

# ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА С ФОТОПРИЕМНИКАМИ НА ОСНОВЕ МАТРИЦ ИЗ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

*И. М. Дзапарова<sup>1,2,\*</sup>, А. Ф. Янин<sup>1</sup>, Е. А. Горбачева<sup>1</sup>,  
А. Н. Куреня<sup>1</sup>, В. Б. Петков<sup>1,2</sup>, А. В. Сергеев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Институт ядерных исследований РАН, Москва

<sup>2</sup> Институт астрономии РАН, Москва

Описан опытный образец сцинтилляционного детектора, где в качестве фотоприемников используются матрицы из кремниевых фотоэлектронных умножителей (КФЭУ). Подобный съем информации позволит получать образ (снимок) события и тем самым даст возможность разделять различные типы событий (взаимодействия частиц) в детекторе. Для этой цели проведено исследование характеристик КФЭУ и выработана методика калибровочных измерений.

The prototype of a scintillation detector was described, where the matrices from silicon photomultipliers (SiPM) are used as photosensors. Such a method of data extraction will allow one to obtain an image (snapshot) of the event and, thereby, enable to separate different types of events (particle interactions) in the detector. For this purpose, study of the characteristics of the SiPM was conducted and calibration measurement technique was developed.

PACS: 95.85.Ry; 42.79.Pw

## ВВЕДЕНИЕ

Способы применения матриц из КФЭУ как многоканальных фотоприемников для сцинтилляционных детекторов зависят от типа детектора и решаемых задач. Например, матрица, установленная на тонком листе пластического сцинтиллятора, использовалась для отбора событий в различных его частях с целью выработки быстрого триггера для многопиксельного детектора быстрых нейтронов [1]. Матрицы из КФЭУ ArrayС-60035-64Р-РСВ,

---

\*E-mail: dzaparova@yandex.ru

прикрепленные непосредственно к пластическому сцинтиллятору, используются для получения образа события в сцинтилляторе, а в сочетании с коллектором оптического излучения — для получения снимка светящихся треков проходящих через сцинтиллятор заряженных частиц [2]. Такая методика регистрации частиц дает принципиальную возможность разделять и изучать различные классы событий в объеме сцинтиллятора и может оказаться полезной при создании новых больших детекторов для нейтринной астрофизики и геофизики [3].

### **МАТРИЦЫ КФЭУ КАК МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА**

Разработка сцинтилляционного детектора с двумя матрицами ArrayC-60035-64P-PCB преследовала цель получить изображение трека проходящей через вещество сцинтиллятора частицы. Для этой задачи отсутствие отражающего покрытия вокруг сцинтиллятора является необходимым условием. Во многом выбор матриц производителя SensL с низким уровнем шумов определен сложностью светосбора. Матрица ArrayC-60035-64P-PCB серии C [4, 5] состоит из 64 индивидуальных КФЭУ. Каждый КФЭУ имеет активную площадь  $36 \text{ мм}^2$  и состоит из 18980 микропикселей размером  $35 \times 35 \text{ мкм}$ . Напряжение питания матрицы является суммой типового напряжения пробоя ( $24,5 \pm 0,5 \text{ В}$ ) и напряжения смещения ( $1\text{--}5 \text{ В}$  выше напряжения пробоя). Рабочий диапазон КФЭУ  $300\text{--}800 \text{ нм}$ , с максимумом чувствительности при  $420 \text{ нм}$ . Максимум чувствительности выбранных КФЭУ совпадает с максимумом спектра испускания используемого нами пластического сцинтиллятора на основе полистирола с активатором PPO и сместителем спектра POPOP [6]. Квантовая эффективность КФЭУ в максимуме чувствительности составляет  $36 \%$ , так как мы используем напряжение смещения  $27,6 \text{ В}$ , рекомендованное производителем.

