

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.17

ПРИМЕНЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ
ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА
ИЗ КРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМАТА СВИНЦА

© 2017 г. М. С. Ипполитов^{а, *}, В. А. Лебедев^а, В. И. Манько^а, Ю. Г. Сибиряк^а, А. В. Акиндинов^б,
А. С. Водопьянов^с, Н. В. Горбунов^с, С. А. Запорожец^с, П. В. Номоконов^с, И. А. Руфанов^с

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

^бГНЦ РФ “Институт теоретической и экспериментальной физики”
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 117218, Москва, ул. Б. Черемушкинская, 25

^сОбъединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

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

Поступила в редакцию 18.01.2016 г.

После доработки 09.03.2016 г.

Описано применение кремниевых фотоумножителей MPPC HAMAMATSU семейства S12572 для улучшения временных характеристик электромагнитного калориметра PHOS эксперимента ALICE в CERN. Показано, что введение дополнительного фотодетектора — кремниевого фотоумножителя — позволяет существенно улучшить временное разрешение спектрометра PHOS, с существующих 3–4 нс до 150–200 пс, без ухудшения энергетического разрешения.

DOI: 10.7868/S0032816217010025

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитная калориметрия является одним из классических методов идентификации и измерения характеристик частиц в физике высоких энергий [1]. В последнее время нашли широкое применение калориметры на основе тяжелых сцинтилирующих кристаллов вольфрамата свинца $PbWO_4$, обладающих минимальными значениями радиационной длины и радиуса Мольтера. В частности, электромагнитные калориметры экспериментов на встречных пучках ALICE [2] (фотонный спектрометр PHOS) и CMS [3] (электромагнитный калориметр ECAL), установленные на Большом адронном коллайдере (БАК) в CERN, состоят из кристаллов $PbWO_4$. Основной задачей обоих калориметров является измерение импульсов γ -квантов. Для идентификации частиц и определения момента их рождения необходимо также измерять время пролета.

Преобразование светового сигнала, пропорционального энергии γ -кванта, в электрический импульс в обоих экспериментах обеспечивают лавинные фотодиоды (л.ф.д.) S8664-55(S8148) производства Hamamatsu с чувствительной областью 5×5 мм². В PHOS при преобразовании то-

кового сигнала с выхода л.ф.д. в импульс напряжения и для увеличения отношения сигнал/шум используется цепочка из зарядочувствительного предусилителя (з.ч.п.) и фильтра. Величина шумов на выходе фильтра зависит от постоянной времени формирования, и для л.ф.д. данного типа минимальный уровень шумов достигается при использовании фильтра 2-го порядка с постоянной времени формирования около 1 мкс.

Рассмотрим результаты измерения времени пролета для спектрометра PHOS эксперимента ALICE.

Принцип измерения энергии и времени пролета следующий. Сигнал на выходе фильтра оцифровывается с частотой 10 МГц, синхронизированной с ускоряющей частотой БАК. При обработке полученных данных восстанавливается форма сигнала, по которой определяется амплитуда и временное положение сигнала относительно импульсов синхронизации БАК.

В эксперименте ALICE исследуются ядро-ядерные соударения на БАК. Загрузки в этом эксперименте ниже, чем в CMS: даже после модернизации БАК в 2019 г. ожидаются загрузки до 50 кГц при центральных столкновениях ядер свинца.

Таблица 1. Параметры исследованных Si-ф.э.у. семейства MPPC S12572 HAMAMATSU [7]

Тип Si-ф.э.у.	Чувствительная область, мм	Размер ячейки, мкм	Количество ячеек, штук	Напряжение U , В
S12572-025C	3 × 3	25 × 25	14400	67.5
S12572-050C	3 × 3	50 × 50	3600	66.9
S12572-100C	3 × 3	100 × 100	900	65.7

Фотонный спектрометр PHOS по сравнению с ECAL в CMS оптимизирован для измерения существенно меньших энергий (порядка 10 ГэВ), характерных для большинства процессов, связанных с образованием кварк-глюонной плазмы. Поэтому в канале регистрации PHOS используется з.ч.п. [4–6] с эквивалентным шумовым зарядом $\leq 500e^-$ при комнатной температуре и с постоянной времени формирования фильтра 2-го порядка, равной 1 мкс. Использование такой электроники, а также выбор рабочей температуры кристаллов позволяет получить энергетический эквивалент шума порядка 5–7 МэВ. Во время эксперимента л.ф.д. и з.ч.п. охлаждаются до -25°C , что позволяет снизить уровень их шумов. Кроме того, при такой температуре в три раза увеличивается световыход кристаллов.

