

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОСБОРА В СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КУБИКАХ ДЕТЕКТОРА SFGD

*А. Артиков^а, В. Баранов^а, А. Бойков^а, Ю. Будагов^а,
И. Васильев^{а,1}, В. Глаголев^а, Ю. Давыдов^а, Н. Ершов^б,
А. Колесников^а, Ю. Куденко^{б,в,2}, К. Лимарев^а, А. Мефодьев^б,
О. Минеев^б, А. Руденко^а, В. Терещенко^а, С. Федотов^б,
М. Хабибуллин^б, А. Хотянцев^б*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт ядерных исследований РАН, Москва

^в Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Москва

В работе представлены результаты измерения параметров сцинтилляционных кубиков, являющихся элементами активной мишени модернизированного ближнего детектора эксперимента T2K, при возбуждении сцинтилляции органического сцинтиллятора на основе полистирола с помощью светодиода, излучающего в ультрафиолетовой области. Основное внимание уделено изучению утечек света через боковые грани кубиков.

Результаты измерений показывают, что среднее значение коэффициента, характеризующего световые утечки через одну грань кубика, равно 0,026. Исследовано влияние нагрева сцинтилляционных кубиков на светосбор с них и световые утечки. После выдерживания кубиков при температуре 60 °С в течение 72 ч светосбор с них и световые утечки остались на прежнем уровне.

Parameters of scintillation cubes that are elements of the active target of the upgraded near detector of the T2K experiment are measured under oscillation of a polystyrene-based organic scintillator excited by an ultraviolet LED. The emphasis is placed on the study of light leakage through the sides of the cubes.

The results of the measurements show that the average value of the coefficient characterizing light leaks through a cube side is 0.026. Effect of heating on the light collection and light leaks of the cubes is investigated. After being kept at the temperature of 60 °C for 72 h, the cubes have shown the same level of light collection and light leaks.

PACS: 29.40.Mc

¹E-mail: ivasilyev@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся работы по модернизации одного из ближних детекторов эксперимента Т2К (Япония) — ND280 [1]. Новый детектор, названный SuperFine-Grained Detector (SFGD), будет состоять из почти 2 миллионов сцинтилляционных кубиков размером $1 \times 1 \times 1$ см, изготовленных из полистирола с добавкой 1,5% партерфенила (РТР) и 0,01% РОРОР [2]. Съем сцинтилляционного сигнала с кубиков будет организован по трем ортогональным направлениям при помощи спектросмещающих волокон Кигагау Y-11(200)MS диаметром 1 мм, вставленных в просверленные в кубиках отверстия диаметром 1,5 мм (рис. 1). Регистрация света со спектросмещающих волокон будет осуществляться при помощи кремниевых фотоумножителей (SiPM/MPPC) Hamamatsu S13360-1325CS с чувствительной площадью $1,3 \times 1,3$ мм. Для светоизоляции кубиков их поверхность подвергается химическому травлению, тем самым образуется микропористый диффузный отражающий слой толщиной 50–80 мкм [2, 3].

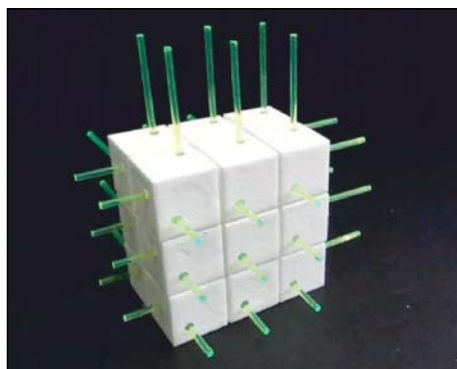


Рис. 1. Сцинтилляционные кубики со вставленными в них спектросмещающими волокнами

Однако вследствие того что данный отражающий слой не является полностью непрозрачным, утечки света из кубиков неизбежны. Измерение этих утечек крайне важно для 3D-реконструкции треков частиц, а также для корректного построения модели детектора в программах моделирования. Исследования прототипа детектора на пучках заряженных частиц в ЦЕРН показали, что утечка из одного кубика в соседний составляет в среднем 3,5% [4, 5]. Вместе с тем эти результаты не объясняют причину световых утечек: они могут происходить как за счет прямого прохождения света через отражающие слои соседних кубиков, так и за счет утечек света через отверстия со вставленными в них волокнами. Безусловно, это требует дополнительных исследований.