### **ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА ФОТОНОВ НА КВАНТОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ ФЭУ**

В сцинтилляционных детекторах с матрицами, которые крепятся непосредственно к сцинтиллятору, фотоны могут приходиться на КФЭУ под различными углами. Поэтому при анализе данных с таких детекторов важно знать, как при одном и том же световом потоке заряд в импульсе на выходе КФЭУ зависит от угла между нормалью к поверхности КФЭУ и направлением прихода фотонов. Для созданного опытного образца, не имеющего оптического коллектора, экспериментально проверена возможность влияния направления

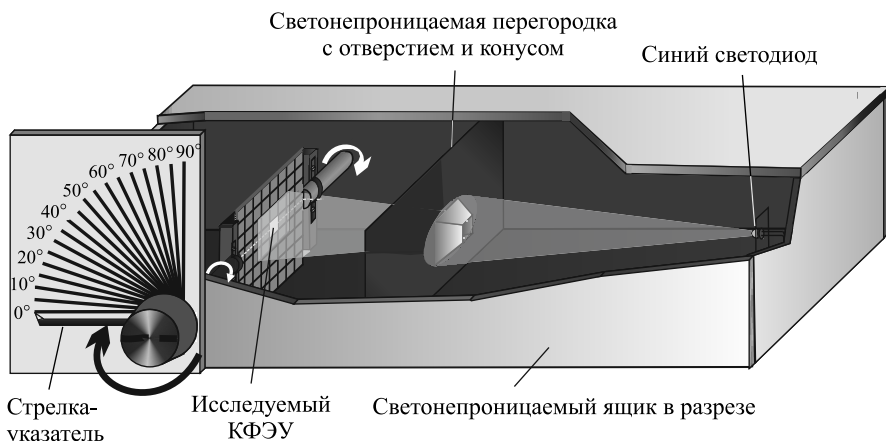


Рис. 1. Эскиз конструкции для измерения зависимости отклика КФЭУ от длины волны и угла падения фотонов.

прихода фотонов на квантовую эффективность кремниевых ФЭУ для длины волны 430 нм. Матрица засвечивалась однородным слабым световым пучком от светодиода с длиной волны излучения  $\lambda = 430$  нм, который работал в режиме, когда одновременно срабатывали не более 2% от полного числа микропикселей КФЭУ. Эскиз конструкции для измерения зависимости отклика КФЭУ от длины волны и угла падения фотонов представлен на рис. 1. Светодиод расположен на расстоянии 340 мм. Для исключения попадания отраженных фотонов на КФЭУ предусмотрен экран. Все стенки ящика и защитный экран покрыты черной тканью. Матрица с платой предусилителей закреплена на оси. Измерения проводились для одного из центральных КФЭУ с шагом в  $5^\circ$ . Результаты измерений представлены на рис. 2. Линией 1 отмечена косинусоидальная зависимость — изменение сигнала определяется только изменением площади фотокатода КФЭУ от угла падения фотонов. Экспериментально полученные данные показывают отклонение от ожидаемой зависимости  $\cos(\theta)$  и фитируются функцией

$$F(\theta) = \cos(\theta) - \kappa^* \sin^3(\theta). \quad (1)$$

Для светодиода с длиной волны 430 нм определен коэффициент  $\kappa = 0,11$ . Проведены расчеты отклика детектора с матрицей КФЭУ как с фотоприемником на прохождение мюонов космических лучей через лист пластического сцинтиллятора размером  $500 \times 500$  мм и толщиной 50 мм и через брусок сцинтиллятора размером  $59 \times 59 \times 50$  мм. Наиболее вероятное энерговыделение от мюонов космических лучей составляет 10,5 МэВ и для листа, и для

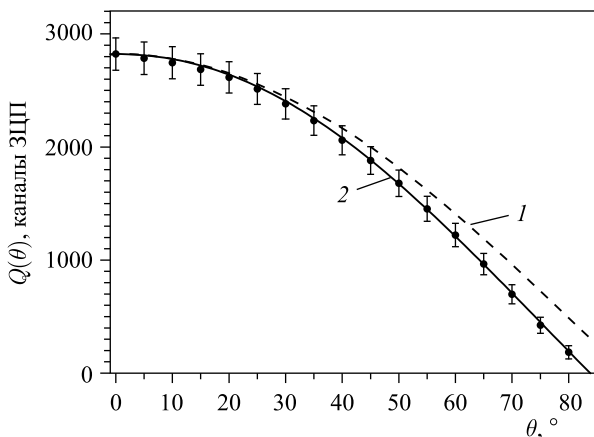


Рис. 2. Зависимость отклика КФЭУ от угла падения фотонов. Точки — экспериментальные данные; 1 — зависимость  $\cos(\theta)$ ; 2 — фитирующая функция, формула (1)

