

МЕТОД ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОННОГО ТРАКТОВ ДЛЯ ПОДСИСТЕМЫ ВВС В ДЕТЕКТОРЕ SPD

А. В. Тишевский^{1,*}, *И. С. Волков*¹, *Ф. А. Дубинин*²,
*А. И. Дуров*², *С. А. Доронин*², *Ю. В. Гурчин*¹, *А. Ю. Исупов*¹,
*В. П. Ладыгин*¹, *С. Г. Резников*¹, *М. В. Солонбеков*¹,
*К. А. Тertyшная*², *П. Е. Тетерин*², *А. М. Захаров*²,
*Д. Р. Шафикова*²

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, 115409, Россия

Ранее был проведен цикл исследований, посвященных выбору оптимальных материалов для высокогранулированного прототипа подсистемы Beam–Beam Counter (BBC), входящей в состав детектора SPD на коллайдере NICA. На этой основе был разработан и протестирован 8-канальный прототип сектора. В связи с этим разработка средств для проверки является актуальной задачей.

В работе представлен метод проверки основной части сигнального тракта, основанный на засвечивании волокном бокового свечения (SGF); обсуждаются первые полученные результаты и перспективы применения в рамках подсистемы BBC.

Previously, a series of studies was conducted to select the optimal materials for a highly granular prototype of the Beam–Beam Counter (BBC) subsystem, which is part of the SPD detector at the NICA collider. This became the basis for the design of the 8-channel prototype of the sector which was developed and tested. In this regard, the development of a verification tool is an urgent task.

The paper presents a method for verification of the main part of the signal path based on illumination by Side-Glow Fiber (SGF). The first results are obtained and prospects for application within the BBC subsystem are discussed.

PACS: 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

Детектор спиновой физики (SPD) — эксперимент на коллайдере NICA, предназначенный для изучения спиновой структуры протона, дейтрона и других связанных со спином явлений с использованием поляризованных пучков при энергиях в системе центра масс до 27 ГэВ

* E-mail: tishevskiy@jinr.ru

и светимостью до 10^{32} см⁻²·с⁻¹. Одной из подсистем начальной фазы эксперимента SPD является Beam-Beam Counter (BBC) [1–3].

Конструкция BBC [4] предусматривает около 800 независимых каналов. Каждый канал содержит следующие элементы: сцинтилляционную пластину с вклеенным спектросмещающим волокном (WLS); оптический коннектор для сопряжения с транспортировочным волокном; кремниевый фотоумножитель (SiPM) и систему считывания. Ввиду нетривиальности технического решения требуется проведение более тщательной проверки каждого элемента.

В настоящий момент механизм проверки подразумевает несколько частей. Первая заключается в проверке пригодности сцинтилляционных пластин. Для этой цели был собран стенд на основе рентгеновской трубки АМРТЕК Mini-X. Главной задачей следующей части является проверка работоспособности оптико-электронного тракта.

В данной статье представлен разработанный альтернативный метод оперативной оценки работоспособности как оптического, так и электронного трактов без использования источников ионизирующего излучения.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Метод основан на использовании волокна бокового свечения (Side Glow Fiber, SGF). Такое волокно состоит из сердцевины из ММА (метил-метакрилат) и оболочки из тефлона. Эффект бокового свечения основан на контролируемом нарушении полного внутреннего отражения света в волокне, что позволяет свету равномерно рассеиваться по всей его длине. Таким образом, свет от светодиодного источника (LED) передается вдоль SGF и засвечивает WLS при сопряжении волокон.

Следовательно, основная задача метода — возможность быстрого выявления каналов с аномально низким откликом и последующий анализ на предмет дефектного коннектора, дефекта волокон или неработающего SiPM, или канала системы считывания. Кроме того, меняя интенсивность свечения LED, можно проверить линейность отклика всей электронной цепи совместно с SiPM. Особый интерес заключается в перспективе применения такого волокна в составе собранного сектора, что требует дальнейшего исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И ОБОРУДОВАНИЕ

Для проведения исследований был собран светозащищенный стенд. В качестве испытываемых образцов использовались:

- Одиночные сцинтилляционные пластины с вклеенным WLS BCF92S (пик эмиссии — 492 нм) от производителя Saint-Gobain Crystals. Данный тип волокна будет использован на эксперименте «фазы 0».

