционально току на инвертирующем входе [14]).

Для этих целей были подготовлены 4 детектора: размеры световода 5x5x60 мм, 1 слой сцинтиллятора ZnS (Ag): ⁶LiF размером 5x50 мм и толщиной 0.45мм. В двух детекторах световод изготовлен из прозрачного PMMA пластика прозрачностью 92%, регистрация фотонов происходит с помощью двух кремниевых фотоумножителей EQR1511-3030D-S с размером активной области 3x3 мм. На одном детекторе кремниевые фотоумножители располагались в торцах световода (DET1), на втором (DET2) сбор света осуществлялся линзой типа «рыбий глаз». Два других детектора (без линзы DET3, с линзой DET4) имели световод на основе полистирола (PS + 1% pTP + 0,1% 3-HF) с длиной волны максимальной эмиссии около 520-530 нм. На рисунке 1 приведен внешний вид световодов, полученных после механической обработки.



Рисунок 1 - Внешний вид световода после механической обработки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.130.1>

В дальнейшем происходила химическая полировка световодов парами дихлорэтана с последующей сушкой в течение 24 часов. После окончания подготовки световодов произведена клейка сцинтиллятора и кремниевых фотоумножителей клеем типа оптический цемент (EJ-500) с сушкой в вакууме при давлении не более 5 мбар в течение 24 часов при комнатной температуре. Клей EJ-500 использовался также для заполнения объема линзы типа «рыбий глаз». После завершения сушки происходила пайка проводов от кремниевого фотоумножителя и покрытие световода лентой из Политетрафторэтилена (PTFE или ФУМ лента) толщиной 0.2 мм в 3 слоя с последующим покрытием черной непрозрачной термоусадочной трубкой для защиты от внешнего света. Торцы термоусадочной трубки заполнялись полиамидным черным герметиком. Внешний вид детекторов показан на рисунке 2.



Рисунок 2 - Внешний вид собранных детекторов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.130.2>

Схема проведения исследования

В детекторах используется SiPM EQR1511-3030D-S который имеет, в частности, меньший коэффициент усиления (~в 15 раз) чем используемый нами ранее [15]. Это потребовало внести изменения в схему предусилителя. В частности, изменено сопротивление R для увеличения коэффициента усиления. Напряжение питания предусилителя +6 В и -6 В, напряжение SiPM – 28.8 В + Vb (Vb=7.2 В).

Для записи сигналов, получаемых с кремниевых фотоумножителей, использован диджитайзер CAEN DT5720 с разработанной программой для анализа и накопления спектров. Сигналы снимались независимо от каждого кремниевого фотоумножителя. Также дополнительно разработана программа для обработки массивов получаемых данных, анализа сигналов (в том числе амплитудно-широтного анализа(PSD)), расчета интеграла, построения гистограмм и графиков. Исследование детекторов производилось попарно: DET1-DET3 и DET2-DET4. В качестве источника нейтронов использован источник на основе радионуклида калифорний-252 тип НК252М11. Источник размещался на равном расстоянии от детекторов. Перед и после детектора размещался полиэтиленовый блок NEUTROSTOP C0.

Определение шума каналов

В первую очередь были определены уровни шума детекторов. Уровень шума детектора складывается из шума кремниевого фотоумножителя и шума электроники. Шум кремниевого фотоумножителя в основном зависит от скорости темного счёта (Dark current rate – DCR). Она определяется как скорость счёта на уровне одного фотона, которая создается тепловой генерацией электронов в активной области кремния, а не за счёт падающего на SiPM источника света [16]. Также возможно влияние эффекта кросс-ток (crosstalk) и послеимпульсов (afterpulsing), но они не вносят большого влияния в тепловой шум и ими можно пренебречь.

Для усиления токовых сигналов с SiPM используется ТИА. Параметры усиления и шума подобных усилителей достаточно сильно зависят от качества пайки и трассировки платы, которая может создавать паразитные емкости. Также разброс параметров неизбежен в зависимости от партии микросхемы операционного усилителя (в данном случае AD8055) и пассивных компонентов, что также вносит влияние на коэффициент усиления и шумовые параметры. Также система регистрации сигналов имеет свои шумовые параметры. В случае кремниевых фотоумножителей они поставляются отобранной партией с достаточно близкими параметрами, и можно пренебречь разницей в параметрах различных кремниевых фотоумножителей. Для системы предусилитель + аналого-цифровой преобразователь достаточно один раз провести измерения шума каналов.