Остается также открытым вопрос о влиянии температуры на отражающий слой и на светосбор с кубиков, так как кубики могут подвергаться действию высокой температуры при транспортировке или хранении до окончательной установки в ближнем детекторе эксперимента Т2К. Чтобы выяснить температурное влияние, необходимо провести исследования по определению световых утечек до и после нагрева кубиков при различных значениях и времени воздействия температуры.

Для исследования световых утечек из кубиков нами использовался метод возбуждения флуоресценции в кубиках при помощи ультрафиолетового светодиода. В зависимости от длины волны излучения светодиод может возбудить одну из добавок — РТР или РОРОР. Использование данного метода не требует больших временных и финансовых затрат по сравнению с использованием пучков заряженных частиц или космики.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В основе использованного нами метода — возбуждение флуоресценции спектросмещающих добавок (РТР, РОРОР) в составе сцинтиллятора излучением от ультрафиолетового светодиода для имитации сцинтилляции, которая возникает в сцинтилляторе при взаимодействии с ионизирующей частицей. Для оценки утечки света из одного кубика в другой необходимо поместить их рядом друг с другом так, чтобы одна из граней одного кубика полностью соприкасалась с гранью другого. Имитируя сцинтилляцию в одном из кубиков, необходимо одновременно регистрировать световой сигнал от обоих.

В данной работе в качестве меры световой утечки из одного кубика в другой используется отношение измеренных сигналов в этих двух кубиках:

$$k = \frac{LY_{\text{adj}}}{LY_{\text{main}}}, \quad (1)$$

где LY_{main} — измеренный сигнал от подсвечиваемого кубика; LY_{adj} — измеренный сигнал от соседнего кубика с подсвечиваемым кубиком.

Для имитации сцинтилляции, т. е. возбуждения флуоресценции в подсвечиваемом сцинтилляторе, необходимо, чтобы спектр излучения инжектирующего светодиода находился в области поглощения одной из спектросмещающих добавок сцинтиллятора — РТР или РОРОР. На рис. 2 показаны спектры поглощения и высвечивания сместителей спектра РТР и РОРОР.

В качестве источника света для возбуждения флуоресценции был выбран светодиод Thorlabs LED370E с максимумом излучения при длине волны $\lambda = 375$ нм, $\text{FWHM} = 10$ нм, согласно технической документации. Спектр излучения данного светодиода полностью перекрывается областью поглощения спектросмещающей добавки РОРОР. Свет от светодиода поглощается этой добавкой и переизлучается в более длинноволновую, голубую, область спектра с пиком около 425 нм.

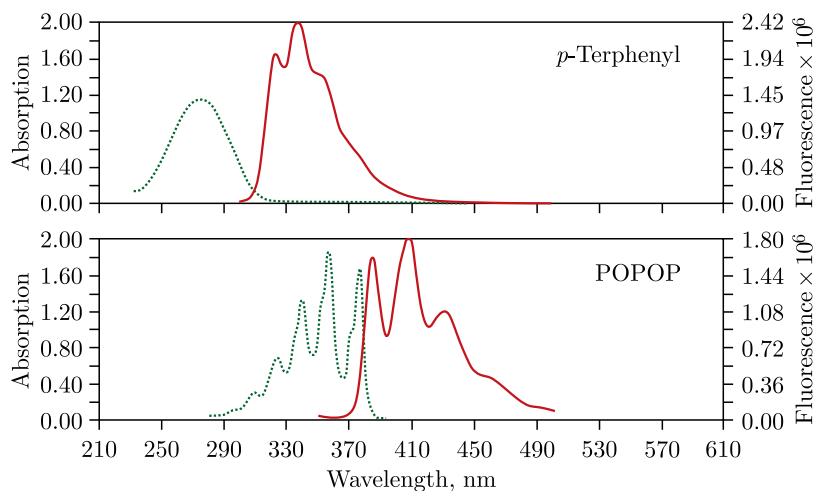


Рис. 2. Спектры поглощения (левая шкала) и высвечивания (правая шкала) сместителей спектра РТР и РОРОР [6]