Сигнал на выходе фильтра имеет форму квази-гаусса с временем достижения пикового значения амплитуды 2 мкс. В ходе измерений на БАК в 2011–2012 гг. было получено временное разрешение PHOS на уровне 4 нс для диапазона энергий 1–2 ГэВ.

В настоящее время обсуждается возможность модернизации PHOS, которую планируется провести в 2018–2019 гг. с целью улучшения временного разрешения при измерении времени пролета и расширения диапазона по энергии с 80 до 160 ГэВ. Улучшение временного разрешения повысит качество идентификации γ -квантов и разделения событий от столкновений соседних банчей. Ставится задача получения временного разрешения < 0.5 нс для энергий в диапазоне 1–2 ГэВ.

Данная работа является продолжением исследования одного из возможных вариантов модернизации электроники – введение быстрого дополнительного фотодетектора – кремниевого фотоумножителя (Si-ф.э.у.) [7–10].

В нашей предыдущей работе [11] исследован вариант использования Si-ф.э.у. с быстрым предусилителем. При этом Si-ф.э.у. просматривал кристалл с противоположного от л.ф.д. торца. В такой схеме временное разрешение улучшилось до 300 пс, но возникли сложности в работе существующей мониторинговой системы калориметра.

В данной работе мы исследуем вариант расположения Si-ф.э.у. и л.ф.д. на одном торце кристалла на одной плате. Оба фотодетектора находятся на печатной плате, на которой расположен низкошумящий з.ч.п. [4–6] и электроника для Si-ф.э.у. Для проведения исследований были выбраны Si-ф.э.у. MPPC S12572 производства фирмы HAMAMATSU с размером чувствительной области 3×3 мм² и с различными размерами микроячейки [12]. Эти Si-ф.э.у. обладают улучшенными по сравнению с использованными в [11] шумовыми характеристиками и у них почти полностью отсутствуют послеимпульсы [12]. Типичные параметры использованных нами Si-ф.э.у. приведены в табл. 1.

ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДЕТЕКТОРОВ В ЛАБОРАТОРИИ

Были измерены коэффициенты преобразования света (к.п.с.) в электрический сигнал фотоприемника в зависимости от напряжения и температурного тока как при комнатной температуре, так

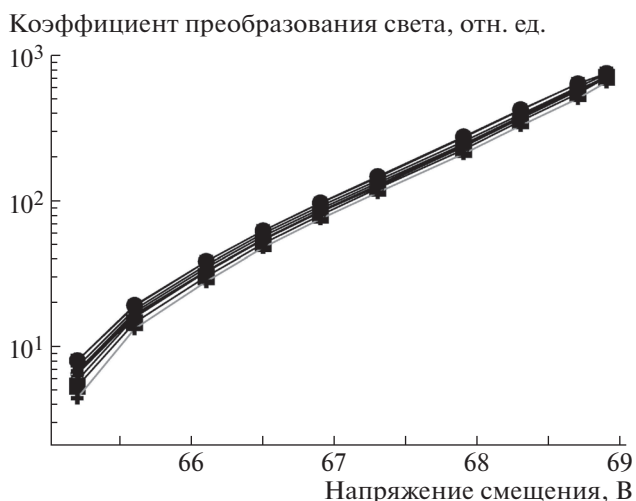


Рис. 1. Изменение к.п.с. в зависимости от напряжения для партии из 10-ти Si-ф.э.у. типа MPPC S12572-50C с ячейкой 50×50 мкм.

и при температуре -20°C , при которой в дальнейшем проводили измерения на пучке.

Для снятия этих характеристик кремниевые фотоумножители помещали в лабораторную морозильную камеру LIEBHERR LGT 2325, куда по кварцевым световодам поступал импульс света от лазерного пикосекундного генератора (Picosecond Diode Laser (PiLas)) [13]. Между световодом и Si-ф.э.у. размещали рассеиватель, обеспечивающий равномерность засветки поверхности Si-ф.э.у. Измеряли амплитуду сигнала и темновой ток Si-ф.э.у. для разных значений напряжения смещения. Напряжение подавали от пикоамперметра/источника напряжения Keithley 6487, который одновременно использовался для измерения тока, соответствующего данному напряжению. Амплитуду сигнала измеряли осциллографом Tektronix TDS3054C.