Для фильтрации большинства шумов достаточно определить максимальную амплитуду сигнала. Для этого проводилась запись 1000 сигналов, превышающих порог -5 мВ и расчет гистограммы на основе максимальных значений амплитуды. Для этого к усилителям подключались детекторы DET1 и DET2. На рисунке 3 показана гистограмма полученных сигналов.

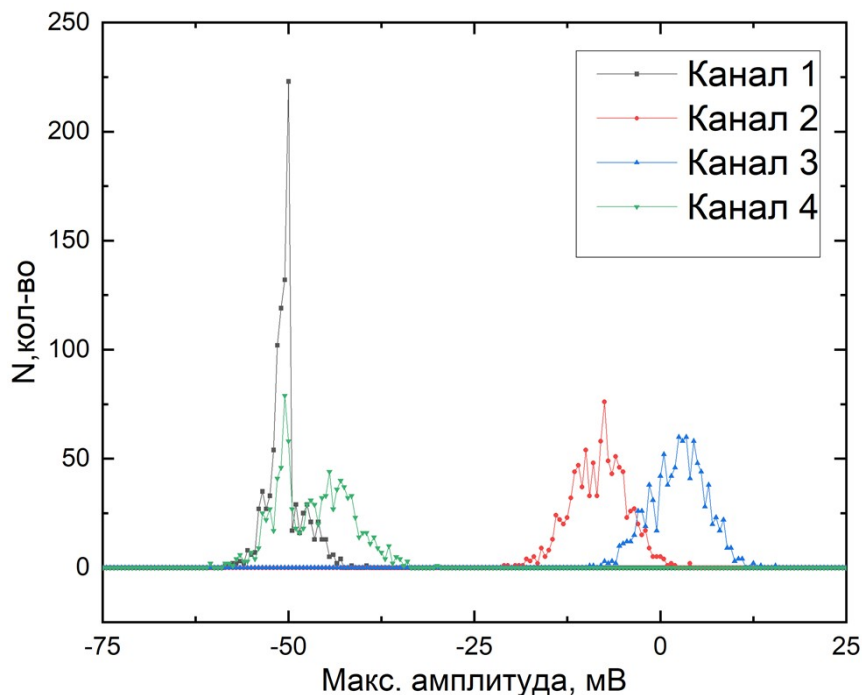


Рисунок 3 - Гистограмма шумов каналов регистрации
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.130.3>

Обработка данных и результаты

Для каждого канала устанавливается индивидуальный порог срабатывания, запись события происходила в соотношении 20% до порога, 80% после порога. Для набора достаточной статистики происходила запись по 100 тыс. событий для каждого детектора. Типичный сигнал, получаемый при регистрации фотонов кремниевым фотоумножителем, показан на рисунке 4. Поскольку сигнал от регистрации нейтрона имеет несколько временных констант, для анализа и сравнения рассчитывался интеграл сигнала (показан на рисунке 4).