Блок-схема экспериментального стенда приведена на рис. 3. При измерениях использовались два тестовых и два контрольных кубика. Свет в кубиках захватывался спектросмещающими волокнами Kuraray Y-11 диаметром 1 мм и передавался на два МРРС Hamamatsu S13360-1350CS. Концы волокон были отполированы. Тестовые кубики располагались на расстоянии 100 мм, а контрольные — на 60 мм от МРРС. Контрольные кубики не смещались со своего положения в процессе измерений. Также был использован дополнительный калибровочный кубик, в котором закреплен неподвижно прозрачный световод для того, чтобы исключить фактор его смещения внутри кубика на интенсивность свечения в кубике. Этот кубик, в случае необходимости, мог помещаться поочередно на конец одного или второго волокна и выступал в качестве источника света с постоянной интенсивностью при калибровке каналов.

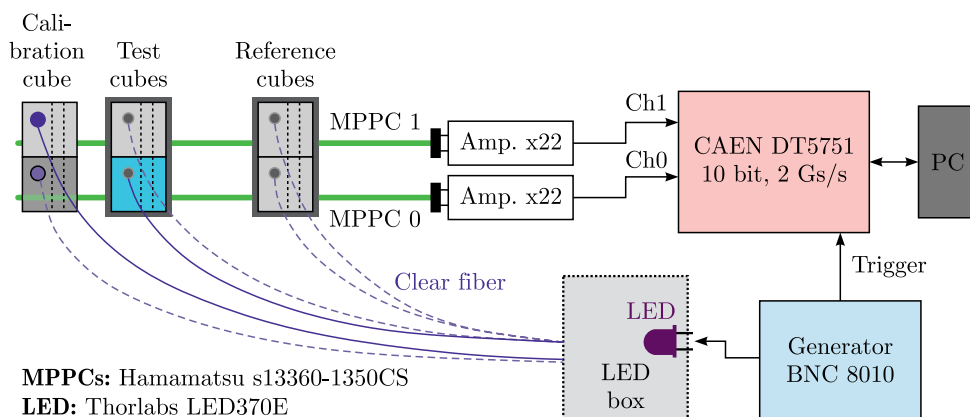


Рис. 3. Схема экспериментального стенда

Сигналы с МРРС через низкошумящие усилители собственной разработки на базе ОУ ОРА847 с 22-кратным усилением поступали на дигитайзер CAEN DT5751 (10 bit, 2 Gs/s). Управление светодиодом LED370E осуществлялось при помощи генератора сигналов BNC 8010, который одновременно посылал триггерный сигнал на дигитайзер. Длина импульса генератора составляла 15 нс, частота импульсов — 800 Гц. Свет от светодиода по прозрачному световоду инжектировался в один из двух тестовых кубиков или в один из двух контрольных кубиков. Для получения более равномерной засветки кубика изнутри на конце световода был сформирован конический рассеиватель путем обтачивания на абразивном материале. Этот рассеиватель вводился на половину глубины вертикального сквозного отверстия. Внешний вид конического рассеивателя и свечение кубика при переизлучении света от рассеивателя показаны на рис. 4.

Рабочее напряжение подбиралось индивидуально для каждого МРРС таким образом, чтобы их коэффициенты усиления были одинаковыми.

На рис. 5 представлены типичные осциллограммы сигналов с двух МРРС, записанные при помощи дигитайзера. Видно, что амплитуда сигналов от кубика 0, в который производится инжекция света, на порядок больше амплитуды сигналов от соседнего кубика 1, в который свет попадает в результате утечки из кубика 0.

