

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА ВВС

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

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

^б Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, 141980, Россия

Одной из подсистем эксперимента SPD (фаза I) является пучковый счетчик (Beam–Beam Counter, BBC) — высокогранулированный сцинтилляционный детектор с сегментированной структурой на ~ 800 каналов. Для обеспечения его надежности необходим инструмент быстрой проверки всего оптоэлектронного тракта. В работе представлен оптический метод диагностики, альтернативный использованию источников ионизирующего излучения. Метод основан на применении волокна бокового свечения (SGF) и позволяет проводить поканальное тестирование. Приведены результаты исследований по выбору конфигурации сопряжения, оптимизации светосбора с помощью отражающих подложек и тестированию многоканального прототипа оптического кабеля. Разработанный подход рекомендован для применения в подсистеме BBC.

One of the subsystems of the SPD experiment (phase I) is the Beam–Beam Counter (BBC), designed as highly granularity scintillation detector with a segmented structure of ~ 800 channels. To ensure its reliability, a quick check tool is needed for the entire optoelectronic path. The paper presents an optical diagnostic method alternative to the use of ionizing radiation sources. The method is based on the use of side-glow fiber (SGF) and allows for channel-by-channel testing. The results of research on the choice of interface configuration, optimization of light collection using reflective substrates, and testing of a multichannel optical cable prototype are presented. The developed approach is recommended for use in the BBC subsystem.

PACS: 01.50.Pa

ВВЕДЕНИЕ

Пучковый счетчик BBC в эксперименте SPD представляет собой сложную систему, каждый из ~ 800 каналов которой включает сцинтилляционную пластину со спектрсмещающим волокном (WLS), оптические соединения, фотосенсоры (SiPM) и электронику считывания. Гарантия работоспособности такого детектора требует

¹E-mail: tishevskiy@jinr.ru

эффективных методов приемочного контроля и диагностики состояния каждого элемента тракта [1, 2].

Разработан и апробирован метод, позволяющий проводить такую диагностику без привлечения ионизирующего излучения. Он основан на использовании волокна бокового свечения (Side Glow Fiber, SGF) и стабильного светодиодного источника (LED) для моделирования засветки сцинтилляционных элементов. Ниже приведены результаты экспериментов по выбору оптимального сопряжения волокон, оптимизации светосбора и тестированию прототипа многоканального оптического кабеля.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В основе метода лежит использование SGF с сердцевинной из ММА и тефлоновой оболочкой. Контролируемое нарушение полного внутреннего отражения в SGF обеспечивает равномерное рассеяние света по его длине. Это позволяет свету от LED, распространяющемуся вдоль SGF, эффективно засвечивать WLS-волокна в местах их сопряжения.

Метод решает две основные задачи:

1. Быструю диагностику каналов с аномально низким откликом для поиска дефектов (коннекторов, волокон, SiPM или каналов считывания).

2. Проверку линейности отклика всей электронной цепи с SiPM путем изменения интенсивности LED.

Перспективным направлением является применение данного метода для диагностики собранных секторов, что требует отдельного исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И ОБОРУДОВАНИЕ

Тесты проводились на светозащищенном стенде, собранном для исследования:

I — способов сопряжения SGF с WLS и II — прототипа оптического кабеля на основе прозрачного волокна Kuraray.

В качестве базового образца использовалась одиночная сцинтилляционная пластина с вклеенным WLS BCF92S (пик эмиссии — 492 нм, Saint-Gobain Crystals), соответствующая конфигурации для «фазы 0». WLS коммутировался к SiPM Onsemi (SensL) через модуль первичной электроники DT5202 (система CAEN FERS-5200) [3].

Для засветки применялись волокна SGF типа SOF Solid (диапазоном длин волн 350–780 нм). Были использованы SGF-2 и SGF-3 с диаметрами 2 и 3 мм соответственно. Длина каждого отрезка волокна, поочередно жестко соединенного с LED (длина волны 470 нм), составляла 250 см.