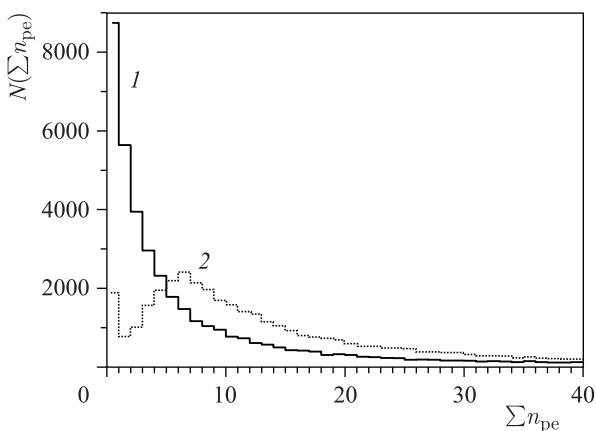


Рис. 3. Спектры энерговыделения всей матрицы, расположенной по центру листа сцинтилятора  $500 \times 500 \times 50$  мм, полученные в результате моделирования с учетом коэффициента  $\kappa = 0,11$  (1) и без него,  $\kappa = 0$  (2)

бруска сцинтилятора. В обоих случаях матрица КФЭУ располагалась сверху, на листе сцинтилятора — в центре. Расчеты спектров по числу фотоэлектронов для каждого КФЭУ матрицы сделаны для двух вариантов зависимости заряда в импульсе на выходе КФЭУ от угла  $\theta$  между нормалью к поверхности КФЭУ и направлением прихода фотонов (1), с учетом эмпирически полученной поправки ( $\kappa = 0,11$ ) и без ее учета ( $\kappa = 0$ ). В качестве примера на рис. 3

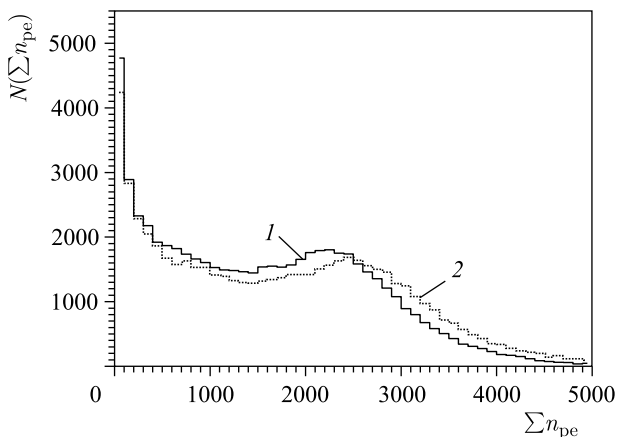


Рис. 4. Спектры энерговыделения всей матрицы, расположенной на бруске сцинтиллятора  $59 \times 59 \times 50$  мм, полученные в результате моделирования с учетом коэффициента  $\kappa = 0,11$  (1) и без его учета при  $\kappa = 0$  (2)

и 4 приведены спектры по числу фотоэлектронов для суммы всех КФЭУ матрицы для листа  $500 \times 500 \times 50$  мм сцинтиллятора и для бруска  $59 \times 59 \times 50$  мм соответственно. Как видно из рисунков, спектры заметно зависят от величины  $\kappa$ , особенно для листа сцинтиллятора. Это объясняется тем, что размер листа сцинтиллятора много больше размера матрицы, и для подавляющего количества событий фотоны приходят на КФЭУ под большими углами. Таким образом, при анализе событий с детектора (сравнении смоделированных и зарегистрированных событий) необходимо учитывать зависимость величины заряда на выходе КФЭУ от направления прихода фотонов.

### КАЛИБРОВОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ 128 КФЭУ И ТРАКТОВ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА

Измерительная система сбора данных детектора создана на основе 32-канальных ЗЦП V792 (стандарт VME) производства фирмы CAEN. Конструктивно 32-канальный 12-битный ЗЦП V792 [7] представляет собой модуль единичной ширины VME 6U. Входное сопротивление каналов ЗЦП составляет 50 Ом. Сигналы на измерительные входы ЗЦП подаются через плоский кабель 132-2802-234 фирмы Amphenol Ltd. Сопротивление такого кабеля составляет 110 Ом, поэтому для согласования с входным сопротивлением ЗЦП используются 16-канальные развязывающие платы (адаптеры) A992, содержащие миниатюрные высокочастотные трансформаторы по каждому входу.

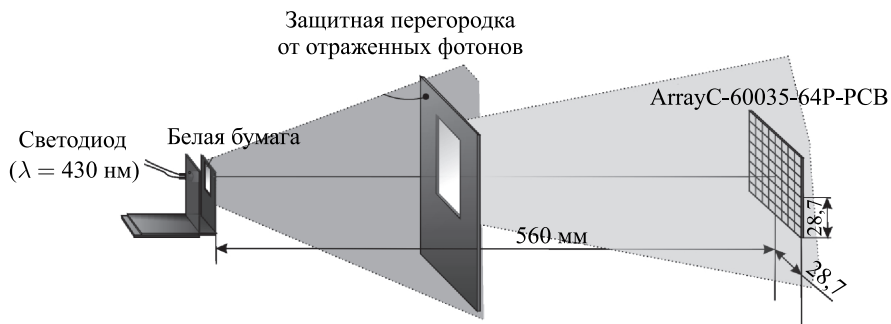


Рис. 5. Эскиз конструкции для калибровки матрицы КФЭУ

Адаптеры также позволяют устранить паразитные контуры с замыканием через землю. Зарядовый диапазон входных сигналов 0–400 пКл. Время преобразования составляет 5,7 мкс (на 32 канала), зарядовое разрешение — 100 фКл на отсчет, интегральная нелинейность —  $\pm 0,1\%$  от полной шкалы измерения. Метод скользящей шкалы используется для уменьшения дифференциальной нелинейности, которая равна  $\pm 1,5\%$ . ЗЦП имеет буферную память на 32 события. Система сбора данных для работы с опытным образцом детектора описана в работе [8]. Оцифровка входных импульсов проводится при наличии триггерного сигнала в стандарте NIM на общем для всех каналов входе GATE. Триггерный сигнал должен приходить как минимум на 15 нс раньше измеряемых аналоговых импульсов и завершаться по окончании измеряемого сигнала. Для этой цели был изготовлен блок задержек и плата выработки триггерного сигнала. Результаты измерений опытного образца требуют учета пьедесталов и коэффициента передачи сигнала в тракте каждого канала. Чтобы внести такие поправки в полученные данные, были проведены калибровочные измерения. Эскиз конструкции, с помощью которой измерения проводились, приведен на рис. 5. Проведение калибровочных измерений с помощью светодиода позволяет учесть коэффициенты передачи КФЭУ, усилителей, затухание в линиях задержек, различия в коэффициентах передачи адаптеров и ЗЦП. При калибровке конструкция помещалась в светозащитный короб, обитый черной тканью. Между матрицей и светодиодом располагался экран, защищающий матрицу от света, отраженного от короба. Светодиод находился на расстоянии 560 мм. Так как светодиод имеет узкую диаграмму направленности, для формирования рассеянного потока фотонов использовался экран из белой бумаги. Матрица засвечивалась однородным слабым световым пучком. Зарядовый спектр представляет собой хорошо выделенные максимумы с шагом в один фотозлектрон (рис. 6). В каждом канале КФЭУ расстояние между соседними максимумами в каналах ЗЦП имеет свое