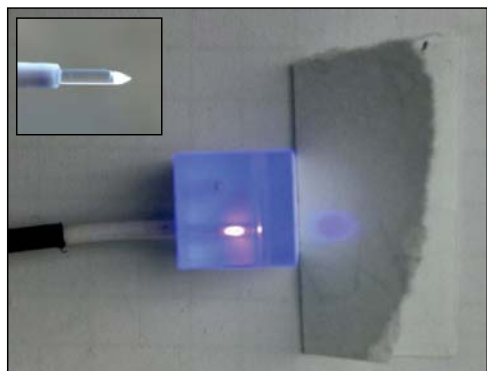


Рис. 4. Свечение инжектирующего световода внутри кубика (для наглядности с верхней грани кубика удалено отражающее покрытие). На вставке в левом верхнем углу показан конический рассеиватель на конце инжектирующего световода

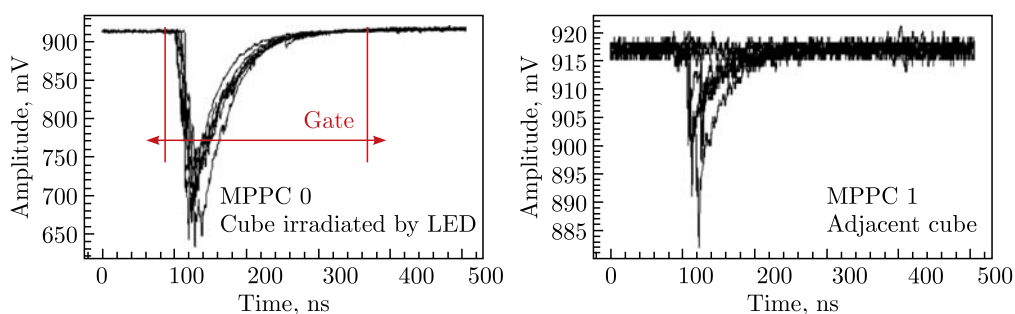


Рис. 5. Типичные осциллограммы сигналов с МРРС 0 и МРРС 1: слева показаны сигналы с кубика 0, в который производилась инжекция света, справа — с кубика 1, в котором регистрировались световые утечки

При последующей обработке данных сигналы интегрировались в течение 285 нс для построения распределений зарядов в относительных единицах, которые затем пересчитывались в фотоэлектроны при помощи калибровочных коэффициентов. Эти коэффициенты были получены для каждого канала с помощью калибровочных спектров в режиме низкой интенсивности свечения инжектирующего светодиода. Примеры калибровочных спектров приведены на рис. 6.

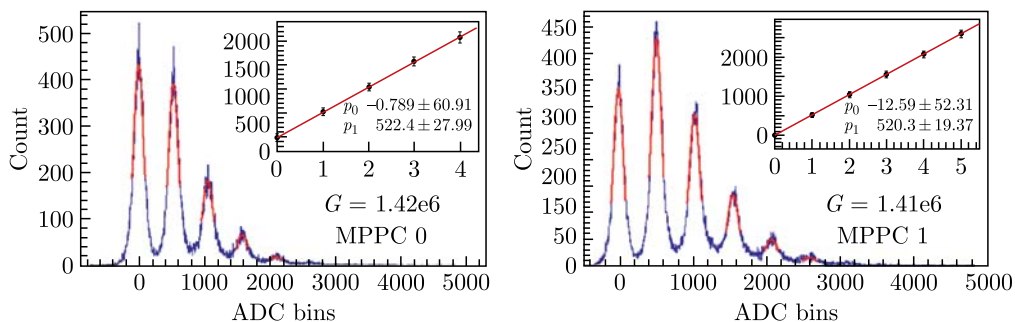


Рис. 6. Калибровочные спектры, полученные при интегрировании сигналов с МРРС 0 и МРРС 1

Для оценки доли непереизлученного света от светодиода в спектре излучения сцинтиллятора проведены исследования с использованием монохроматора спектрофотометра ЛОМО СФ-46 (изготовитель «ЛОМО», Санкт-Петербург, снят с производства). Для этого был подготовлен образец кубика, у которого при помощи полировки был удален отражающий слой на одной грани, параллельной отверстию, через которое инжестировался свет, и отстоящей от него на 2,5 мм. Свет от светодиода инжестировался при помощи световода в образец и, переизлучаясь, попадал через прозрачную грань кубика на входную щель спектрометра. Интенсивность свечения светодиода подобрана так, чтобы сигнал с подсвечиваемого кубика примерно равнялся сигналу с кубика при прохождении через него минимально ионизирующей частицы.

Также отдельно был исследован спектр возбуждающего светодиода путем подачи света от световода на входную щель спектрометра.

