

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.17

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОДИОДОВ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ ДЛЯ
УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
КАЛОРИМЕТРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМАТА СВИНЦА

© 2018 г. К. А. Балыгин^a, М. С. Ипполитов^{a, *}, А. И. Климов^a, В. А. Лебедев^a,
В. И. Манько^a, Е. А. Мелешко^a, Ю. Г. Сибиряк^a, А. В. Акиндинов^b, В. И. Изучеев^c,
В. А. Арефьев^d, А. С. Водопьянов^d, Н. В. Горбунов^d, Н. А. Кузьмин^d, П. В. Номоконов^d,
Ю. П. Петухов^d, И. А. Руфанов^d, Д. В. Будников^e, О. В. Вихлянцев^e, В. А. Деманов^e,
Н. В. Завьялов^e, А. В. Курякин^e, А. Д. Тумкин^e, С. В. Фильчагин^e

^a Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

^b Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова Национального исследовательского
центра “Курчатовский институт”, Москва, Россия

^c Институт физики высоких энергий им. А.А. Логанова Национального исследовательского центра
“Курчатовский институт”, Протвино Московской обл., Россия

^d Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна Московской обл., Россия

^e РФЯЦ ВНИИ экспериментальной физики,
Саров, Нижегородской обл., Россия

* E-mail: Mikhail.Ippolitov@cern.ch

Поступила в редакцию 26.12.2017 г.
После доработки 23.01.2018 г.

Показано, что увеличение площади фотодетекторов позволяет эксплуатировать электромагнитный калориметр PHOS эксперимента ALICE при комнатной температуре с лучшими спектротметрическими характеристиками. Приведены результаты исследования линейности калориметра в диапазоне энергий 1–110 ГэВ при использовании как лавинных фотодиодов Hamamatsu S8664-1010 большой площади (10×10 мм²), так и матриц кремниевых фотоумножителей с чувствительной площадью 6×6 мм², собранных из MPPC Hamamatsu S12572-015C. Калориметр на основе лавинных фотодиодов, в отличие от калориметра с матрицами кремниевых фотоумножителей, практически линеен в исследованном диапазоне энергий.

DOI: 10.1134/S003281621804016X

1. ВВЕДЕНИЕ

Калориметры в современной физике высоких энергий используются для измерения полной энергии частиц, образующих в калориметре электромагнитный и адронный ливни. Калориметры обычно представляют собой спектрометры, состоящие из большого числа детектирующих элементов, перекрывающих значительный телесный угол (иногда практически до полного телесного угла величиной 4π) [1].

Электромагнитный калориметр предназначен для измерения энергии частиц, образующих электромагнитный ливень. Как правило, длина детектирующих элементов (д.э.) электромагнитного калориметра составляет около 20 радиационных длин X_0 . Это обеспечивает практически полное поглощение энергии частиц вплоть до

энергий 100–150 ГэВ. Поперечные размеры д.э. выбираются порядка радиуса Мольера R_m , в результате энергия электромагнитного ливня выделяется в нескольких соседних д.э., что позволяет определить не только энергию, но и координату попадания частицы, вызвавшей ливень. Основой д.э. служит плотное вещество с высоким значением заряда ядра, что обеспечивает компактность детектирующего элемента.

В последнее время в электромагнитной калориметрии широко используются сцинтиллирующие кристаллы вольфрамата свинца $PbWO_4$ (далее PWO), обладающие весьма малыми значениями X_0 и R_m , соответственно составляющими 0.9 см и 2 см. Кристаллы PWO с поперечным размером 22×22 мм и длиной 180 мм применяются в д.э. электромагнитного калориметра (PHOton Spec-

trometer) эксперимента ALICE (A Large Ion Collider Experiment) [2, 3] на коллайдере LHC в CERN, Женева, Швейцария. Преобразование света сцинтилляций от электромагнитного ливня в электрический сигнал осуществляется с помощью лавинных фотодиодов (л.ф.д.) S8148 (S8664-55) производства HAMAMATSU [4] с чувствительной площадью $5 \times 5 \text{ мм}^2$.

В физические задачи PHOS входит измерение спектров фотонов в широком энергетическом диапазоне — от прямых термальных фотонов, которые излучаются кварк-глюонной плазмой и имеют энергию в диапазоне 1–10 ГэВ, до жестких фотонов из струй с энергиями до 100 ГэВ и выше.