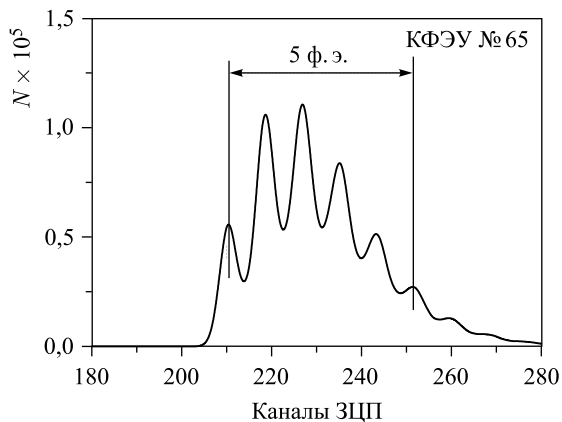


Рис. 6. Отклик КФЭУ при засвечивании слабым излучением от светодиода ( $\lambda = 430$  нм)

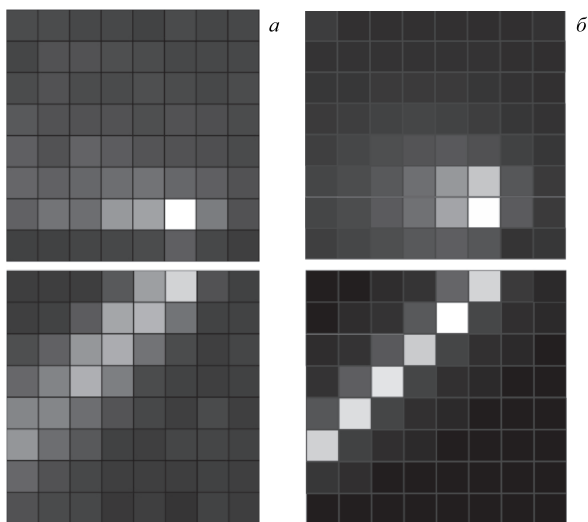


Рис. 7. Визуализированные события: а) полученное в измерении; б) промоделированное для той же траектории прохождения частицы через сцинтиллятор детектора

значение и определяется вышеперечисленными различиями в тракте передачи сигнала от КФЭУ. Данные этих измерений учитываются в программах обработки. Как результат соответствия измерений и программ моделирования решена обратная задача — для измеренного события (с известной траекторией)

вычислялись значения энерговыделений в КФЭУ матрицы. Полученные расчетные значения визуализированы для наглядности и как результат согласия программ моделирования и проведенных измерений приведены на рис. 7.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан опытный образец сцинтилляционного детектора. Разработаны программы моделирования и система регистрации детектора. Выработана методика калибровки всех измерительных трактов системы сбора данных. Проведенное исследование позволяет вести разработку оптического коллектора для следующего варианта детектора.

Работа выполнена на УНУ Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН) при поддержке Российского научного фонда (проект 17-12-01331).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Masek P., Jakubek J., Uher J., Preston R.* Directional Detection of Fast Neutrons by the Timepix Pixel Detector Coupled to Plastic Scintillator with Silicon Photomultiplier Array // JINST. 2013. V. 8. P. C01021.
2. *Yanin A. F., Dzaparova I. M., Gorbacheva E. A., Kurenya A. N., Kochkarov M. M., Petkov V. B., Sergeev A. V.* Development of a Scintillation Detector with a Photosensor Based on Matrices of Silicon Photomultipliers // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012169.
3. *Petkov V. B.* Prospects of the Search for Neutrino Bursts from Supernovae with Baksan Large Volume Scintillation Detector // Phys. Part. Nucl. 2016. V. 47, No. 6. P. 975; arXiv:1508.01389.
4. <http://sensl.com/estore/arrayc-60035-64p-pcb/>
5. <http://sensl.com/products/c-series/>
6. *Харжеев Ю. Н.* Сцинтилляционные счетчики в современных экспериментах по физике высоких энергий // ЭЧАЯ. 2015. Т. 46, вып. 4. С. 1226.
7. <http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?idmod=41&parent=11>
8. *Янин А. Ф., Дзапарова И. М., Волченко В. И., Горбачева Е. А., Куреня А. Н., Петков В. Б.* Многоканальная измерительная система для сбора данных с матриц из кремниевых фотоумножителей // Измерительная техника. 2017. № 3. С. 8–11.