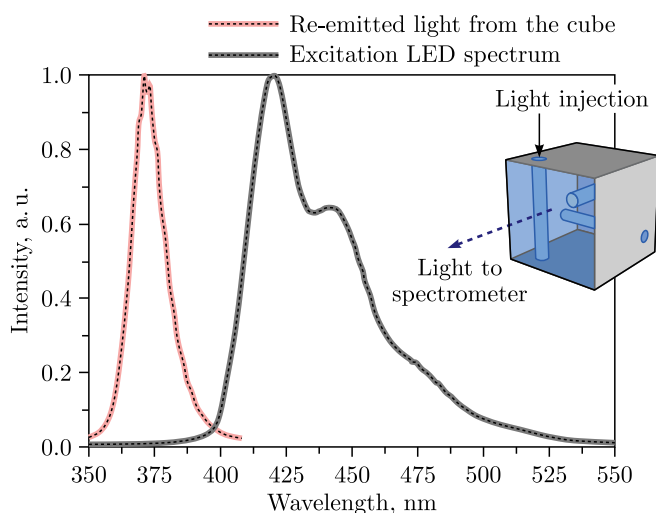


Рис. 7. Спектр излучения кубика при возбуждении светодиодом и спектр светодиода, измеренные с использованием монохроматора спектрофотометра СФ-46. Результаты представлены в относительных единицах

Результаты представлены на рис. 7. Как можно видеть, прямой свет от инжестировующего светодиода практически полностью поглощается внутри кубика на расстоянии 2,5 мм.

ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВЫХ УТЕЧЕК

Измерения утечек проводились для нескольких различных конфигураций: соседние кубики изолированы друг от друга черной бумагой; смежные отверстия в кубиках ничем не закрыты; смежные отверстия в кубиках закрыты непрозрачными заглушками; в смежные отверстия в кубиках вставлен отрезок спектросмещающего волокна длиной 50 мм.

Инжестия света световодом производилась поочередно в каждый из кубиков в паре.

На рис. 8 и 9 приведены типичные спектры сигналов с кубиков, полученные в ходе обработки экспериментальных данных.

Для оценки систематической погрешности измерения светосбора с кубиков проведены две серии по 10 измерений контрольной пары кубиков. По результатам измерений определено, что систематическая погрешность измерения светосбора не превышает 1,2%.

Для исследования влияния нагрева на светосбор со сцинтилляционных кубиков и световые утечки были выбраны десять пар кубиков. Первые пять пар кубиков выдерживались при температуре 60 °С в течение 24 ч, следующие пять пар выдерживались при 60 °С в течение 72 ч. Нагрев проводился в промышленной термостатической камере, позволяющей поддерживать заданную температуру в пределах $\pm 0,1$ °С. Измерения светосбора с кубиков и световых утечек проводились до и после нагрева

