

УДК 539.1

ИЗУЧЕНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ОТКЛИКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ТАЙЛОВ ДЛЯ ВЫСОКОГРАНУЛЯРНЫХ КАЛОРИМЕТРОВ

С. С. Корпачев^{1,2}, М. В. Чадеева^{1,2}

Современной тенденцией в калориметрии является повышение гранулярности калориметров. Высокогранулярный адронный калориметр, собранный из сцинтилляционных тайлов (ячеек) со считыванием сигнала кремниевыми фотоумножителями, разработан и тестируется коллаборацией CALICE. В работе представлено исследование однородности отклика тайла на минимально ионизирующие частицы, а также сравнение этих экспериментальных измерений с моделированием на основе пакета Geant4.

Ключевые слова: сцинтилляционные тайлы, однородность, высокогранулярный калориметр.

Введение. Коллаборация CALICE разрабатывает высокогранулярные калориметры для будущих экспериментов на коллайдерах. С 2006 по 2012 годы был проведен ряд успешных испытаний прототипов электромагнитных и адронных калориметров с беспрецедентной гранулярностью на тестовых пучках [1]. Сейчас разрабатывается новый технологический прототип адронного калориметра на базе сцинтиллятор-кремниевый фотоумножитель (SiPM). Главная цель этой разработки – тестирование новой технологии прямого считывания в системе сцинтиллятор-SiPM и демонстрация масштабируемости встроенной электроники, методов калибровки и режимов работы. Выбор конструкции с прямым считыванием оптического сигнала с помощью SiPM без спектро-смещающего волокна обусловлен требованиями массового производства, чтобы гарантировать реалистичность временных затрат на сборку адронного калориметра из ~8 миллионов тайлов (ячеек) для детектора ILD на будущем линейном коллайдере [2]. По результатам тестирования ячеек различной геометрии [3, 4] была выбрана форма

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: korpach@lebedev.ru.

² НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31.

ячейки с лункой на большой поверхности, которая позволяет обеспечить приемлемую однородность отклика.

Образцы и экспериментальная установка. В работе представлены результаты тестирования и моделирования образцов тайлов, изготовленных для технологического прототипа адронного калориметра CALICE. Тайл изготовлен из материала VICRON408 на основе сцинтиллятора из поливинилтолуола и имеет размеры $30 \times 30 \times 3$ мм³ в направлениях x , y и z , соответственно. Радиус лунки в центре одной из больших плоскостей равен 4.5 мм, а её глубина равна 1.6 мм. Тайл обернут в фольгу 3M™ ESR, которая является пленкой с улучшенными оптическими свойствами и очень высокой отражающей способностью. Обёртка имеет отверстие в центре над лункой для размещения SiPM и дополнительное отверстие для калибровочных целей.

Экспериментальная установка состоит из движущегося столика и неподвижной подставки. Подвижный столик позволяет выполнять прецизионное сканирование в плоскости xy , на нем закреплен β -радиоактивный источник (⁹⁰Sr) над и триггерная ячейка под измеряемым тайлом, а электроны из источника испускаются перпендикулярно плоскости xy . Появление сигнала в триггерной ячейке означало сквозное прохождение электрона через исследуемый тайл. Таким образом триггерная ячейка позволяла отсеять сигнал от низкоэнергетических электронов. Измеряемая ячейка в обёртке помещается на неподвижную плоскость. Плата с SiPM расположена над отверстием в обёртке из фольги. Для измерений был использован SiPM фирмы КЕТЕК с рабочим окном 2.2×2.2 мм², имеющий 12100 пикселей.

Электроны из источника, достигающие триггерной ячейки, имеют энергии от ~ 1.5 до 2.28 МэВ и могут имитировать минимально ионизирующие частицы. Шаг сканирования в плоскости xy был 1.5 мм в обоих направлениях, область сканирования имела размер $\sim 35.0 \times 35.0$ мм², чтобы гарантировать охват всей поверхности ячейки. Измеренная амплитуда в отсчетах АЦП записывалась в ASCII-файл на каждом шаге сканирования. Сигнал в единицах зарегистрированных фотоэлектронов вычислялся путем деления амплитуды в отсчетах АЦП на измеренный коэффициент усиления SiPM в единицах АЦП.