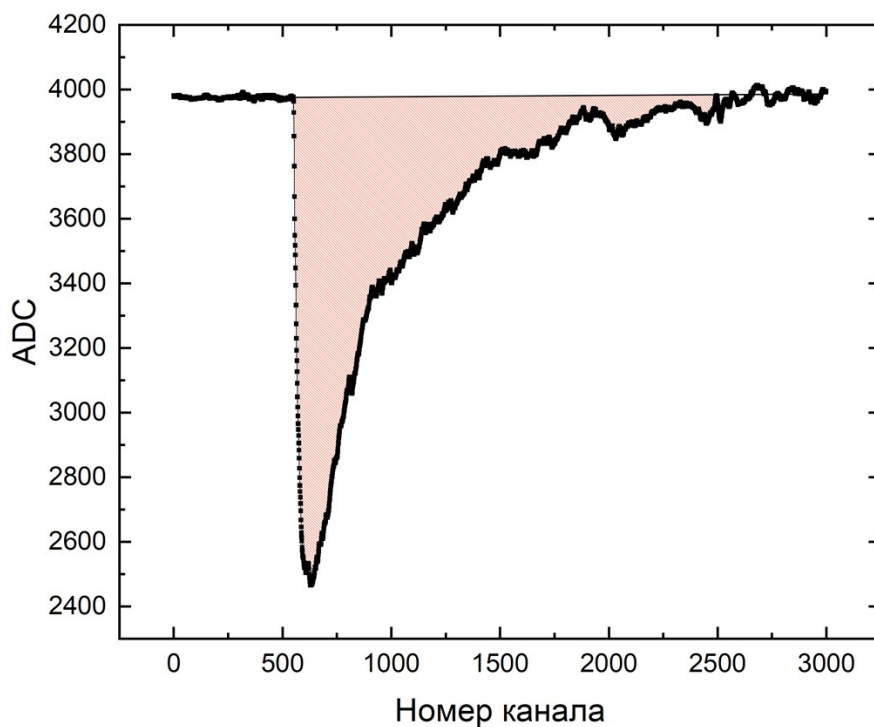


Рисунок 4 - Сигнал, получаемый от регистрации нейтрона
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.130.4>

В первую очередь проведено сравнение интеграла сигнала, получаемого с детекторов. Для этого рассчитаны гистограммы сигналов. На рисунке 5 показаны результаты измерения.

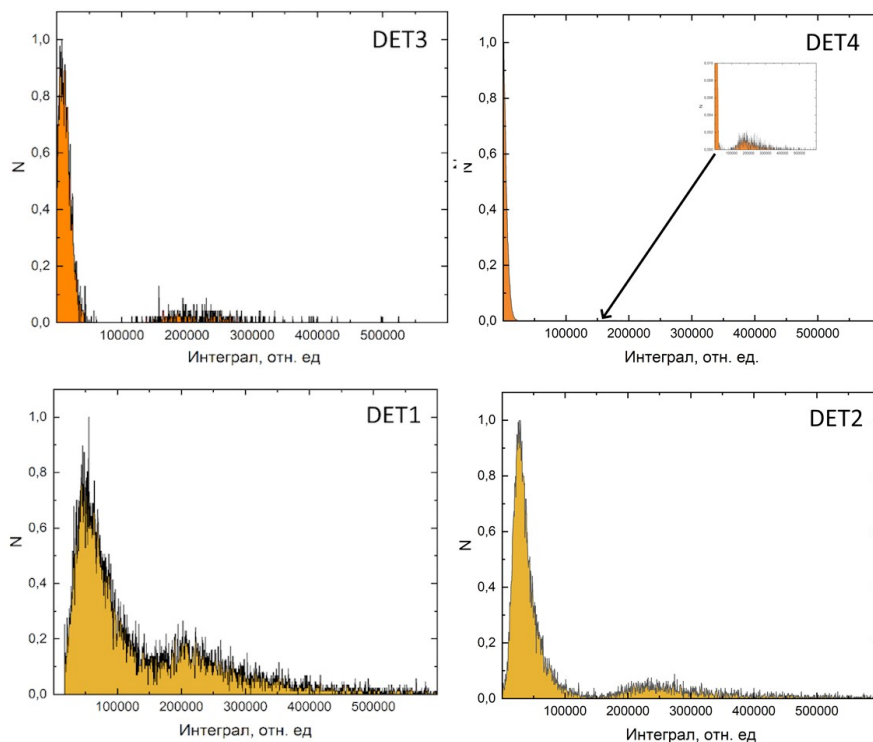


Рисунок 5 - Интеграл сигналов, получаемых с детекторов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.130.5>