- Одиночные сцинтилляционные пластины с вклеенным WLS Y-11 (пик эмиссии — 476 нм) от производителя KURARAY. Данный тип волокна планируется к использованию на эксперименте «фазы 1».

Коммутация WLS реализована одноканальным подключением к SiPM Onsemi SMTPA FC-10035 посредством разработанного нами разъема. Основным решением для первичной электроники (FEE) с встроенным источником питания был принят модуль DT5202, входящий в состав системы CAEN FERS-5200 [5].

Для засвечивания образцов применялось SGF типа SOF Solid с широким диапазоном длин волн (350–780 нм). Были использованы SGF-2 и SGF-3 с диаметрами 2 и 3 мм соответственно [6]. Длина каждого отрезка волокна составляла 250 см. Один из торцов SGF подводился вплотную к LED.

В качестве стабильного источника света использовался LED с длиной волны 470 нм. LED имеет логический триггерный сигнал, который использовался для DT5202. Сбор данных осуществлялся посредством DAQ «Janus», предоставляемого CAEN. Полученные данные были обработаны с помощью фреймворка «FersRun» [7].

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ СОПРЯЖЕНИЯ SGF

Был использован образец I и исследованы два способа сопряжения WLS с SGF-2 (рис. 1):

- Параллельный: WLS располагалась вдоль SGF-2 на фиксированном расстоянии ($\sim 0,5$ м) от LED. Длина рабочей области составляла 10 мм, остальные части волокон светоизолировались отдельно. Для обеспечения повторяемости результатов волокна фиксировались.

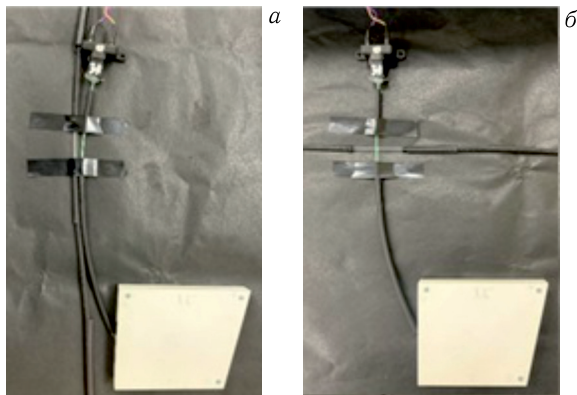


Рис. 1. Способы сопряжения WLS с SGF: а) параллельный; б) перпендикулярный

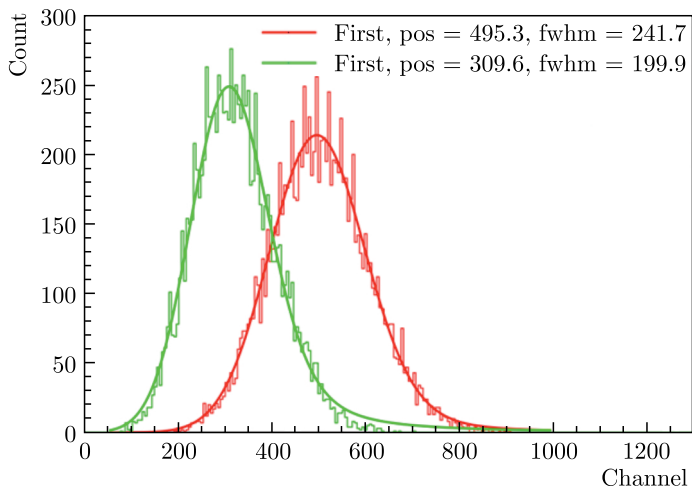


Рис. 2. Амплитуды сигналов для различных способов сопряжения

- Перпендикулярный: WLS располагалось под углом 90° к SGF-2. Оба волокна имели одинаковую длину рабочей области 10 мм.

Для каждого способа сопряжения проводилась серия измерений. Измеряемой величиной являлась амплитуда выходного сигнала (в каналах электроники) с одного и того же SiPM.

Рис. 2 показывает, что различие амплитуд между способами сопряжения составляет около 50–60%. Однако способ с перпендикулярным пересечением является приоритетным как с точки зрения простоты крепления, так и в случае многоканального подключения. В этой связи требуется оптимизация световых выходов и светосбора для улучшения эффективности детектирования.