Преобразование токового сигнала л.ф.д. в импульс напряжения осуществляется низкошумящим зарядочувствительным предусилителем (з.ч.п.) с приведенным к входу эквивалентным шумовым зарядом менее $500e^-$. Дальнейшая обработка сигнала происходит в платах считывающей электроники. Каждая плата обеспечивает прием, преобразование и передачу данных для 32-х детектирующих элементов [5].

Для повышения точности выделения прямых фотонов при низких энергиях рабочей температурой PHOS была выбрана температура -25°C . По сравнению с работой при комнатной температуре световыход кристаллов в этом случае увеличивается в 3 раза, а шумы л.ф.д. и з.ч.п. уменьшаются.

Работа при отрицательной температуре требует поддержания влажности в объеме спектрометра ниже точки росы. Для этого модули PHOS герметизируются, а их внутренний объем продувается сухим азотом. Отметим, что герметизация объема спектрометра создает значительные трудности обслуживания электроники PHOS.

Использование низкошумящей электроники вместе с охлаждением обеспечивает энергетический эквивалент шума 5–7 МэВ, что позволяет получить разрешение по инвариантной массе двух γ -квантов лучше $5 \text{ МэВ}/c^2$. Верхняя граница динамического диапазона PHOS составляет 100 ГэВ, что соответствует максимальной выделенной энергии в одном д.э. $\sim 80 \text{ ГэВ}$ [2]. Верхняя граница динамического диапазона детектирующего элемента ограничена возможностью плат считывающей электроники.

В настоящее время обсуждается возможность модернизации PHOS с целью расширения динамического диапазона д.э. спектрометра от 80 до 160 ГэВ, улучшения временного разрешения σ_t с 4–5 до 0.5 нс при выделенной энергии электромагнитного ливня (энерговыведении) в д.э. $\sim 1 \text{ ГэВ}$ и поиска решений, позволяющих эксплуатировать PHOS без ухудшения характеристик при комнатной температуре.

Целью данной работы являлось исследование при комнатной температуре спектрометрических характеристик д.э. спектрометра PHOS эксперимента ALICE с фотоприемниками, имеющими большую чувствительную площадь, применение которых возможно при модернизации д.э. Использовались фотоприемники двух типов.

– Матрицы кремниевых фотоумножителей (Si-ф.э.у.) с чувствительной площадью $6 \times 6 \text{ мм}^2$. Матрицы размерностью 2×2 собраны из параллельно соединенных Si-ф.э.у. типа MPPC HAMAMATSU S12572-015C. Отобранные в состав матриц Si-ф.э.у. имели близкие напряжения пробоя, площадь их микроячейки составляла $15 \times 15 \text{ мкм}^2$, общая чувствительная площадь — $3 \times 3 \text{ мм}^2$.

– Лавинные фотодиоды HAMAMATSU S8664-1010 с размером чувствительной области $10 \times 10 \text{ мм}^2$.

Для измерения энергетического разрешения сборок 3×3 д.э. были изготовлены по 9 детектирующих элементов с фотодетекторами матрицы Si-ф.э.у., л.ф.д. HAMAMATSU S8664-1010 и л.ф.д. HAMAMATSU S8148 (S8664-55).

Измерения были проведены в 2016 г. на тестовых пучках T9 (в диапазоне импульсов 1–10 ГэВ/с) синхротрона PS и тестовом пучке H6 (в диапазоне импульсов 10–110 ГэВ/с) синхротрона SPS в CERN [6].

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для измерений на пучке собраны 3 сборки в виде массива 3×3 и установлены в прототипе калориметра PHOS, описанном в [7]. Для установки д.э. прототип имеет ячеистую структуру из нержавеющей стали толщиной 100 мкм, оклеенную внутри светоотражающим материалом. Прототип позволяет размещать до 256 д.э. в виде матрицы размером до 16×16 .

В сборках с л.ф.д. были применены з.ч.п. действующего калориметра PHOS [7]. Отметим, что для измерения энергетического разрешения необходима, как минимум, сборка в виде массива 3×3 из девяти д.э., так как электромагнитный ливень высокой энергии поглощается в нескольких соседних д.э.

Из-за отличия геометрии контактов л.ф.д. S8664-1010 и S8664-55 соединение с предусилителем осуществлялось при помощи переходной платы.