Примечание: нормированы на 1

Из представленных графиков можно сделать вывод, что детекторы на основе PMMA (DET1 и DET2) имеют больший интеграл, а следовательно, большее количество фотонов доходит до кремниевого фотоумножителя. Так же для оценки разности в световыходе были рассчитаны центр пика, соответствующие максимальному количеству совпадений ($N=1$). Для более точного определения центра, пики были подогнаны функцией *bigaussian*. Полученные значения DET1 = 40906.475, DET2= 27051.883, DET3= 9780.132, DET4=1950.451. Из этих данных можно сделать вывод, что световыход детектора со световодом на основе PMMA со съемом света в торцах более чем в 4 раза больше, чем для детектора на основе WLS (для световода 5x5x60 мм). Для детекторов с линзами типа «рыбий глаз» световыход отличается более чем в 13 раз, это косвенно подтверждает, что даже на длине 60 мм основной вклад в транспортировку фотонов вносит полное внутреннее отражение, и съём света линзой с поверхности не является оптимальным для WLS. Также эти данные показывают, что съём света линзами типа «рыбий глаз» даёт света меньше на 34% (по сравнению с прямым съёмом с торца). Это больше, чем значение, полученное по результатам моделирования (около 15%) и, видимо, связано с качеством изготовления линзы и ее материалом.

Дополнительно проведен расчет интеграла сигналов от теплового шума Рисунок 6(а). Также проведено исследование гамма-чувствительности. Ввиду отсутствия гамма-источника, исследование гамма-чувствительности проведено также от источника Cf-252. Для этого перед и после детектора размещались листы кадмия, блоки NEUTROSTOP C0 заменили на NEUTROSTOP C3 с содержанием бора для экранирования нейтронов. Гамма-фон в позиции детектора равнялся примерно 20 мкЗв/ч. Гистограмма сигналов представлена на рисунке 6(б).

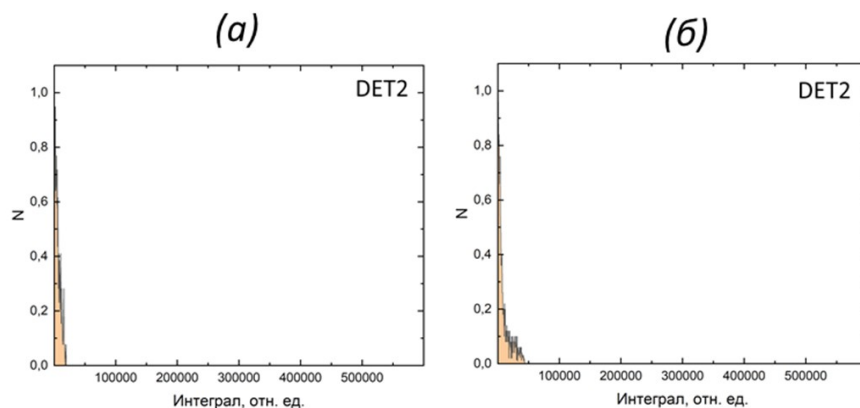


Рисунок 6 - Гистограмма:

a - теплового шума; *б* - от гамма-излучения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.130.6>

Моделирование оптических параметров детекторов на основе прозрачного световода

В случае использования WLS, при захвате фотонов в объёме волокна, максимальная длина детектора, как правило, 3-10 метра. Связано это с тем, что в волокне транспортировка фотонов происходит за счет полного внутреннего отражения, и затухание фотонов минимально. Для оптически прозрачного световода за счет использования диффузного отражения максимальная длина, как правило, ограничена сантиметрами. Поэтому для оценки размеров подобного типа детекторов проведено моделирование оптической части детектора. Для оценки параметров пропускания света и количества фотонов, падающих на кремниевый фотоумножитель, было проведено моделирование в программе оптического моделирования TracePro. В качестве исходной геометрии выбран детектор DET1. В качестве источника света использовалась сфера размером 0.0001 мм расположенная на поверхности сцинтиллятора.

Параметры, используемые при моделировании: $t=1$ сек, $\lambda = 460$ нм, количество фотонов — $1.6 \cdot 10^5$. Мощность источника составила $6.9 \cdot 10^{-12}$ Вт. Количество лучей для расчета приняли равным 10 000.

Для упрощения моделирования принято допущение, что все фотоны, падающие на торцы световода, полностью поглощаются кремниевым фотоумножителем, и событие поглощения нейтрона происходит на поверхности сцинтиллятора вблизи световода. Остальные поверхности выбраны как диффузный белый отражатель, что в реальном детекторе реализуется в виде покрытия его белой фторопластовой лентой.