УВЕЛИЧЕНИЕ СВЕТОВЫХОДА ЗА СЧЕТ ДИАМЕТРА SGF

Для количественной оценки эффективности сопряжения SGF с WLS была собрана установка (рис. 3, а). Исследовались образцы SGF-2 и SGF-3. Оба образца имели одинаковую длину рабочей области 10 мм.

Измерения проводились следующим способом: SGF фиксировалось в прямолинейном положении. Вывод WLS из сцинтилляционной пластины прикреплялся перпендикулярно по отношению к оси SGF. Измерения проводились вдоль SGF с шагом 25 см. Для каждой точки измерения записывалось несколько файлов для последующего усреднения и статистического анализа.

Результаты измерений зависимости амплитуды сигнала (в каналах) от положения вдоль SGF для двух диаметров волокна представлены на рис. 3, б.

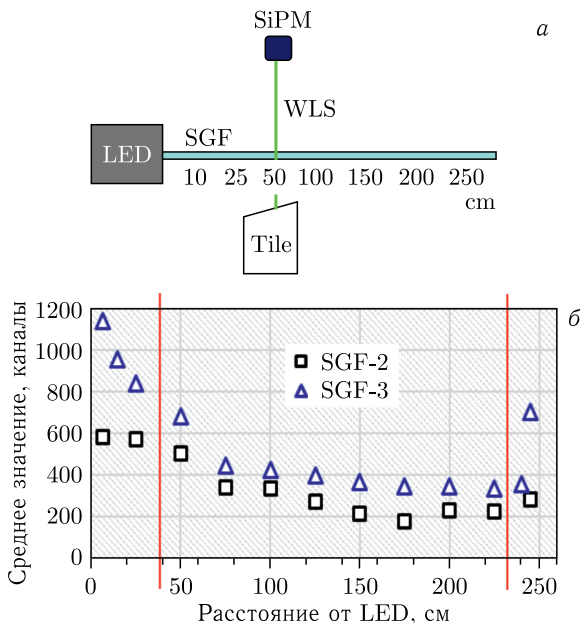


Рис. 3. а) Принципиальная схема измерений; б) разница световыхода от SGF-2 и SGF-3

Во всех точках измерений амплитуда сигнала для SGF-3 систематически превышает сигнал для SGF-2. Среднее значение отношения световыхода (SGF-3/SGF-2) по точкам измерений составило $1,50 \pm 0,09$. Таким образом, увеличение диаметра SGF с 2 до 3 мм приводит к увеличению световыхода приблизительно на 50 %.

Представленные зависимости также показывают проявление оптических эффектов на краях SGF, которые закономерно усиливаются в волокнах с большим диаметром. Данный аспект требует учета при проектировании многоканальной системы.

РАЗЛИЧИЕ СВЕТОСБОРА В WLS

В продолжение исследований по увеличению световыхода была проведена серия измерений для сравнения светосбора в образцах I и II, при подключении к SGF-3 (оптимальный диаметр, определенный в предыдущих исследованиях). Критически важным условием измерений было использование одного и того же SiPM.

Измерения амплитуды сигнала (в каналах) в зависимости от положения вдоль SGF представлены на рис. 4.

Во всех точках измерений наблюдается стабильное и значительное превышение сигнала для образца II. Среднее значение отношения об-

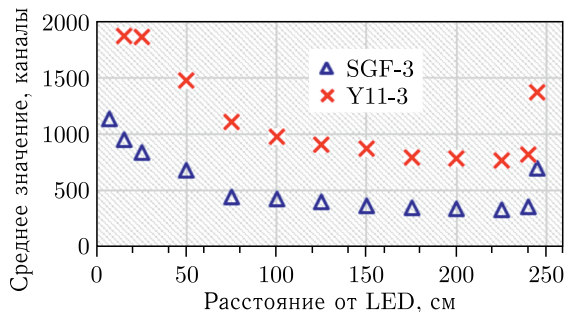


Рис. 4. Разница амплитуд сигналов для WLS BCF92S (Saint-Gobain) и WLS Y-11 (Kuraray)

разец II/образец I составило $2,30 \pm 0,15$, что соответствует увеличению световыхода на 130%. Данный факт является ярким примером повышенной эффективности преобразования поглощенной энергии.