Триггерный сигнал от LED использовался для DT5202. Сбор данных осуществлялся посредством DAQ «Janus», предоставляемого CAEN. Полученные данные были обработаны с помощью фреймворка FersRun [3].

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ СОПРЯЖЕНИЯ SGF

Исследованы два способа сопряжения WLS с SGF-2 (рис. 1, а, б):

- параллельный: WLS располагалось вдоль SGF-2 на фиксированном расстоянии ($\sim 0,5$ м) от LED. Рабочая область — 10 мм;

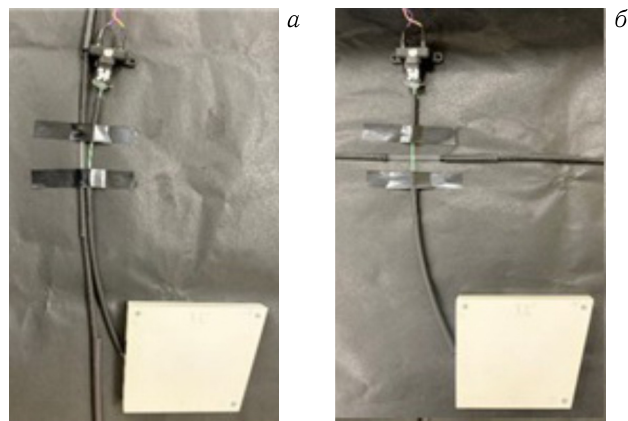


Рис. 1. Способы сопряжения WLS с SGF-2: параллельный (а) и перпендикулярный (б)

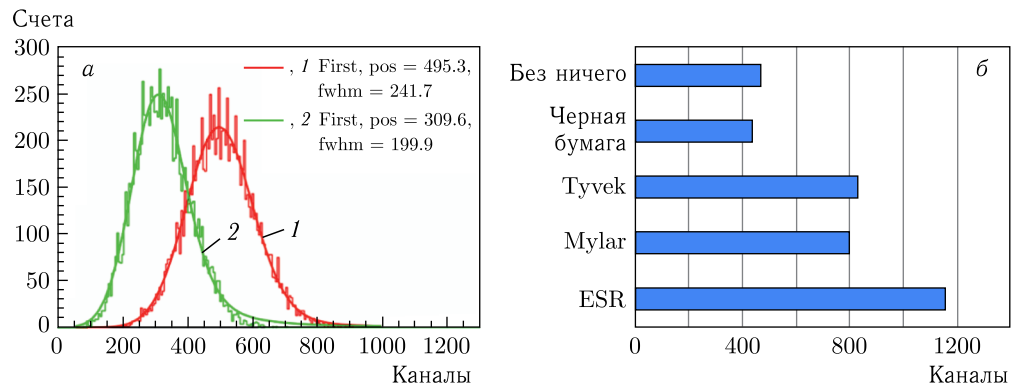


Рис. 2. а) Амплитуды сигналов для различных способов сопряжения. б) Сравнение отражающих подложек

• перпендикулярный: WLS располагалось поперек SGF-2. Рабочая область каждого волокна — 10 мм.

Для каждого способа проводилась серия измерений амплитуды выходного сигнала с одного и того же SiPM (SMTPA FC-10035). Результаты (рис. 2, а) показывают различие в положении пиков в среднем на 40 %. С точки зрения простоты и технологичности монтажа предпочтительным является перпендикулярный способ. В этой связи требуется оптимизация светосбора для улучшения эффективности детектирования.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для оптимизации светосбора исследовано использование SGF-3 в сочетании с отражающими подложками (Tyvek, Mylar, ESR [4], 50 × 50 мм) и контрольной подложкой из черной бумаги. Подложки поочередно помещали на волокна для сравнительного анализа.

Переход с SGF-2 ($\varnothing 2$ мм) на SGF-3 ($\varnothing 3$ мм) увеличивает амплитуду сигнала (рис. 2, а, б). Среднее отношение световыходов SGF-3/SGF-2 составило $1,50 \pm 0,09$, что соответствует приросту $\sim 50\%$.