На рис. 1 приведена зависимость к.п.с. от напряжения для партии из 10-ти фотодетекторов при комнатной температуре. Данные показывают высокую однородность характеристик Si-ф.э.у. типа MPPC.

На рис. 2 приведена зависимость к.п.с. от напряжения, измеренная при $T = -20^{\circ}\text{C}$, для Si-ф.э.у. типа MPPC с размером ячейки 50 мкм. Для сравнения здесь же приведена аналогичная зависимость, но измеренная при температуре $+24^{\circ}\text{C}$. Понижение температуры приводит к известному эффекту – требуется более низкое (на 2–3 В) напряжение смещения для получения той же, что и при положительной температуре, величины к.п.с. Это связано с уменьшением порогового напряжения гейгеровского пробоя ячеек Si-ф.э.у. при понижении температуры [14]. Такая зависимость к.п.с. характерна и для Si-ф.э.у. типа MPPC с размерами микроячеек 25 и 100 мкм.

Коэффициент преобразования света, отн. ед.

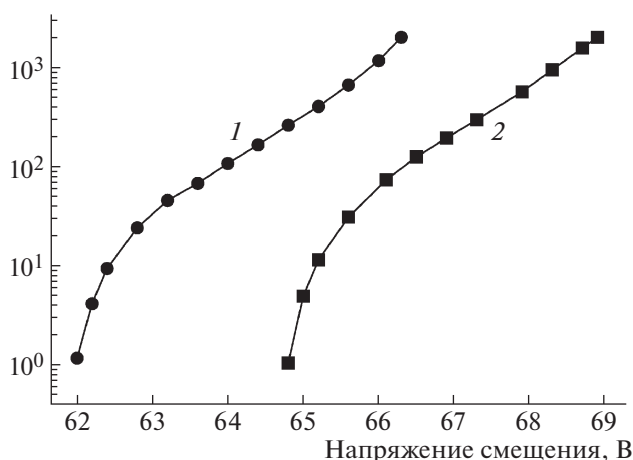


Рис. 2. Зависимости к.п.с. от напряжения, измеренные при температуре -20°C (1) и $+24^{\circ}\text{C}$ (2), для Si-ф.э.у. типа MPPC с размером ячейки 50×50 мкм.

Снижение температуры уменьшает не только напряжение пробоя Si-ф.э.у., но и величину темнового тока (при фиксированном к.п.с.) больше чем на порядок. Эффекты характерны для всех исследованных Si-ф.э.у. MPPC, но более выражены для MPPC с размером ячейки 25 мкм.

ИЗМЕРЕНИЯ НА ПУЧКЕ ЧАСТИЦ

Для измерений на пучке частиц были разработаны и изготовлены платы электроники размером 19×19 мм, содержащие з.ч.п. для л.ф.д. [4–6] и канал электроники для Si-ф.э.у. Вариантов электроники для канала Si-ф.э.у. было два: 1) токовый усилитель [11], 2) компаратор AD CMP604 с низ-