Подача высоковольтного питания и съем сигналов с матриц Si-ф.э.у. осуществлялись через плату, в которую спаивались матрица Si-ф.э.у. Размер платы был таким же, как и платы з.ч.п., — $19 \times 19 \text{ мм}^2$.

Платы с фотодетекторами клеивались в алюминиевую опорную рамку, служившую одновре-

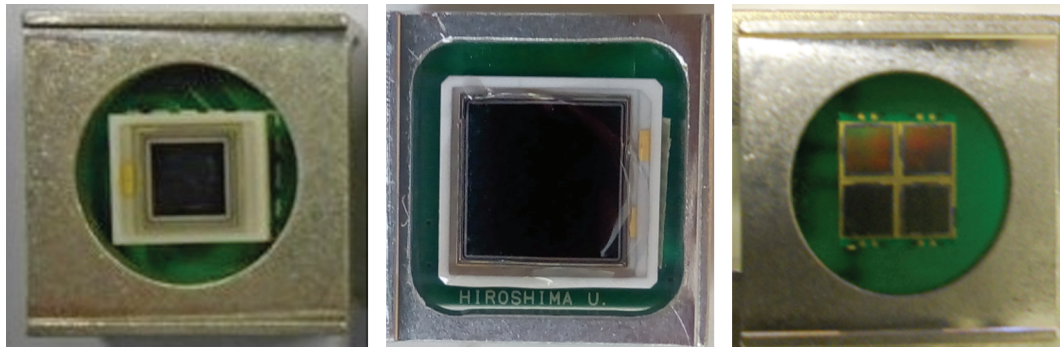


Рис. 1. Фотографии вклеенной в опорную рамку платы с з.ч.п. с впаянными фотодетекторами (вид со стороны фотодетекторов); з.ч.п., выполненный поверхностным монтажом, находится с противоположной от фотодетектора стороны. Размер рамки 22×22 мм. Слева — л.ф.д. и з.ч.п. действующего калориметра PHOS; в центре — з.ч.п. с л.ф.д. большого размера; справа — фотография матрицы Si-ф.э.у.

менно экраном. Фотографии плат с фотодетекторами в опорной рамке приведены на рис. 1.

Механическое соединение кристалла и фотодетектора в д.э. обеспечивалось при помощи оптической субстанции Cargille Meltmount™ Quick Stick™ производства Cargille Laboratories [8] с показателем преломления $n_d = 1.704$.

Прототип PHOS имел систему охлаждения и стабилизации температуры [7], позволяющую поддерживать температуру сборок в широком диапазоне с точностью лучше 0.1°C . В качестве рабочей была установлена температура $+17.5^\circ\text{C}$.

Прототип PHOS установлен на дистанционно-управляемом столе с возможностью перемещения по горизонтальной и вертикальной оси. Стол использовался для юстировки сборок относительно пучка частиц.

В эксперименте на вторичном пучке T9 синхротрона PS условия были во многом аналогичны условиям, описанным в [9] для пучка T10.

Пучок T9 позволял проводить измерения в диапазоне импульсов вторичных частиц от 1 до 10 ГэВ/с. Разброс импульса в пучке определялся шириной щели горизонтального коллиматора пучка и составлял во всем диапазоне энергий 1%. Количество электронов варьировалось от ~40% от общего количества частиц в пучке при 1–2 ГэВ/с до <1% при импульсах выше 7–8 ГэВ/с.

Для синхронизации системы сбора данных эксперимента с сигналом от попадания электрона пучка в детектор необходим так называемый триггерный сигнал (или триггер). Как и в [9], для отбора электронов в пучке использовался газовый пороговый черенковский счетчик. Триггером эксперимента, отвечающим электрону в пучке, являлось совпадение сигналов от газового черенковского счетчика и двух сцинтилляционных детекторов размером $10 \times 10 \times 0.5$ см, установленных перед прототипом PHOS. При настройке эксперимента для юстировки детектора относи-

тельно пучка в триггер включался сцинтилляционный счетчик с поперечным сечением 1×1 см².

Сигналы от триггерных детекторов по коаксиальным кабелям длиной 30 м подавались в экспериментальный домик, где размещалась электроника, вырабатывающая триггерный сигнал. Детальное описание аппаратуры и логики триггера приведено в [9].

Основной целью экспериментов, проводимых на пучке T9, было измерение кривой относительно-го энергетического разрешения в области энергий ниже 10 ГэВ, где основной вклад в энергетическое разрешение вносят шумы электроники и статистические флуктуации электромагнитного ливня.