Моделирование сцинтилляционной ячейки. Для моделирования были использованы методы пакета Geant4 [5], описывающие транспорт оптических фотонов. Геометрические параметры модели соответствовали экспериментальному образцу, включая размеры тайла, триггерного тайла и β -источника (диаметром 2 мм), толщину фольги и размеры SiPM и его чувствительного окна. Пакет Geant4 позволяет задать оптические

свойства для всех необходимых материалов и поверхностей. Из наиболее важных параметров моделирования следует отметить характеристики сцинтиллятора BICRON408 по данным производителя: световой выход – 10000 фотонов на МэВ, коэффициент преломления – 1.58, длина поглощения – 0.6 м, а также его спектры излучения и поглощения. Коэффициент отражения фольги был смоделирован в зависимости от длины волны падающего фотона и менялся в диапазоне 0.9–0.98.

Результатом моделирования сигнала являлось число фотонов, образованных в результате прохождения частицы через измеряемый тайл и попавших в чувствительное окно SiPM. Поскольку процессы детектирования в самом кремниевом фотоумножителе не моделировались, были дополнительно введены детекторные эффекты. При этом количество фотоэлектронов в SiPM вычислялось как случайная величина из распределения Пуассона со средним, равным количеству фотонов, попавших в окно SiPM, умноженному на эффективность SiPM. Для данного SiPM эффективность была принята равной 0.15 и учитывала квантовую эффективность и геометрическую эффективность чувствительного окна SiPM. К сигналу был добавлен экспериментально измеренный шум, имеющий распределение Гаусса со средним и среднеквадратичным отклонением, равными 3 и 1.5 фотоэлектрона, соответственно.

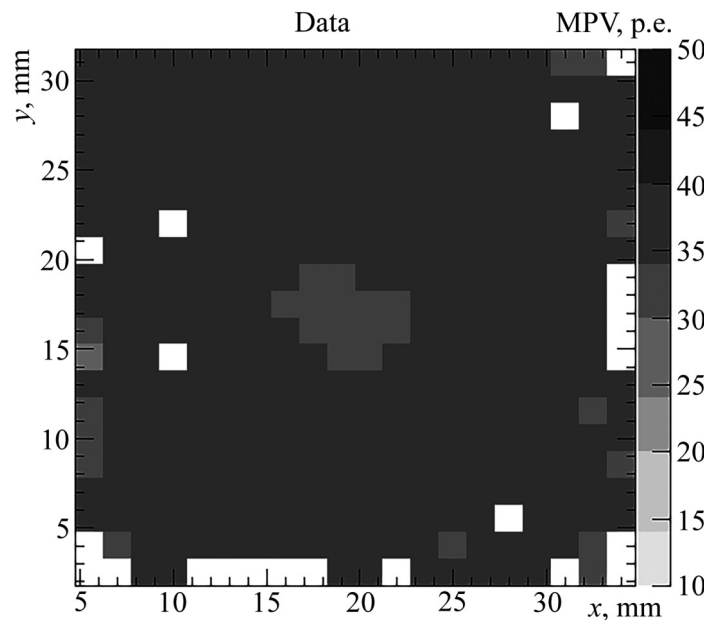


Рис. 1: Экспериментальное распределение наиболее вероятных значений отклика на минимально ионизирующую частицу.