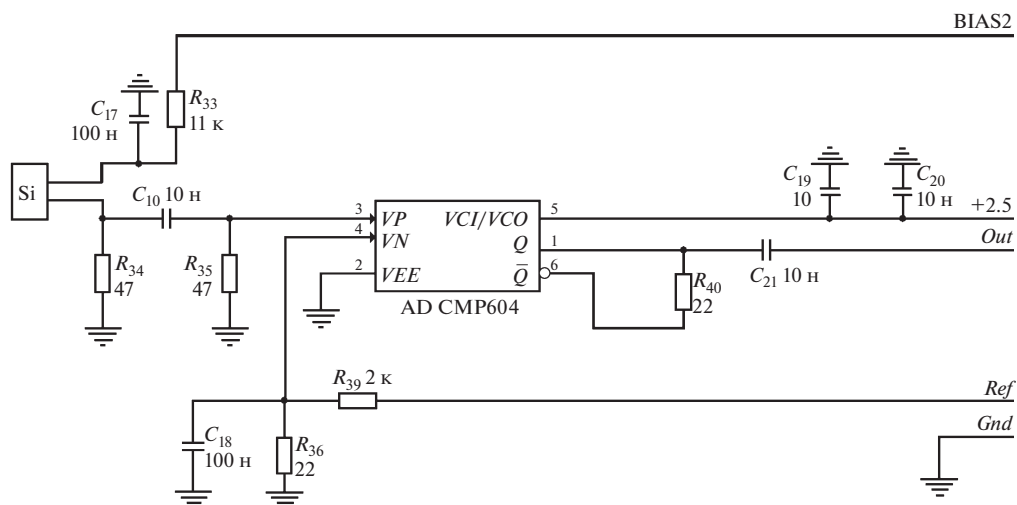


Рис. 3. Схема включения Si-ф.э.у. на вход компаратора AD CMP604. BIAS2 – питание Si-ф.э.у., Out – выходной сигнал, Ref – уровень порога компаратора.

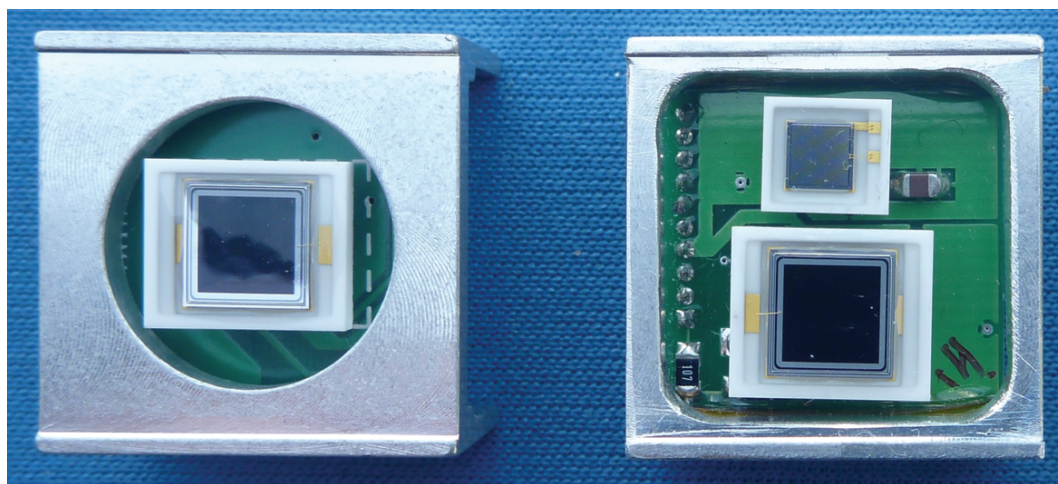


Рис. 4. Si-ф.э.у. и л.ф.д. на платах предусилителей, вклеенных в металлические рамки. Слева – плата с л.ф.д. из действующего спектрометра PHOS, справа – плата с дополнительным Si-ф.э.у. для временных измерений (л.ф.д. + Si-ф.э.у.). Габаритные размеры рамок $22 \times 22 \times 9$ мм.

ким регулируемым порогом. Схема с компаратором приведена на рис. 3.

В варианте с токовым усилителем Si-ф.э.у. может быть использован для измерения времени пролета и амплитуды сигнала (энергии), а в варианте с компаратором – только для измерения времени. Напряжение смещения Si-ф.э.у. в последнем случае выбирается из условия получения наилучшего временного разрешения. Коррекция на зависимость положения временной отметки от амплитуды сигнала в обоих случаях осуществляется по сигналу л.ф.д.

Испытания были проведены на пучке электронов линии T10 ускорителя PS (CERN). Были изготовлены сборки из детектирующих элементов на основе кристаллов вольфрамата свинца.

На рис. 4 приведена фотография электронной платы с фотодетекторами. Плата вклеена в металлическую рамку. Оптический контакт и механическое соединение Si-ф.э.у. и л.ф.д. с кристаллом PbWO_4 обеспечивались оптически прозрачной субстанцией Quick StickTM [15] с показателем преломления $n_d = 1.704$, наносимой при температуре $+70^\circ\text{C}$ на поверхность фотодетекторов. При охлаждении субстанция затвердевала, образуя механическое оптически прозрачное соединение фотодетекторов и торца кристалла.