Для сборок на основе л.ф.д. для усиления и формирования сигналов от з.ч.п. с последующим преобразованием сформированных сигналов в амплитудный и временной коды использовалась электроника, описанная в [10]. Электронику размещали на прототипе PHOS сразу после д.э. Интерфейсный блок для считывания информации был установлен в крейте КАМАК, расположенном на расстоянии 1 м от прототипа. В этом же крейте располагался интеллектуальный крейт-контроллер ССРС7 [9], считывающий информацию с блоков КАМАК. Для записи, хранения и on line обработки использовался стандартный РС, расположенный в экспериментальном домике.

Напряжение питания на л.ф.д., подаваемое согласно рекомендациям производителя, обеспечивало коэффициент усиления $M = 50$.

Для сборки из матриц Si-ф.э.у. быстрые отрицательные сигналы по коаксиальным кабелям длиной 3 м подавались на вход электронной карты, содержащей спектрометрические усилители и компараторы. Карты были изготовлены для пучковых испытаний в 2015 г. Карты электроники, так же как и в случае л.ф.д., устанавливались на прототипе PHOS. Спектрометрические усилители формировали положительные сигналы с по-

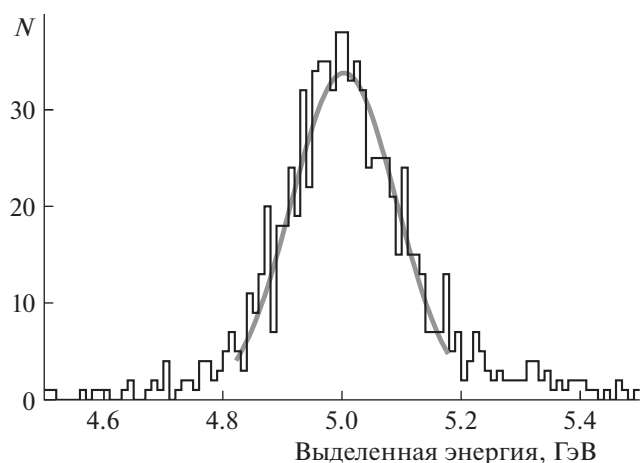


Рис. 2. Распределение суммы сигналов от всех элементов сборки из л.ф.д. S8664-1010. Энергия пучка 5 ГэВ. Сплошная линия – результат фитирования функцией Гаусса.

стоянной времени 1 мкс, в дальнейшем используемые для измерения энергии. Сформированные положительные сигналы по кабелям длиной 2 м передавались на вход а.ц.п. ORTEC AD-811, также установленного в кювете КАМАК.

На матрицы Si-ф.э.у. подавалось одинаковое напряжение смещения, обеспечивающее высокую эффективность регистрации фотонов.

После окончания эксперимента на пучке Т9 установка была перевезена на пучок Н6. Ввиду высоких значений импульса на этом пучке использование газовых черенковских счетчиков для отбора электронов неэффективно, а вторичные пучки Н6 имели высокое содержание адронной компоненты, поэтому мы использовали так называемый третичный пучок, состоящий на 98% из электронов. Это позволило в триггер эксперимента на пучке Н6 включить только сцинтилляционные счетчики и исключить из триггера газовой черенковский детектор. На этом пучке было проведено исследование линейности д.э.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Энергетическое разрешение

Электромагнитный ливень поглощается в многоканальном калориметре в нескольких детекторах. Например, электрон, попавший в центр сборки 3×3 , выделяет около 80% энергии в центральном детекторе [2], а оставшаяся энергия выделяется в соседних детекторах сборки. Поэтому для определения энергетического разрешения калориметра требуется суммирование сигналов от детекторов, в которых произошло энерговыделение выше порога. Процедура, применяемая для измерения энергетического разрешения сборки