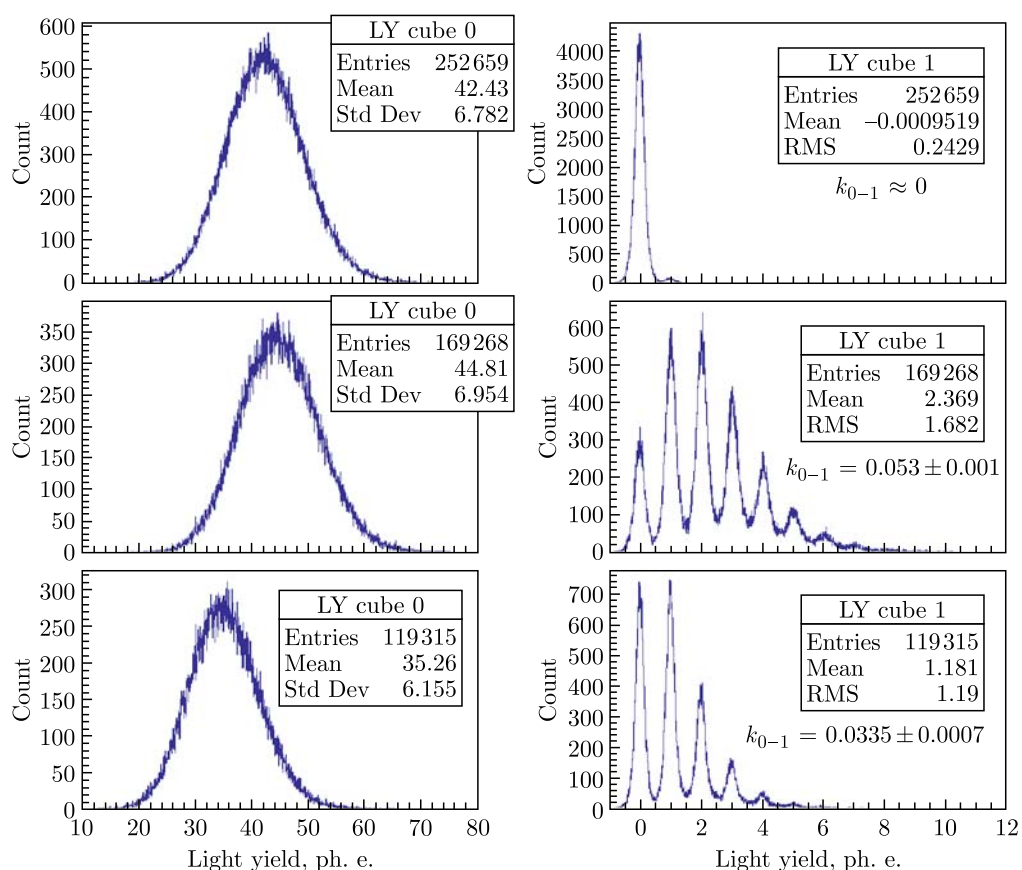


Рис. 8. Спектры сигналов с кубиков при инъекции света в кубик, подключенный к каналу 0. Сверху вниз: соседние кубики изолированы друг от друга черной бумагой; смежные отверстия в кубиках ничем не закрыты; смежные отверстия в кубиках закрыты непрозрачными заглушками. Значения коэффициентов k_{0-1} , приведенные для каждого случая, рассчитаны по формуле (1)

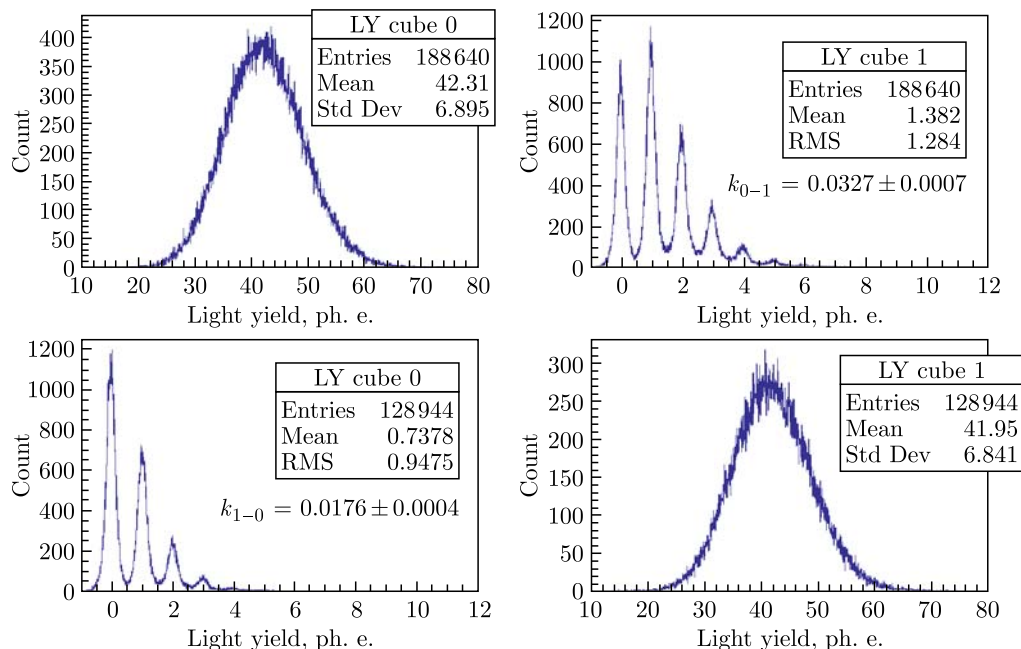


Рис. 9. Спектры сигналов с кубиков в случае, когда в смежные отверстия в кубиках вставлен отрезок спектросмещающего волокна длиной 50 мм. Верхние спектры получены при инъекции света в кубик, подключенный к каналу 0, нижние — при инъекции света в кубик, подключенный к каналу 1. Значения коэффициентов k_{0-1} и k_{1-0} рассчитаны по формуле (1)

кубиков. После нагрева исследования кубиков проводились через 20 ч их выдержки при комнатной температуре.