Результаты моделирования показаны на рисунке 7, а. Как видно из результатов моделирования, количество фотонов с обоих торцов почти одинаково и равно $4,5 \cdot 10^4$. Дополнительно было произведено моделирование детектора размером 120 мм (рисунок 7,б). Количество фотонов в торцах при этом равнялось $1.82 \cdot 10^4$.

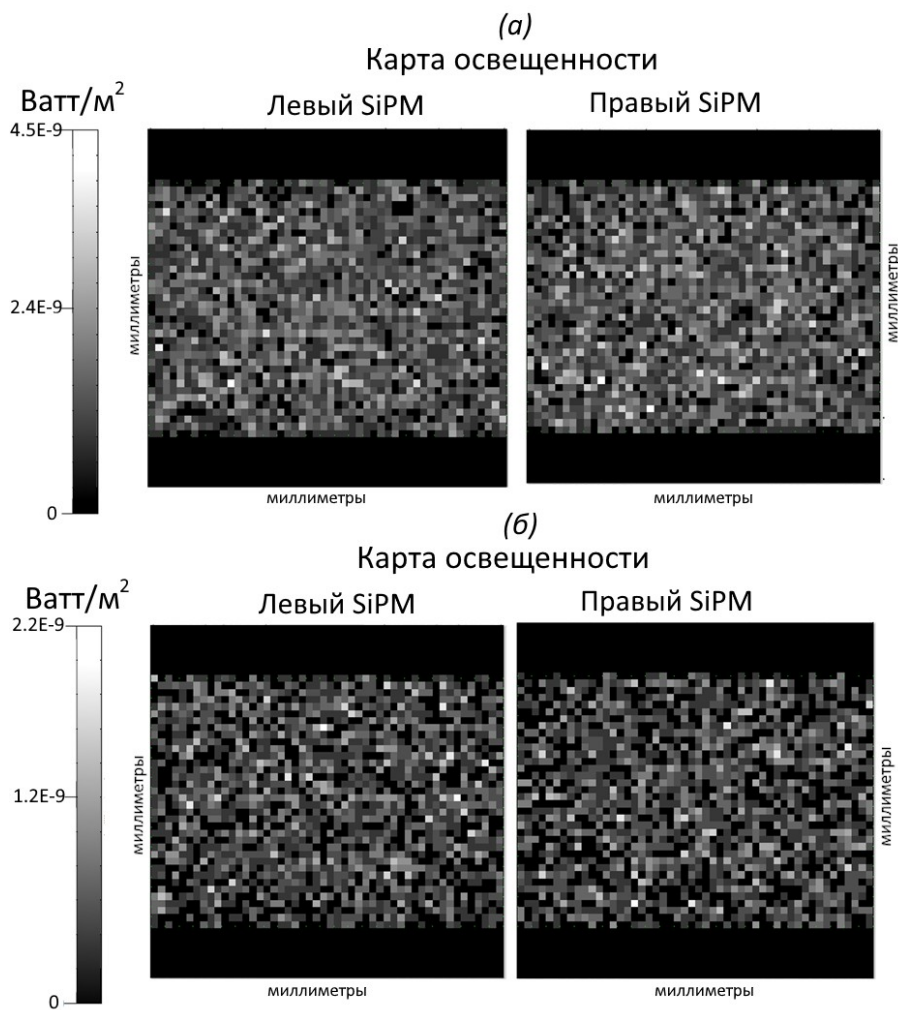


Рисунок 7 - Результаты моделирования световода:

(а) - длиной 60 мм; (б) - длиной 120 мм

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.130.7>

По результатам моделирования видно, что для таких размеров детектора все еще достаточно фотонов, чтобы достоверно зарегистрировать вспышку от регистрации фотонов. Дополнительно было проведено моделирование детектора размером 250 мм. На такой длине до кремниевого фотоумножителя доходит $25 \cdot 10^2$ фотонов. Это позволяет все еще достоверно регистрировать фотоны. Эти результаты показывают, что из-за затухания в объеме и многократного отражения прозрачный световод накладывает ограничение на длину детектора. На длине более 200 мм светосбор с помощью органического световода становится близким с методом сбора света с помощью WLS (эффективность 5–20% [17]) и не имеет смысла создавать детекторы с органическим световодом большей длины, т.к. возрастающие потери не позволяют достоверно регистрировать нейтроны и выделять сигнал на уровне шума.