Детектирующий элемент вставлен в сотовую структуру из листовой нержавеющей стали толщиной 100 мкм. Внутри каждая сота оклеивалась светоотражающей пленкой. Передний торец кристалла открыт, чтобы обеспечить возможность контроля работоспособности детектирующего элемента при помощи мониторинговой системы. Фотография одной изборок из девяти детектирующих элементов в виде матрицы 3×3 приведена на

рис. 5. Сборка необходима для измерения энергетического разрешения электромагнитного калориметра, так как энергия электромагнитного ливня выделяется в нескольких соседних кристаллах.

Сборки помещались в светонепроницаемый корпус. Перед каждой сборкой размещался голубой светодиод, который использовался в процессе отладки и периодического контроля работоспособности сборки. Корпус был экранирован медными листами.

Сборки в корпусе помещали в морозильную камеру, где они охлаждались до -20°C . Испытывалось пятьборок: одна состояла из детектирующих элементов работающего спектрометра PHOS; три сборки содержали Si-ф.э.у. с различными размерами ячейки (25×25 , 50×50 и 100×100 мкм) и токовые предусилители; в пятой сборке использовались Si-ф.э.у. с размером ячейки 100 мкм и компараторы.

Экспериментальные условия на пучке были такие же, как в эксперименте, описанном в [11]. При помощи установленных на пучке сцинтилляционных счетчиков и черенковского детектора из пучка вторичных частиц выделялись электроны. С помощью магнитного тракта выделялись частицы определенного импульса. Разброс импульса частицы определялся раствором коллиматора и в нашем случае составлял $\Delta p/p = 2\%$. Были проведены измерения при импульсах пучка 1, 1.5 и 2 ГэВ/с. Результаты измерений приведены на рис. 6, 7.

Измерена зависимость амплитуды сигнала Si-ф.э.у. от амплитуды сигнала л.ф.д. Пример такой зависимости приведен на рис. 6 для детектирующего элемента с Si-ф.э.у. с размером ячейки 50 мкм и токовым усилителем. При плотности

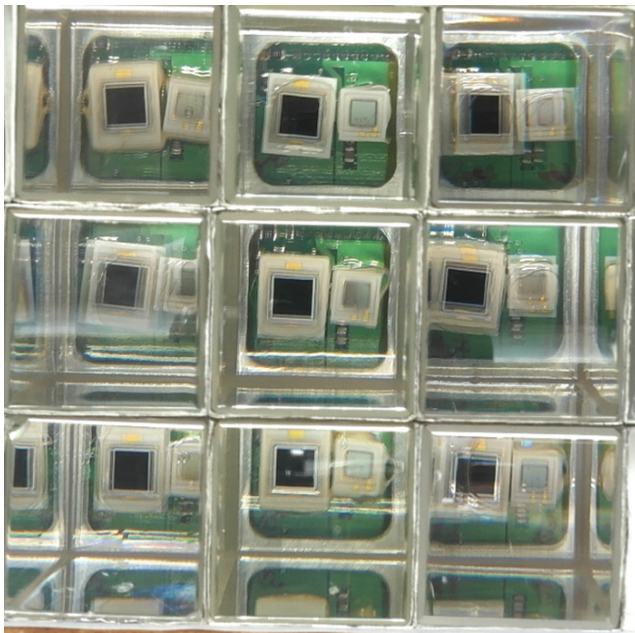


Рис. 5. Сборка детектирующих элементов в виде матрицы 3×3 . Фронтальный вид. Видны фотодетекторы, приклеенные к задним торцам кристаллов, или части отражения фотодетекторов от боковых граней кристаллов. “Двойное” изображение в некоторых детектирующих элементах обусловлено двойным лучепреломлением, характерным для большинства кристаллов $PbWO_4$.

фотонов, существенно меньшей количества ячеек на единицу площади Si-ф.э.у., отклонения от линейности малы. Повышение напряжения на Si-ф.э.у. значительно улучшает временное разрешение, но приводит к нелинейности тракта, вызванной насыщением предусилителя. Кроме того, при значительном перенапряжении на Si-ф.э.у. обнаружено влияние сигнала от Si-ф.э.у. на сигнал от л.ф.д., достигающее нескольких процентов. При больших сигналах Si-ф.э.у. амплитуда сигнала на выходе з.ч.п. уменьшается из-за прохождения через паразитные емкости отрицательного сигнала с выхода усилителя Si-ф.э.у. на схему з.ч.п. В варианте электроники, где сигнал Si-ф.э.у. поступает сразу на компаратор, наводки канала Si-ф.э.у. на канал л.ф.д. на порядок меньше.