Для воссоздания условий, приближенных к работе кубиков в составе мишени, в их смежные отверстия помещался отрезок спектросмещающего волокна длиной 50 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно формуле (1) были рассчитаны значения k_{0-1} и k_{1-0} для случаев, когда свет инжектировался в кубик, расположенный в 0-м и 1-м каналах соответственно, для всех рассмотренных конфигураций. Результаты измерений световых утечек представлены в таблице.

Наибольшая величина утечек через грань получена при открытом смежном отверстии кубиков. Очевидно, это объясняется дополнительными утечками света именно через это отверстие.

Можно видеть, что в случаях, когда смежные отверстия в кубиках закрыты непрозрачными заглушками, и в случаях, когда в смежные отверстия в кубиках вставлено спектросмещающее волокно, значения $\langle k \rangle$ близки, что говорит о том, что свет перетекает из кубика в кубик в основном через боковые поверхности, покрытые отражающим слоем, а не через зазоры вокруг спектросмещающего волокна (напомним, что диаметр отверстия на 0,5 мм больше диаметра волокна).

Результаты измерений световых утечек через одну грань кубика

Конфигурация измерения	k_{0-1}	k_{1-0}	$\langle k \rangle$
Между кубиками расположена черная бумага	≈ 0	≈ 0	0
Смежные отверстия в кубиках ничем не закрыты	$0,053 \pm 0,001$	$0,0287 \pm 0,0006$	0,041
Смежные отверстия в кубиках закрыты непрозрачными заглушками	$0,0327 \pm 0,0007$	$0,0187 \pm 0,0004$	0,026
В смежные отверстия в кубиках вставлено спектросмещающее волокно	$0,0335 \pm 0,0007$	$0,0176 \pm 0,0004$	0,026

Как видно из таблицы, для всех случаев значения k_{0-1} больше, чем k_{1-0} . Это связано с асимметричностью расположения отверстий, через которые инжестировался свет относительно грани, через которую происходила утечка света. Это указывает, что утечки света через грани зависят от места прохождения частицы через кубик. При сравнении утечек через две противоположные грани при прохождении частицы большая утечка в соседний кубик будет происходить через грань, расположенную ближе к треку. Возможно, этот эффект может быть использован для более точного восстановления треков частиц.

При измерении утечек со вставленным в смежное отверстие волокном получено среднее значение коэффициента k , равное 0,026. Это значение сравнимо с резуль-

