ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА BBC

А. В. Тишевский [а,*], 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 [в], 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 [в]

[а]Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская область, 141980, Россия

[*]e-mail: tishevskiy@jinr.ru

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

[в] Государственный университет «Дубна», Дубна, Московская область, 141980, Россия

Аннотация – Одной из подсистем эксперимента SPD (фаза I) является пучковой 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.

ВВЕДЕНИЕ

Пучковой счетчик BBC в эксперименте SPD представляет собой сложную систему, каждый из ~800 каналов которой включает сцинтилляционную пластину со спектросмещающим волокном (WLS), оптические соединения, фотосенсоры (SiPM) и электронику считывания. Гарантия работоспособности такого детектора требует эффективных методов приемочного контроля и диагностики состояния каждого элемента тракта [1-2].

В данной работе 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 сердцевиной 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. Быстрая диагностика каналов с аномально низким откликом для поиска дефектов (коннекторов, волокон, SiPM или каналов считывания).
2. Проверка линейности отклика всей электронной цепи с SiPM путём изменения интенсивности LED.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И ОБОРУДОВАНИЕ

Тесты проводились на светозащищённом 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 нм — 780 нм). Были использованы SGF-2 и SGF-3 с диаметрами 2мм и 3мм, соответственно. Длина каждого отрезка волокна составляла 250 см, поочередно жёстко соединённого с LED (длина волны 470 нм).

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 слева, справа):

- Параллельный: WLS располагалось вдоль SGF-2 на фиксированном расстоянии (~0,5 м) от LED. Рабочая область — 10 мм.
- Перпендикулярный: WLS располагалось поперек SGF-2. Рабочая область каждого волокна — 10 мм.

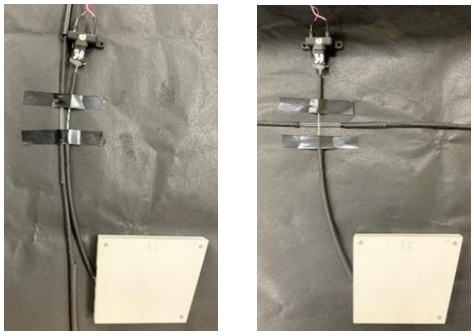

Рис. 1. Способы сопряжения WLS с SGF-2: (слева) параллельный, (справа) перпендикулярный

Для каждого способа проводилась серия измерений амплитуды выходного сигнала с одного и того же SiPM (SMTPA FC-10035). Результаты (рис. 2, слева) 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 мм²) и контрольной подложкой из чёрной бумаги. Подложки поочерёдно помещали на волокна для сравнительного анализа.

Переход с SGF-2 (Ø 2 мм) на SGF-3 (Ø 3 мм) увеличивает амплитуду сигнала (рис. 2, слева, справа). Среднее отношение световыхода SGF-3/SGF-2 составило 1.50 ± 0.09, что соответствует приросту ~50%.

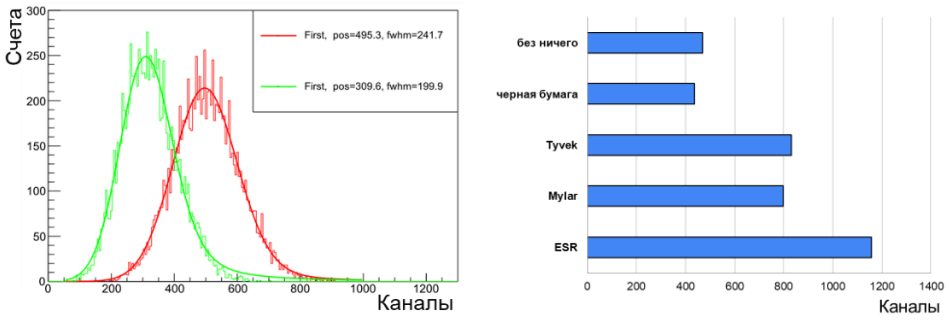

Рис. 2. Амплитуды сигналов для различных способов сопряжения (слева). Сравнение отражающих подложек (справа)

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 поочерёдной коммутацией на обоих концах кабеля. Со стороны образца использовался центрирующий соединитель, с противоположного — разработанный разъём с SiPM 3×3 мм² (FC-30035) для идентичности условий коммутации.

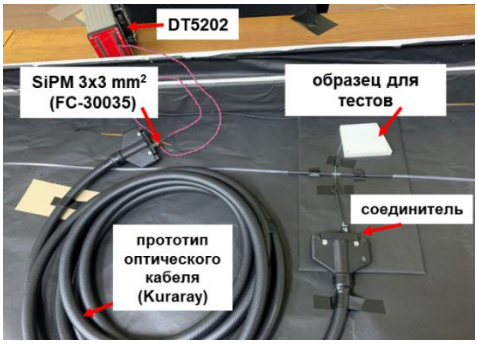

Рис. 3. Схема тестирования прототипа оптического кабеля

Результаты поканальных измерений до рис. 4 (слева) и после рис. 4 (справа) корректировки соединителя представлены. Для каналов 3–6 наблюдается увеличение средней амплитуды пика. Неизменный сигнал в канале 7 может указывать на возможный дефект прозрачного волокна.

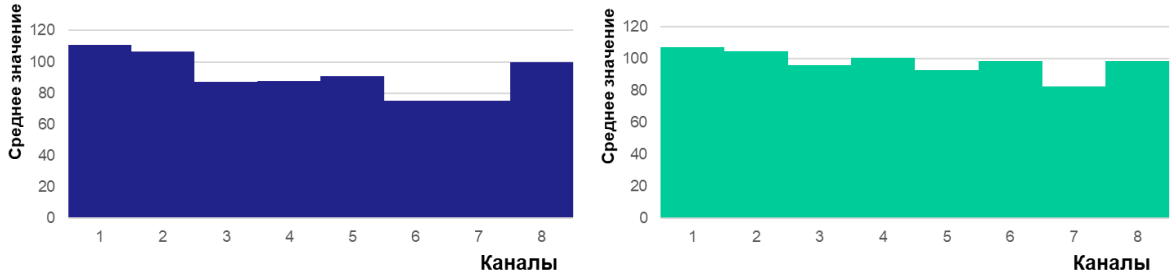

Рис. 4. Результаты тестов оптического кабеля до (слева) и после (справа) корректировки соединителя

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 ~50%, а отражающая подложка ESR даёт суммарное усиление более чем в 3.5 раза.

Метод доказал свою эффективность для выявления дефектов на примере поканального тестирования восьмиканального оптического кабеля на основе прозрачного волокна Kuraray. 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 приёмочного контроля и мониторинга состояния каналов детектора ВВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. M. Abazov et al. (SPD Collab.) // Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA, (2024). arXiv:2404.08317
2. A. V. Tishevsky, F. A. Dubinin, A. Yu. Isupov, V. P. Ladygin, G. A. Nigmatkulov, S. G. Reznikov, P. E. Teterin, I. S. Volkov, A. M. Zakharov, and A. O. Zhurkina Development of the SPD Beam-Beam Counter scintillation // Phys. At. Nucl. V. 87. P. 450–457 (2024). https://doi.org/10.1134/S1063778824700510
3. A. V. Tishevsky, F. A. Dubinin, A. Yu. Isupov, V. P. Ladygin, G. A. Nigmatkulov, S. G. Reznikov, P. E. Teterin, I. S. Volkov, and A. M. Zakharov The SPD Beam-Beam Counter scintillation detector prototype tests with FERS-5200 front-end readout system // Phys. Part. Nucl. Lett. V. 21. P. 723–726 (2024). 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, доступ 10 ноября, 2025.