Для измерения энергетического разрешения сборки из 3×3 кристалла использовались сигналы от л.ф.д. Отбирались центральные события, в которых электрон попадает в серединную область центрального кристалла размером 14×14 мм. Отбор проводился по распределению энергии ливня во всех кристаллах сборки. Для корректной интерпретации полученных результатов с помощью пакета Geant-3.21 [16] проведено моделирование методом Монте-Карло транспортировки пучка и развития электромагнитного ливня в сборке.

Энергия, измеренная Si-ф.э.у., ГэВ

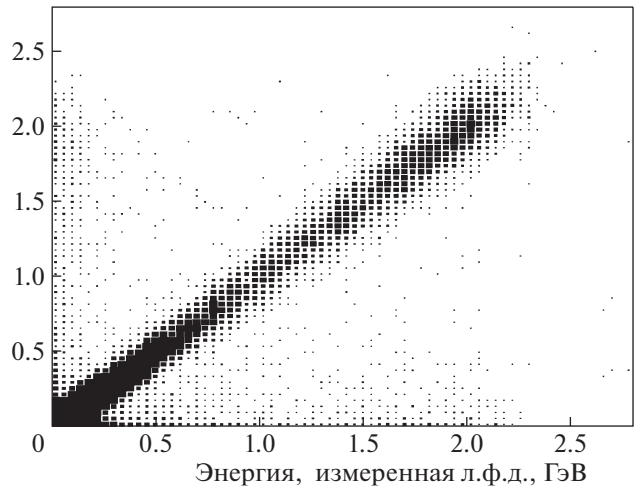


Рис. 6. Двумерная гистограмма корреляции амплитуд сигналов Si-ф.э.у. с размером микроячейки 50 мкм и токового предусилителя и л.ф.д. Количество отсчетов в бине гистограммы определяется площадью черного прямоугольника.

Моделирование показало, что при импульсе пучка выше 1 ГэВ около 90% событий с наибольшим энерговыделением в пике хорошо описываются нормальным распределением, остальные 10% событий образуют крыло приблизительно удвоенной ширины в сторону меньших энергий. Эта особенность, вызванная утечкой энергии из-за малых поперечных размеров сборки, также наблюдается на экспериментальных спектрах. В связи с этим для фитирования энергетических спектров сборки использовались спектры, полученные методом Монте-Карло. При импульсном разбросе пучка $\Delta p/p = 2\%$ и использованном нами отборе центральных событий полное энерговыделение в сборке для 90% событий с наибольшими потерями в кристаллах по результатам фитирования составило: 914 МэВ с $\sigma = 20.5$ МэВ при номинальном импульсе 1 ГэВ/с; 1373 МэВ с $\sigma = 27$ МэВ при 1.5 ГэВ/с и 1832 МэВ с $\sigma = 33$ МэВ при 2 ГэВ/с. Фитирующая функция для энергетических спектров представляет собой свертку полученного методом Монте-Карло спектра энерговыделения с нормальной функцией, описывающей разрешение калориметра параметром фитирования σ_c .

На рис. 7 приведены энергетические спектры сборок из детектирующих элементов действующего спектрометра PHOS (только л.ф.д.) и сборки с л.ф.д. + Si-ф.э.у. с размером ячейки 100×100 мкм и с компараторами на электронной плате при импульсе пучка 1.5 ГэВ/с. Результаты подгонки фитирующей функцией показали очень близкие параметры разрешения: $\sigma_c = 53.95 \pm 2$ МэВ и $\sigma_c = 57.59 \pm 0.7$ МэВ.