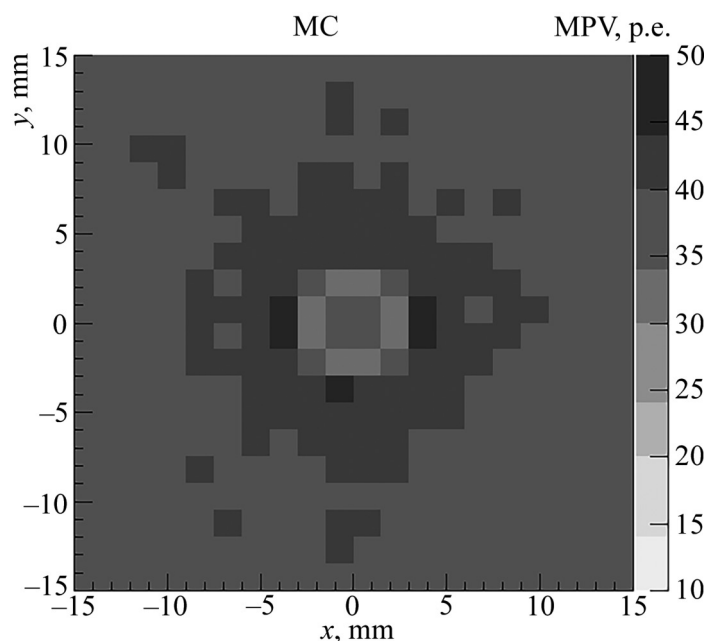


Рис. 2: Моделированное распределение наиболее вероятных значений отклика на минимально ионизирующую частицу.

Результаты и выводы. Отклик на минимально ионизирующую частицу был экспериментально измерен и смоделирован для разных координат прохождения частицы в плоскости xy с шагом 1.5 мм. Было получено хорошее согласие между формами экспериментальных и модельных распределений отклика. При получении сигнальных распределений в экспериментальных данных был дополнительно выполнен отбор событий с минимальным значением отклика на уровне 200 отсчетов АЦП для отделения сигнала от шума. Для определения наиболее вероятного значения отклика (MPV) в эксперименте и моделировании было проведено фитирование полученных распределений в каждой точке сканирования функцией Гаусса в диапазоне ± 1.5 стандартного отклонения от среднего значения. Для получения устойчивых результатов была использована двухэтапная процедура фитирования.

По результатам фитирования были получены распределения MPV по плоскости ячейки для эксперимента и моделирования, показанные на рис. 1 и 2, соответственно. Пустые (белые) квадратики на рис. 1 соответствуют точкам, где число сигнальных событий в экспериментальных данных недостаточно для надежного фитирования из-за большого уровня шума или из-за экранирования элементами установки. Для каждого из показанных распределений были вычислены среднеквадратичное отклонение от

среднего (RMS) и среднее значение (Mean) по всем точкам сканирования. Величина однородности определялась как отношение RMS/Mean. Так как точное расположение SiPM относительно поверхности тайла с лункой в эксперименте было неизвестно, в моделировании были исследованы три варианта: положение чувствительного окна SiPM на уровне поверхности тайла, а также положения чувствительного окна SiPM на 0.5 мм и 0.95 мм ниже поверхности тайла.

Полученное экспериментальное значение однородности отклика на минимально ионизирующую частицу равно $95.5 \pm 3.6\%$ при среднем числе фотоэлектронов 37.1 ± 0.6 . Моделированное значение однородности, усреднённое по трём вариантам положения SiPM, составляет $96.4 \pm 3.4\%$, а среднего числа фотоэлектронов – $37.3 \pm 3.7\%$, что находится в хорошем согласии с экспериментальными данными. Измеренные значения отклика и его однородности свидетельствуют о том, что данные тайлы из сцинтиллятора BICRON408 удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ячейкам проектируемого детектора ILD.

Авторы выражают благодарность Б. М. Бобченко, В. Ю. Русинову и Е. И. Тарковскому за предоставленное оборудование и помощь в проведении измерений. Работа была выполнена при поддержке гранта МОН 14.W03.31.0026.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] C. Adloff et al., Journal of instrumentation **7**, P09017 (2012). (*arXiv:1207.4210*).
- [2] T. Behnke T (ed.) et al., The ILC TDR **4**, Detectors *arXiv:1306.6329*, (2013).
- [3] F. Abu-Ajamieh et al., Nucl. Instrum. Meth. A**659**, 348 (2011).
- [4] B. Bobchenko et al., Nucl. Instrum. Meth. A**787**, 166 (2015).
- [5] S. Agostinelli et al., Nucl. Instrum. Meth. A**506**, 250 (2003).

Поступила в редакцию 15 августа 2018 г.

Печатается по материалам VII межинститутской молодёжной конференции “Физика элементарных частиц и космология 2018”, Москва, ФИАН, 2018.