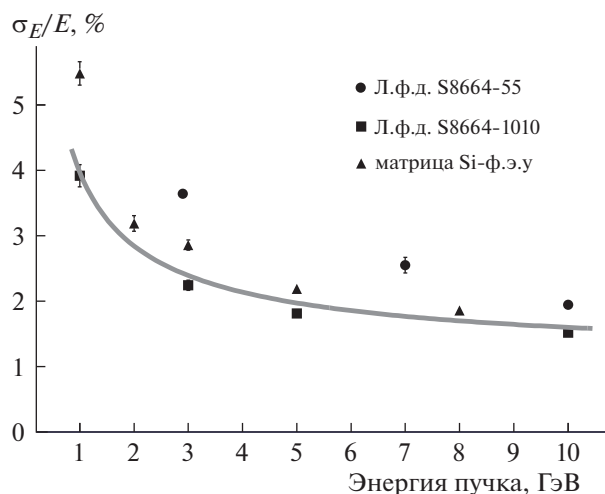


Рис. 3. Изменение относительного энергетического разрешения в зависимости от энергии пучка для фотодетекторов, использованных в данной работе при температуре 17.5°C. Кривая – результаты подгонки формулой (1) экспериментальных данных [7] при $T = -25^\circ\text{C}$.

3×3 и учитывающая конечные размеры пучка и утечки энергии из-за конечных размеров сборки, описана в [11]. Отметим, что характерный поперечный размер пучка в экспериментах составлял $\sim 1\text{--}2$ см. Поэтому для облучения пучком всех детекторов сборки помещалась на дистанционно-управляемый стол, который позволял менять положение относительно пучка в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Для построения распределения суммы сигналов от всех детекторов отбирались события, в которых электрон попадал в серединный квадрат размером 14×14 мм центрального детектора [11]. Такое распределение показано на рис. 2 для сборки из л.ф.д. S8664-1010. Вклад от фоновых событий в данном случае практически отсутствует.

На рис. 3 представлена суммарная кривая относительного энергетического разрешения для всех сборок, использованных в экспериментах 2016 г. на пучке Т9.

В качестве относительного энергетического разрешения бралось отношение дисперсии к положению максимума распределения Гаусса, входящего в фитирующую функцию [11]. Кривая на рисунке – результат подгонки экспериментальных точек работы [7] выражением

$$\sigma(E)/E = \sqrt{(a/E)^2 + (b/\sqrt{E})^2 + c^2}, \quad (1)$$

где $a = 0.013$ – шумовой параметр, $b = 0.0358$ – стохастический и $c = 0.0112$ – постоянный; E выражена в гигаэлектронвольтах. Данная кривая одновременно является верхней границей для энергетического разрешения, которым должен обладать PHOS. Предлагаемая модернизация д.э.

должна обеспечить энергетическое разрешение не выше этой линии.

При температуре $T = +17.5^\circ\text{C}$ энергетическое разрешение д.э. из л.ф.д. S8664-55 значительно хуже, чем из л.ф.д. большого размера и из этих же л.ф.д., но при $T = -25^\circ\text{C}$.

Стоит отметить, что энергетическое разрешение Si-ф.э.у. в виде матрицы 2×2 размером 6×6 мм лежит выше кривой, полученной по формуле (1). Применение матриц Si-ф.э.у. несколько больших размеров позволит получить нужное разрешение. При измерениях спектрометрических свойств в большом динамическом диапазоне надо учитывать существенный недостаток Si-ф.э.у. — их принципиальную нелинейность вследствие оптической связи между микроячейками и их конечного числа. Предварительно отметим, что в диапазоне 1–10 ГэВ д.э. с матрицами Si-ф.э.у. при оптимальной величине перенапряжения практически линейны и требуют лишь небольшой коррекции величины сигнала, не ухудшающей энергетического разрешения.

3.2. Линейность детектирующих элементов

Исследования на пучке позволяют определить линейность д.э., вклад в которую вносят кристалл, фотодетектор и последующая электроника. В качестве меры линейности выбрана величина $L = E_{\text{изм}}/E_{\text{пучка}}$, где $E_{\text{изм}}$ — это энергетический эквивалент сигнала в детектирующем элементе (или сумма сигналов от всех д.э. сборки с учетом их коэффициентов усиления), а $E_{\text{пучка}}$ — энергия пучка. Идеально линейный детектор имеет $L = 1$ во всем диапазоне.

Следует отметить, что поскольку большая часть ливня при попадании электрона в центр сборки выделяется в центральном д.э., именно им в основном определяется как линейность всей сборки, так и энергетическое разрешение.

На рис. 4 приведена зависимость величины L от энергии пучка для суммы сигналов от всех д.э. на основе л.ф.д. Hamamatsu S8664-1010 и д.э. на основе матриц Si-ф.э.у.