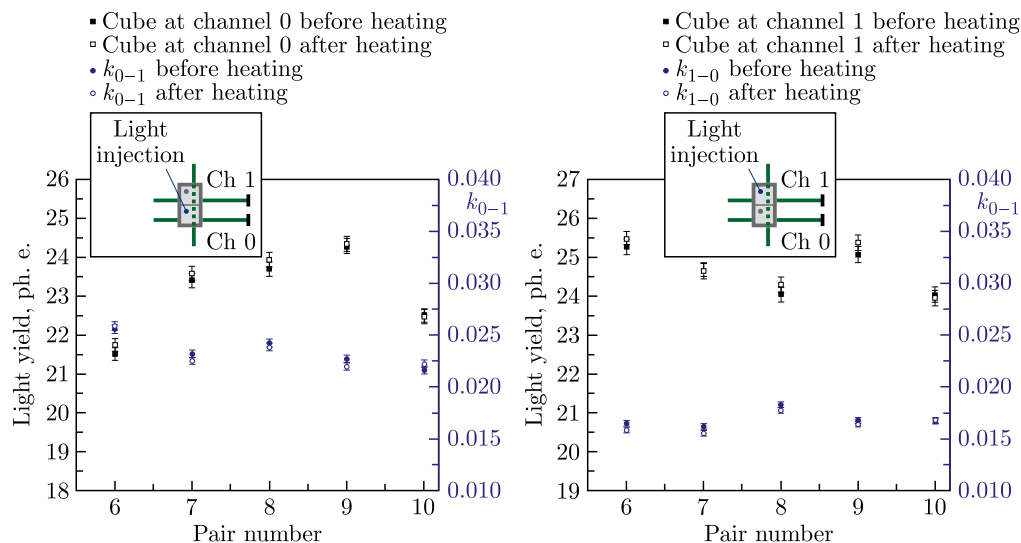


Рис. 10. Светосбор с кубиков и значения световых утечек при инжестии света в кубик на 0-м канале (левый график) и в кубик на 1-м канале (правый график). Значения светосбора показаны на левых шкалах, а утечек — на правых. Можно видеть, что светосбор с кубиков и световые утечки после нагрева также остались на прежнем уровне. Ошибки измерений на всех графиках учитывают систематические погрешности, оцененные с помощью пары контрольных кубиков

татами, полученными в работе [5] при исследовании прототипа детектора на пучке ускорителя в ЦЕРН.

В результате измерений светосбора с кубиков и световых утечек до и после нагрева в течение 24 ч в первых пяти парах кубиков не выявлено изменений после нагрева.

Результаты измерения светосбора с кубиков и световых утечек до и после выдерживания кубиков при температуре 60 °С в течение 72 ч приведены на рис. 10.

ВЫВОДЫ

Примененный метод возбуждения флуоресценции в кубиках при помощи ультрафиолетового светодиода позволяет без использования источников ионизирующего излучения оперативно и достоверно оценивать световые утечки из сцинтилляционных кубиков.

Проведены измерения коэффициента k , характеризующего утечки света в соседний кубик, для нескольких вариантов состояния смежных отверстий в кубиках.

Установлено, что в случае, когда в смежные отверстия соседних кубиков вставлено спектросмещающее волокно, среднее значение коэффициента k составляет 0,026, а утечка света из кубика происходит через его грань, покрытую диффузным отражателем, а не через смежные отверстия в кубиках со вставленным спектросмещающим волокном.

Обнаружено, что значение коэффициента k зависит от расстояния от места инжекции света в кубик до его грани. Этот эффект может быть использован для более точного восстановления треков частиц в детекторе при учете утечек света в соседние кубики через противоположные грани.

После выдерживания кубиков при температуре 60 °С в течение 24 ч, а также в течение 72 ч не замечено изменений величины светосбора с кубиков и световых утечек из них. Это указывает на то, что сцинтилляционные свойства кубиков и их отражающее покрытие не деградировали после такого нагрева.

Благодарности. Авторы благодарят В. Маяцкого, И. Романова и коллектив ООО «Унипласт» (Владимир, Россия) за разработку технологии и изготовление сцинтилляционных кубиков. Эта работа частично поддержана грантом РФФИ № 19-12-00325 и грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Нейтрино и астрофизика частиц» № 075-15-2020-778.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abe K. et al. T2K ND280 Upgrade. Technical Design Report. arXiv:1901.03750.
2. Blondel A. et al. A Fully-Active Fine-Grained Detector with Three Readout Views // J. Instrum. 2018. V. 13. P. P02006.
3. Kudenko Yu. G., Littenberg L. S., Mayatsky V. A., Mineev O. V., Ershov N. V. Extruded Plastic Counters with WLS Fiber Readout // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 469. P. 340–346.
4. Mineev O. et al. Beam Test Results of 3D Fine-Grained Scintillator Detector Prototype for a T2K ND280 Neutrino Active Target // Nucl. Instr. Meth. A. 2019. V. 923. P. 134–138.

5. *Blondel A. et al.* The SuperFGD Prototype Charged Particle Beam Tests // *J. Instrum.* 2020. V. 15. P. P12003.
6. *Du H., Fuh R.-C. A., Li J., Corkan L. A., Lindsey J. S.* PhotochemCAD. A Computer-Aided Design and Research Tool in Photochemistry and Photobiology // *Photochem. Photobiol.* 1998. V. 68. P. 141142.

Получено 3 июня 2022 г.