Заключение

В результатах измерений показано, что количество фотонов, регистрируемых кремниевыми фотоумножителями в детекторах на основе световода из PMMA, больше, чем в аналогичных детекторах на основе WLS. Это позволяет сделать вывод, что при небольших (до 200 мм) размерах световода наибольшее влияние на транспортировку фотонов оказывает прозрачность световода. Конструкция детекторов на основе PMMA основана на достижении максимальной прозрачности и диффузного отражения фотонов со всех сторон световода. Диффузное отражение позволяет равномерно распределить фотоны по всему объему световода и донести максимальное количество до торцов световода. В свою очередь, доля фотонов, удовлетворяющих условиям полного внутреннего отражения, минимальна. Затухание фотонов при использовании прозрачного световода имеет экспоненциальную зависимость (закон Бугера-Ламберта-Бера), что накладывает ограничение на максимальную длину. На основе моделирования получено ограничение на размеры подобного типа детектора (не более 200 мм).

В свою очередь, для WLS, фотоны, которые выходят из сцинтиллятора и попадают в волокно, поглощаются и переизлучаются в соответствии с соотношениями между спектрами излучения, поглощения и эмиссии. Основной вклад в транспортировку фотонов, даже при небольших размерах световода, начинает иметь эффект полного внутреннего отражения. Поскольку доля этого излучения мала (но больше, чем для PMMA), то и количества фотонов тоже мало, но достаточно для достоверной регистрации фотонов. Сдвиг излучения в сторону зеленого света также уменьшает эффективность регистрации фотонов (в случае использования SiPM). В свою очередь, за счет полного внутреннего отражения световоды на основе WLS могут иметь намного большую длину (от 3 м). Также, что

немаловажно, для детекторов на основе WLS как гамма, так и шумовые гистограммы частично перекрываются нейтронным спектром, что определяет использование методов анализа амплитуды для разделения сигналов. Для детекторов на основе РММА количество фотонов от сигнала регистрации нейтронов превышает как гамма, так и тепловой шум, и возможно отсесть, используя только дискриминацию по пороговому уровню. Также, что немаловажно, использование световода на основе РММА (или любого другого прозрачного материала) не требует согласования спектров поглощения и переизлучения для пары световод-сцинтиллятор, что, в свою очередь, позволяет использовать любой тип сцинтиллятора.