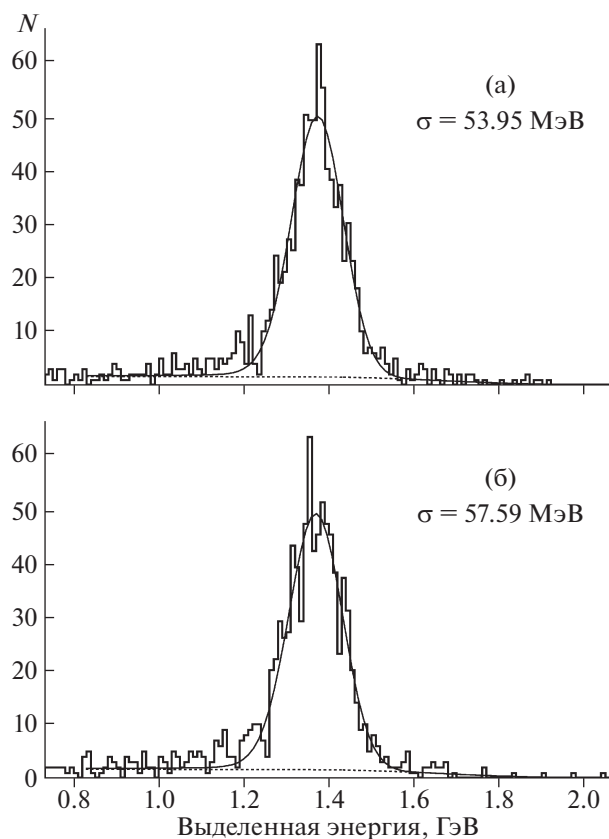


Рис. 7. Распределения сумм сигналов л.ф.д. от сборок 3×3 детектирующих элементов: **а** – сборка из детектирующих элементов действующего спектрометра RHOS; **б** – сборка л.ф.д. + Si-ф.э.у. с компаратором. Сплошные линии – результаты аппроксимации, пунктирные – фон, учитываемый при аппроксимации.

Изучено влияние напряжения на временное разрешение. Зависимости временного разрешения от энергии при различных напряжениях для одного из детектирующих элементов сборки из Si-ф.э.у. с размером ячейки 50×50 мкм приведены на рис. 8.

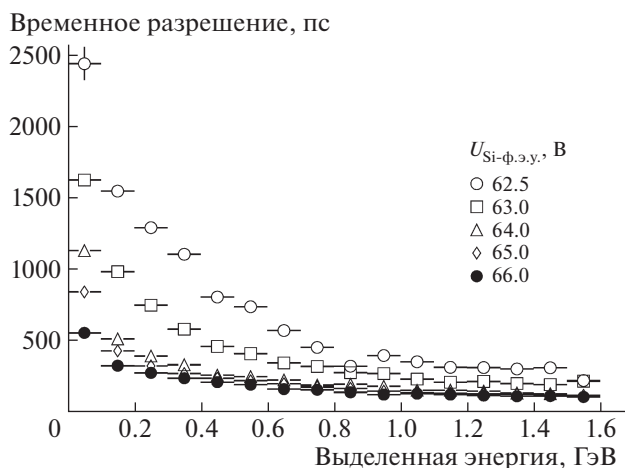


Рис. 8. Зависимости от энергии временного разрешения сборки из Si-ф.э.у. с размером ячейки 50×50 мкм с токовым предусилителем при различных напряжениях на Si-ф.э.у. Энерговыведение измеряется л.ф.д.

Результаты измерений временного разрешения для энерговыведения 1 ГэВ в кристалле приведены в табл. 2. Данные показывают значительное улучшение временного разрешения при увеличении напряжения на Si-ф.э.у.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты испытания сборок из девяти детектирующих элементов (в виде матрицы 3×3) электромагнитного калориметра RHOS эксперимента ALICE на основе кристаллов вольфрамата свинца.

Рассмотрен один из вариантов улучшения временного разрешения – введение дополнительного фотодетектора – кремниевого фотоумножителя HAMAMATSU MPPC S12372 – и организации на его основе дополнительного электронного канала, предназначенного только для временных измерений. Спектрометрический канал с исполь-

Таблица 2. Временное разрешение σ_t для энерговыведения 1 ГэВ в детектирующем элементе при различных напряжениях U на Si-ф.э.у. Данные усреднены по детекторам сборки

Si-ф.э.у. с токовым предусилителем при различных размерах ячеек, мкм						Si-ф.э.у. с размером ячейки 100×100 мкм и с компаратором	
25 × 25		50 × 50		100 × 100			
U , В	σ_t , пс	U , В	σ_t , пс	U , В	σ_t , пс	U , В	σ_t , пс
–63.0	552 ± 4	–62.5	396 ± 24	–62.0	651 ± 18	–63.0	167 ± 3
–63.5	332 ± 10	–63.0	267 ± 10	–62.4	423 ± 5	–63.5	149 ± 1
–64.2	240 ± 5	–64.0	175 ± 12	–63.5	183 ± 2		
–65.0	218 ± 4	–65.0	140 ± 2				
–67.0	182 ± 3	–66.0	113 ± 3				
–68.0	150 ± 3						