Незначительное уменьшение величины L с ростом энергии для л.ф.д. объясняется в основном утечками энергии электромагнитного ливня, вызванными конечными размерами сборки. Параметр L нормирован на 1 при $E_{\text{пучка}} = 1$ ГэВ и $E_{\text{пучка}} = 3$ ГэВ для д.э. на основе л.ф.д. и матриц Si-ф.э.у. соответственно.

Кремниевый фотоумножитель является принципиально нелинейным фотодетектором. Его нелинейность обусловлена работой микроячеек в гейгеровском режиме, при котором величина сигнала не зависит от количества попавших в микроячейку фотонов. Общий сигнал от Si-ф.э.у. представляет собой сумму сигналов от всех мик-

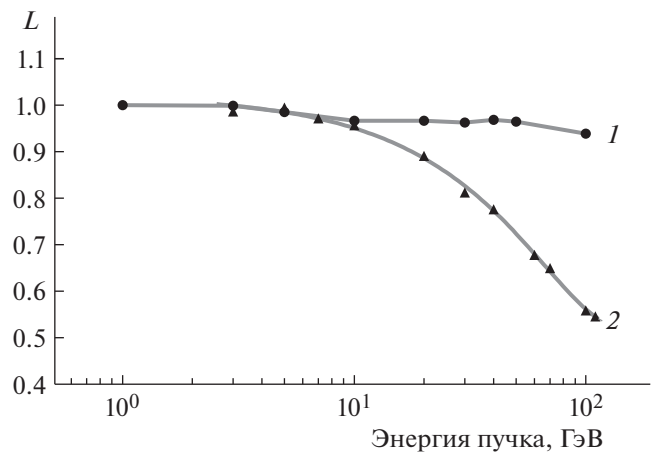


Рис. 4. Зависимость L от энергии пучка для сборок: 1 — д.э. на основе л.ф.д. Hamamatsu S8664-1010; 2 — д.э. из матриц Si-ф.э.у. Статистические ошибки укладываются в размер символов.

роячеек, поэтому линейность нарушается, когда в микроячейку попадает более одного фотона. Зная кривую линейности, теоретически возможно внести поправку в измеренный сигнал, однако на практике сильное отличие линейности от единицы приводит к ухудшению энергетического разрешения.

4. ВЫВОДЫ

Основная цель проведенной работы — исследование спектрометрических характеристик д.э. спектрометра PHOS эксперимента ALICE с фотоприемниками с большой чувствительной площадью. Применение таких фотоприемников после модернизации д.э. позволит обеспечить работу PHOS при комнатной температуре без ухудшения основной спектрометрической характеристики действующего PHOS — энергетического разрешения.

Эксперименты проведены на вторичных пучках Т9 ускорителя PS и Н6 ускорителя SPS в CERN. Исследовались три сборки 3×3 д.э. на основе кристаллов вольфрамата свинца PbWO_4 .

В диапазоне энергий 1–10 ГэВ измерено относительное энергетическое разрешение сборок.

Подтверждено, что для сборки из л.ф.д. S8664-55 работа при температуре $+17.5^\circ\text{C}$ не позволяет получить требуемое энергетическое разрешение. Для сборки из л.ф.д. S8664-1010 при температуре $+17.5^\circ\text{C}$ получено такое же энергетическое разрешение, как и для сборки из л.ф.д. S8664-55 при температуре -25°C . Замена л.ф.д. малой площади на л.ф.д. площадью в 4 раза больше компенсирует увеличение световыхода при охлаждении, оставляя неизменным соотношение сигнал/шум, и,

как следствие, энергетическое разрешение остается прежним.

Сравнение данных по энергетическому разрешению Si-ф.э.у. и л.ф.д., а также простые геометрические вычисления свидетельствуют о том, что в области низких энергий, где Si-ф.э.у. линейен, малая площадь матрицы Si-ф.э.у. компенсируется лучшим соотношением сигнал/шум. Однако в области энергий менее 10 ГэВ площадь исследуемых матриц Si-ф.э.у. недостаточна для получения требуемого энергетического разрешения, и такие матрицы использовать для модернизации PHOS нецелесообразно. Результаты указывают, что необходимо увеличение чувствительной площади Si-ф.э.у., как минимум, в 2 раза.