Финансирование

Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (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 Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-10-2021-115 dated October 13, 2021, internal number 15.SIN.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. Kharzheev Y. Scintillation Detectors in Modern High Energy Physics Experiments and Prospect of Their use in Future Experiments / Y. Kharzheev // *Journal of Lasers, Optics & Photonics*. — 2017. — № 4. — DOI: 10.4172/2469-410X.1000148.
2. Марин В.Н. Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag)/LiF и лавинных фотодиодов / В.Н. Марин, Р.А. Садыков, Д.Н. Трунов [и др.] // *Письма в журнал технической физики*. — 2015. — № 18.
3. Ковальчук М.В. Исследовательский реактор ПИК / М.В. Ковальчук, С.Л. Смольский, К.А. Коноплев // *Кристаллография*. — 2021. — № 66. — DOI: 10.31857/S0023476121020053.
4. Pino F. Study of the thermal neutron detector ZnS(Ag)/LiF response using digital pulse processing / F. Pino, L. Stevanato, D. Cester [et al.] // *Journal of Instrumentation*. — 2015. — № 10. — DOI: 10.1088/1748-0221/10/08/T0800.
5. Tavernier S. Detectors Based on Scintillation / S. Tavernier // *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics*. — 2009. — № 1. — DOI: 10.1007/978-3-642-00829-0_6.
6. Шелков Г.А. Некоторые вопросы светосбора в стинтилляционных счётчиках большой длины / Г.А. Шелков, К. Шпиринг // *Сообщения Объединенного института ядерных исследований*. — 1980. — № 1.
7. NDL SiPM datasheet. — 2023 — URL: <http://www.ndl-sipm.net/PDF/Datasheet-EQR15.pdf> (accessed: 01.09.2024)
8. Hayashida H. Design and demonstration of a neutron spin flipper for a new neutron reflectometer SHARAKU at J-PARC / H. Hayashida, M. Takeda, D. Yamazaki [et al.] // *Physics Procedia*. — 2013. — № 42. — DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.186.
9. Иванов А.С. Нейтронная спектроскопия: основные принципы и приборное оснащение / А.С. Иванов, П.А. Алексеев // *Кристаллография*. — 2022. — № 1.
10. Иванов И. Методика оценки и сравнения кремниевых фотоумножителей / И. Иванов // *Электроника: наука, технология, бизнес*. — 2016. — № 2.
11. Батищев А.Г. Фотоэлектронные умножители с многослойными пленочными экранами для защиты от воздействия внешних постоянных магнитных полей / А.Г. Батищев, К.Ф. Власик, С.С. Грабчиков [и др.] // *Приборы и методы измерений*. — 2012. — № 1.
12. Wang C.L. Optimizing ZnS/ 6 LiF scintillators for wavelength-shifting-fiber neutron detectors / C.L. Wang, M.L. Crow, L.L. Funk [et al.] // *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*. — 2015. — № 10. — DOI: 10.1109/NSSMIC.2015.7581839.
13. Каплин В.А. Применение кремниевых фотоумножителей для исследования формы коротких световых импульсов однофотонным методом / В.А. Каплин, В.В. Кушин, Е.Ф. Макляев [и др.] // *Приборы и техника эксперимента*. — 2012. — № 6.
14. Пурьга Е.А. Широкополосные тракты усиления сигналов полупроводниковых детекторов излучения и частиц (обзор) / Е.А. Пурьга, А.Д. Хильченко, А.Г. Квашнин [и др.] // *Приборы и техника эксперимента*. — 2022. — № 1. — DOI: 10.31857/S0032816222010207.
15. 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 [и др.] // *Приборы и техника эксперимента*. — 2018. — № 61. — DOI: 10.7868/S003281621801007X.
16. Pagano R. Dark current in SiPM pixels: data and model / R. Pagano, D. Corso, A.L. Salvatore [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2012. — № 1.
17. Харжеев Ю.Н. Сцинтилляционные счетчики в современных экспериментах по физике высоких энергий / Ю.Н. Харжеев // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. — 2015. — № 4.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kharzheev Y. Scintillation Detectors in Modern High Energy Physics Experiments and Prospect of Their use in Future Experiments / Y. Kharzheev // *Journal of Lasers, Optics & Photonics*. — 2017. — № 4. — DOI: 10.4172/2469-410X.1000148.
2. Marin V.N. Novyj tip stintilljatsionnyh detektorov teplovyh nejtronov na osnove ZnS(Ag)/LiF i lavinnyh fotodiodov [A new type of thermal-neutron detector based on zns(ag)/lif scintillator and avalanche photodiodes] / V.N. Marin, R.A. Sadykov, D.N. Trunov [et al.] // *Technical Physics Letters*. — 2015. — № 18. [in Russian]