зованием лавинного фотодиода HAMAMATSU S8664-55 и низкошумящего зарядочувствительного предусилителя при этом остается без изменений. На одной плате размером 19 × 19 мм располагаются оба фотодетектора, предусилитель для л.ф.д. и электроника для Si-ф.э.у. Исследованы два варианта электроники временного канала — быстрый токовый усилитель и схема с компаратором типа AD CMP604. Показано, что введение Si-ф.э.у. только для дополнительного измерения времени позволяет достичь временного разрешения детектора 150–200 пс для γ -квантов с энергией 1 ГэВ без ухудшения энергетического разрешения.

Исследовано влияние напряжения на Si-ф.э.у. на временное разрешение. Показано, что размеры элементарной ячейки Si-ф.э.у. практически не влияют на временное разрешение. С увеличением напряжения временное разрешение улучшается. Максимальное допустимое напряжение ограничено допустимой частотой шумовых импульсов, превышающих порог компаратора.

В заключение выражаем благодарность коллективу ускорительного комплекса CERN за возможность проведения экспериментов на пучках ускорителя PS и хорошую работу ускорителя, а коллегам из эксперимента ALICE и коллегам по коллаборации PHOS — за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (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 Collaboration. Photon Spectrometer PHOS. Technical Design Report CERN/LHCC 99-4. ALICE TDR 2. 5 March 1999. <https://edms.cern.ch/document/398934/1%20>
3. CMS Collaboration. The Electromagnetic Calorimeter Project. Technical Design Report CERN/LHCC 97-33. CMS TDR 4. 15 December 1997.
4. *Muller H., Pimenta R., Skaali B., Ippolitov M., Manko V., Sibiriyak I., Vinogradov A., Budnikov D., Li Q., Rohrich D.* //

5. *Muller H., Pimenta R., Musa L., Yin Z., Rohrich D., Skaali B., Sibiriyak I., Budnikov D.* // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2004. V. 518. P. 525. doi 10.1016/j.nima.2003.11.076
6. *Aleksandrov D.V., Burachas S.F., Ippolitov M.S., Lebedev V.A., Manko V.I., Nikulin S.A., Nyanin A.S., Sibiriyak I.G., Tsvetkov A.A., Vasiliev A.A., Vinogradov A.A., Bogolyubsky M. Yu., Kharlov Yu.V., Konstantinov S.A., Petrov V.S. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. A. 2005. V. 550. P. 169. doi 10.1016/j.nima.2005.03.174
7. *Гасанов А.Г., Головин В.М., Садыгов З.Я., Юсупов Н.Ю.* // Письма в ЖТФ. 1988. Вып. 14. С. 706.
8. *Гасанов А.Г., Головин В.М., Садыгов З.Я., Юсупов Н.Ю.* Патент № 1702831 РФ. МПК⁶ H01L31/06. Опубликовано 27.06.1997. http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=4332&DocNumber=1702831&TypeFile=html
9. *Садыгов З.Я.* Патент № 2102820 РФ. МПК⁶ H01L31/06. Опубликовано 20.01.1998. http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=785&DocNumber=2102820&TypeFile=html
10. *Головин В.М., Тарасов М.Л., Бондаренко Г.Б.* Патент № 2142175 РФ. МПК⁶ H01L31/06. Опубликовано 27.11.1999. http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=3537&DocNumber=2142175&TypeFile=html
11. *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
12. <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/4004/4113/index.html>
13. <http://www.onefive.com/pilas.html>
14. *Клемин С., Кузнецов Ю., Филатов Л., Бужан П., Долгошеин Б., Ильин А., Попова Е.* // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2007. Вып. 8. С. 80.
15. <http://www.cargille.com/meltmount.shtml>
16. *Brun R., Hagelberg R., Hansroul M., Lassalle J.C.* Simulation program for particle physics experiments. GEANT: user guide and reference manual. CERN Report CERN-DD-78-2. Geneva: CERN, 1978. <https://cds.cern.ch/record/118715?ln=en>