Линейность д.э. на основе л.ф.д. S8664-1010 практически сохраняется в диапазоне от 1 до 110 ГэВ. К сожалению, измерения при более высоких энергиях на пучке H6 провести не удалось ввиду ограниченного времени эксперимента. Нет предпосылок, свидетельствующих о значительной (20–30%) деградации линейности л.ф.д. большего размера в диапазоне энергий 110–160 ГэВ.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что замена л.ф.д. малой площади на л.ф.д. большей площади позволит эксплуатировать PHOS при температуре +17.5°C без ухудшения его энергетического разрешения.

Несмотря на привлекательность Si-ф.э.у., связанную с низким по сравнению л.ф.д. напряжением питания и характерным для вакуумных ф.э.у. коэффициентом усиления $\sim 10^5$ – 10^6 , принципиальная нелинейность Si-ф.э.у. не позволяет использовать единственный фотодетектор во всем требуемом энергетическом диапазоне. Возможно, что установка двух разных Si-ф.э.у. позволит решить эту проблему. При этом один из Si-ф.э.у. используется при малых энергиях, а перед вторым устанавливается оптический фильтр, который уменьшает количество попавших фотонов, обеспечивая тем самым линейность при высоких энергиях.

Выражаем благодарность сотрудникам ускорительного отдела CERN, обеспечившим бесперебойную работу ускорителя PS и SPS и вторичных пучков T9 и H6. Благодарим наших коллег по эксперименту ALICE за поддержку и полезные обсуждения полученных результатов.

Выражаем благодарность Европейскому фонду “Горизонт2020” (грант № 654168 проект AIDA-

2020-CERN-TB-2016-09) за поддержку во время проведения экспериментов. (This project has received funding from the European Union’s Horizon 2020 Research and Innovation programme under Grant Agreement no. 654168).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.610.21.0003 о предоставлении субсидии от 20.10.2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wigmans R.* Calorimetry. Energy Measurements in Particle Physics. Oxford: Clarendon Press, 2008.
2. Alice Technical Design Report of the Photon Spectrometer (PHOS). CERN/LHCC 99-4. ALICE TDR 2. 5 March 1999. ISBN 92-9083-138-3.
3. The ALICE Collaboration // J. Mod. Phys. A. 2014. V. 29. P. 1430044. <https://doi.org/10.1142/S0217751X14300440>
4. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/S8664-55.html>
5. *Muller H., Budnikov D., Ippolitov M., Qingxia Lie, Man-ko V., Pimenta R., Rohrich D., Sibiryak I., Skaali B., Vinogradov A.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2006. V. 567. P. 264. doi 10.1016/j.nima.2006.05.104
6. https://sba.web.cern.ch/sba/BeamsAndAreas/beam_lines.html
7. *Aleksandrov D.V., Burachas S.F., Ippolitov M.S., Lebedev V.A., Manko V.I., Nikulin S.A., Nyanin A.S., Sibiryak I.G., Tsvetkov A.A., Vasiliev A.A., Vinogradov A.A., Bogolyubsky M.Yu., Kharlov Yu.V., Konstantinov S.A., Petrov V.S. и др.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2005. V. 550. P. 169. doi 10.1016/j.nima.2005.03.174
8. <http://www.cargille.com/meltmount.shtml>
9. *Александров Д.В., Виноградов А.А., Ипполитов М.С., Лебедев В.А., Манько В.И., Никулин С.А., Нянин А.С., Сибиряк Ю.Г., Акиндинов А.В., Водопьянов А.С., Горбунов Н.В., Запорожец С.А., Номоконов П.В., Руфанов И.А., Будников Д.В. и др.* // ПТЭ. 2014. № 3. С. 5. doi 10.7868/S0032816214030033
10. *Bogolyubsky M., Ippolitov M., Kuryakin A., Manko V., Muller H., Nomokonov P., Punin V., Rohrich D., Sadowsky S., Sibiryak I., Skaali B., Sugitate T., Vasil'ev A., Vinogradov A., Vodopianov A., Zhou D.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2009. V. 598. P. 702. doi 10.1016/j.nima.2008.10.003
11. *Ипполитов М.С., Лебедев В.А., Манько В.И., Сибиряк Ю.Г., Акиндинов А.В., Водопьянов А.С., Горбунов Н.В., Запорожец С.А., Номоконов П.В., Руфанов И.А.* // ПТЭ. 2017. № 1. С. 33. doi 10.7868/S0032816217010025
12. http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mp-rc_kapd9005e.pdf