Влияние отражающих подложек на световыход также подтверждено экспериментально. Подложки Tyvek и Mylar демонстрируют сопоставимую эффективность, повышая сигнал в среднем в 2 раза по сравнению с контрольным измерением. При этом подложка ESR показала преимущество в 25–30% относительно Tyvek и Mylar.

ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

Тестирование проводилось на образце с перпендикулярным сопряжением WLS и SGF-3 без отражающих подложек (рис. 3) в сочетании с прототипом оптического кабеля. Измерения выполнялись по каналам (1–8) с поочередной коммутацией на обоих концах кабеля. Со стороны образца использовался центрирующий соединитель, с противоположного — разработанный разъем с SiPM 3×3 мм (FC-30035) для идентичности условий коммутации.

Представлены результаты поканальных измерений до (рис. 4, а) и после (рис. 4, б) корректировки соединителя. Для каналов 3–6 наблюдается увеличение средней амплитуды пика. Неизменный сигнал в канале 7 может указывать на возможный дефект прозрачного волокна.

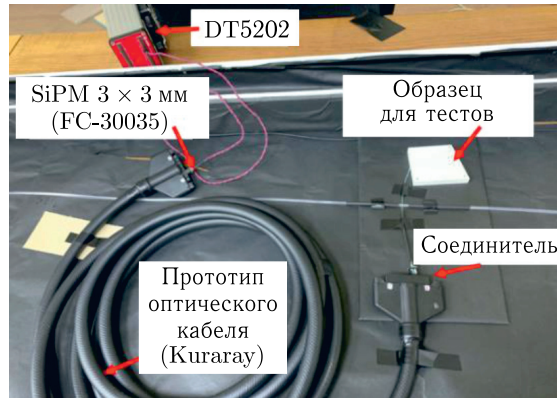


Рис. 3. Схема тестирования прототипа оптического кабеля

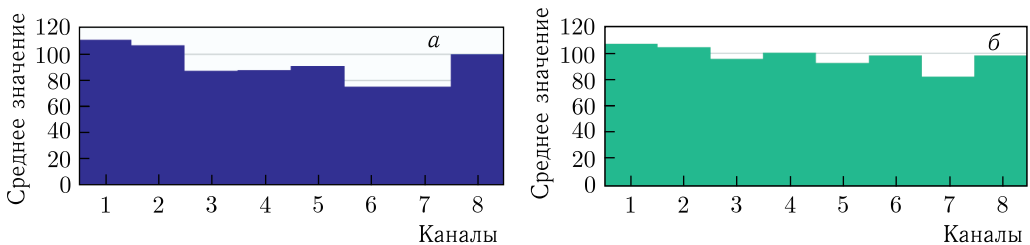


Рис. 4. Результаты тестов оптического кабеля до (а) и после (б) корректировки соединителя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и успешно апробирован оптический метод для поэлементной диагностики оптоэлектронных каналов без применения ионизирующего излучения.

Экспериментально обоснован выбор перпендикулярного сопряжения волокон и оптимизирована конфигурация для максимального светосбора: использование SGF-3 диаметром 3 мм вместо 2 мм увеличивает сигнал на $\sim 50\%$, а отражающая подложка ESR дает суммарное усиление более чем в 3,5 раза.

Метод доказал свою эффективность для выявления дефектов на примере показального тестирования восьмиканального оптического кабеля на основе прозрачного волокна KugaRay. Выявлен и локализован потенциальный дефект в одном из волокон, подтверждена эффективность корректировки соединителя для других каналов. В целом характер сигнала свидетельствует о необходимости улучшения процедуры обработки торцов коннекторов. Полученные результаты позволяют рекомендовать данный подход для приемочного контроля и мониторинга состояния каналов детектора BBC.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abazov V.M. et al. (SPD Collab.)*. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. arXiv:2404.08317. 2024.
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. *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>.
4. Adhesive Tapes 3M Specular Films ESR. <https://www.chipdip.ru/product/7100256533-enhance-spec-refl-1-10-sheets-3m-8034066595> (accessed 10.11.2025).

Получено 5 декабря 2025 г.