Комплексный подход к оптимизации, включающий как выбор оптимального диаметра SGF (3 мм), так и внедрение высокоэффективных WLS (Kuraray Y11), позволяет добиться кумулятивного эффекта в увеличении сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования был разработан и успешно апробирован альтернативный традиционному метод проверки работоспособности каналов детектора ВВС для эксперимента SPD. Метод основан на применении волокна бокового свечения для засвечивания спектросмещающих волокон и последующей регистрации сигнала кремниевым фотоумножителем.

Проведенные исследования позволили получить следующие ключевые результаты:

1. Определен оптимальный способ сопряжения. Перпендикулярный способ сопряжения WLS к SGF признан приоритетным благодаря простоте реализации и потенциальной адаптируемости для многоканальной системы, несмотря на примерно 50%-й проигрыш в светосборе по сравнению с параллельным способом.

2. Установлена зависимость световыхода от диаметра SGF. Показано, что увеличение диаметра SGF с 2 до 3 мм приводит к статистически значимому увеличению светового сигнала на $\sim 50\%$, что согласуется с теоретическими ожиданиями.

3. Проведено сравнение эффективности разных WLS. Обнаружено, что использование волокна Y-11 (Kuraray) вместо BCF92S (Saint-Gobain) позволяет увеличить амплитуду сигнала более чем в два раза (на $\sim 130\%$), что демонстрирует критическую важность выбора материалов для максимизации световыхода.

Разработанный метод эффективен для быстрого выявления каналов с аномально низким откликом и может быть использован для проверки целостности оптического тракта и функциональности электроники, в том числе в процессе эксплуатации детектора. Полученные результаты являются начальным этапом для создания системы валидации после установки, транспортировки или технического обслуживания для собранных секторов детектора ВВС.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Г. А. Нигматкулову и Ю. Ф. Кречетову за предоставление научных статей и материалов, а также И. Ю. Киселеву и Е. П. Якушову за помощь в технической подготовке тестов и участие в полезных обсуждениях.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Объединенного института ядерных исследований. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zakharov A. M., Dubinin F. A., Isupov A. Y. et al.* Material Selection of the SPD Beam–Beam Counter Scintillation Detector Prototype // *Phys. Part. Nucl.* 2024. V. 55. P. 1091–1098; <https://doi.org/10.1134/S106377962470076X>.
2. *Tishevsky A. V., Dubinin F. A., Isupov A. Yu., Ladygin V. P., Nigmatkulov G. A., Reznikov S. G., Teterin P. E., Volkov I. S., Zakharov A. M., Zhurkina A. O.* Development of the SPD Beam–Beam Counter Scintillation // *Phys. At. Nucl.* 2024. V. 87. P. 450–457; <https://doi.org/10.1134/S1063778824700510>.
3. *Zakharov A. M., Dubinin F. A., Isupov A. Yu., Ladygin V. P., Manakonov A. D., Nigmatkulov G. A., Reznikov S. G., Teterin P. E., Tishevsky A. V., Volkov I. S., Zhurkina A. O.* Tile Detector Configurations Testing for the SPD Beam–Beam Counter Prototype // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2024. V. 21. P. 735–738; <https://doi.org/10.1134/s1547477124701218>.
4. *Abazov V. M. et al. (SPD Collab.)*. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. arXiv:2404.08317. 2024.
5. FERS-5200 Boards, CAEN SpA. <https://www.caen.it/subfamilies/fers-5200> (accessed 1.09.2025).
6. Световолоконный кабель (нити и источники света) Агентство «А». https://agentstvoa.ru/files/brosyury/optovolokonnyy_kabel_i_istochniki (дата обращения 16.09.2025).
7. *Tishevsky A. V., Dubinin F. A., Isupov A. Yu., Ladygin V. P., Nigmatkulov G. A., Reznikov S. G., Teterin P. E., Volkov I. S., Zakharov A. M.* The SPD Beam–Beam Counter Scintillation Detector Prototype Tests with FERS-5200 Front-End Readout System // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2024. V. 21. P. 723–726; <https://doi.org/10.1134/s1547477124701188>.