3. 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. — № 66. — DOI: 10.31857/S0023476121020053. [in Russian]
4. Pino F. Study of the thermal neutron detector ZnS(Ag)/LiF response using digital pulse processing / F. Pino, L. Stevanato, D. Cester [et al.] // *Journal of Instrumentation*. — 2015. — № 10. — DOI: 10.1088/1748-0221/10/08/T0800.
5. Tavernier S. Detectors Based on Scintillation / S. Tavernier // *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics*. — 2009. — № 1. — DOI: 10.1007/978-3-642-00829-0_6.
6. Shelkov G.A. Nekotorye voprosy svetosbora v stintilljatsionnyh schetchikah bol'shoj dliny [Some issues of light collection in long-length stintillation counters] / G.A. Shelkov, K. Shpiring // *Soobshhenija Ob'edinennogo instituta jadernyh issledovanij [Joint Institute for Nuclear Research reports]*. — 1980. — № 1. [in Russian]
7. NDL SiPM datasheet. — 2023 — URL: <http://www.ndl-sipm.net/PDF/Datasheet-EQR15.pdf> (accessed: 01.09.2024)
8. Hayashida H. Design and demonstration of a neutron spin flipper for a new neutron reflectometer SHARAKU at J-PARC / H. Hayashida, M. Takeda, D. Yamazaki [et al.] // *Physics Procedia*. — 2013. — № 42. — DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.186.
9. Ivanov A.S. Nejtronnaja spektroskopija: osnovnye principy i pribornoje osnashhenie [Neutron Spectroscopy: Principles And Equipment] / A.S. Ivanov, P.A. Alekseev // *Kristallografija [Crystallography Reports]*. — 2022. — № 1. [in Russian]
10. Ivanov I. Metodika ocenki i sravnenija kremnievyh fotomnozhitel'ej [How To Evaluate And Compare Silicon Photomultiplier Sensors] / I. Ivanov // *Jelektronika: nauka, tehnologija, biznes [Electronics: Science, Technology, Business]*. — 2016. — № 2. [in Russian]
11. Batischev A.G. Fotoelektronnye Umnozhiteli S Mnogoslojnymi Plenochnymi Ekranami Dlja Zashchity Ot Vozdejstvija Vneshnih Postojannyh Magnitnyh Polej [Application Of Multilayer Film Configuration To Protect Photomultiplier Against External Static Magnetic Fields] / A.G. Batischev, K.F. Vlasik, S.S. Grabchikov [et al.] // *Pribory i metody izmerenij [Instruments And Measurement Methods]*. — 2012. — № 1. [in Russian]
12. Wang C.L. Optimizing ZnS/ 6 LiF scintillators for wavelength-shifting-fiber neutron detectors / C.L. Wang, M.L. Crow, L.L. Funk [et al.] // *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*. — 2015. — № 10. — DOI: 10.1109/NSSMIC.2015.7581839.
13. Kaplin V.A. Primenenie Kremnievyh Fotomnozhitel'ej Dlja Issledovanija Formy Korotkih Svetovyh Impul'sov Odnofotonnym Metodod [Application Of Silicon Photomultipliers For Studying The Shapes Of Short Light Pulses Using The Single-Photon Method] / V.A. Kaplin, V.V. Kushin, E.F. Makljaev [et al.] // *Pribory i tehnika jeksperimenta [Instruments and Experimental Techniques]*. — 2012. — № 6. [in Russian]
14. Puryga E.A. Shirokopolosnye Trakty Usilenija Signalov Poluprovodnikovyyh Detektorov Izluchenija I Chastits (Obzor) [Broadband Signal Amplification Paths For Semiconductor Radiation And Particle Detectors (Review)] / E.A. Puryga, A.D. Hil'chenko, A.G. Kvashnin, D.V. Moiseev // *Pribory i tehnika jeksperimenta [Instruments and Experimental Techniques]*. — 2022. — № 1. — DOI: 10.31857/S0032816222010207. [in Russian]
15. Marin V.N. Kol'tsevoj detektor nejtronov dlja vremjaproletnogo difraktometra, sostojaschij iz linejnyh stintilljatsionnyh detektorov na osnove kremnievyh fotomnozhitel'ej [A Ring Neutron Detector For A Time-Of-Flight Diffractometer Based On Linear Scintillation Detectors With Silicon Photomultipliers] / V.N. Marin, R.A. Sadykov, D.N. Trunov [et al.] // *Pribory i tehnika jeksperimenta [Instruments and Experimental Techniques]*. — 2018. — № 61. — DOI: 10.7868/S003281621801007X. [in Russian]
16. Pagano R. Dark current in SiPM pixels: data and model / R. Pagano, D. Corso, A.L. Salvatore [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2012. — № 1.
17. Harzheev Ju.N. Stintilljatsionnye Schetchiki V Sovremennyh Eksperimentah Po Fizike Vysokih Energij [Scintillation Counters In Modern High-Energy Physics Experiments] / Ju.N. Harzheev // *Fizika jelementarnyh chastic i atomnogo jadra [Physics of Particles and Nuclei]*. — 2015. — № 4. [in Russian]