

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 539.1.074.55

ИЗУЧЕНИЕ 16-ТИ КАНАЛЬНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

© 2020 г. А. В. Тишевский^{а, *}, Ю. В. Гурчин^а, А. Ю. Исупов^а, П. К. Курилкин^а, В. П. Ладыгин^а,
С. Г. Резников^а, Я. Т. Схоменко^а, А. А. Терехин^а, А. Н. Хренов^а

^аОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация

*E-mail: tishevskiy@jinr.ru

Поступила в редакцию 07.08.2020 г.

После доработки 11.08.2020 г.

Принята к публикации 11.08.2020 г.

В Лаборатории физики высоких энергий разработаны 16-ти каналные прототипы детекторов со считыванием сигнала на основе SiPM производства Ketek и Hamamatsu для применения в калориметре под нулевым углом, а также для измерения профиля пучка нейтронов низких энергий. В работе представлен метод определения напряжения излома шумовой характеристики фотоумножителей в многоканальном детекторе и его температурная зависимость в диапазоне от 27.7 до 39.1°C. Был исследован отклик от светодиодного источника калиброванных световых импульсов и получено временное разрешение.

Ключевые слова: лавинный фотодиод, кремневые фотоумножители, точка излома шумовой характеристики, система сбора данных, детектор спиновой физики

DOI: 10.1134/S2079562920040168

ВВЕДЕНИЕ

Современные фотодетекторы на основе кремния (часто называемые SiPM, APD, MAPD, MPPC) используются в широком классе экспериментов в CERN, FAIR и на NICA [1]. Примерами их применения являются электромагнитный и адронный калориметры. Преимуществами таких детекторов по сравнению с классическими фотоумножителями являются: низкое напряжение смещения, их компактность, нечувствительность к магнитным полям. Основные недостатки заключаются: в зависимости параметров SiPM от температуры; разбросе рабочего напряжения для различных партий SiPM; большом шумовом счете, зависящем от размеров фотоприемников.

В Лаборатории физики высоких энергий Объединённого института ядерных исследований были разработаны 16-канальные прототипы детекторов (рис. 1а) со считыванием сигнала на основе SiPM производства Ketek (PM3350) [2] и Hamamatsu (S12572-010P) [3]. Они могут быть использованы как важная часть разработки калориметра под нулевым углом (ZDC) в строящемся детекторе SPD (Spin Physics Detector) коллайдера NICA.

Электроника каждого прототипа состоит из системного модуля SM G761, системной шины и 16-канального прототипа. Системный модуль

выполнен в виде настольного устройства, подключаемого к компьютеру через USB и включает в себя блок питания ~220 В. Системный модуль подключен к 16-канальному прототипу через системную шину. Прототип реализован на двух печатных платах размером 78 × 78 мм². Платы содержат источник питания для шестнадцати SiPM. Напряжение смещения задается программой HVSys [4], которая позволяет устанавливать общее напряжение и задавать разницу в напряжении смещения между каналами в индивидуальном диапазоне 0.0–3.3 В. Также платы содержат: фотоприемники, усилители и датчик температуры. Сигналы с каждого SiPM и их сумма усиливаются и выводятся на считывающую электронику через разъем IDC34.

Характерная особенность разработанных прототипов в совокупности с применяемой системой сбора данных заключается в возможности получения амплитуды сигнала совместно с временной информацией. Примененный усилитель и 20 нс фронт сигнала являются компромиссом между аналоговыми и временными измерениями, последние из которых выполняют дополнительную функцию. При этом эффективное разрешающее время для логических схем совпадений на FPGA формируется из расширенного временного окна выборки. В результате, отбрасываются случайные

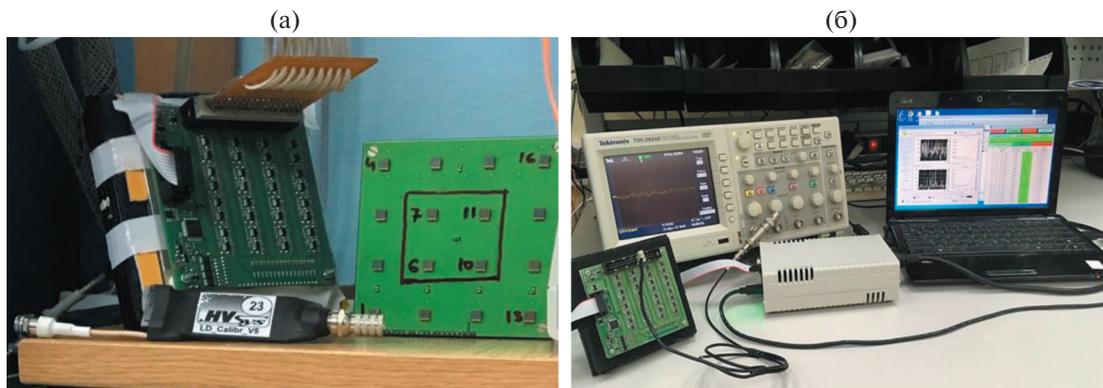


Рис. 1. Внешний вид прототипов со светодиодным источником (а), схема для измерений шумовой характеристики (б).

события, которые не попадают в требуемый диапазон совпадений.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ИЗЛОМУ ШУМОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В общепринятом методе определения рабочего напряжения смещения SiPM главным условием является измерение его вольтамперной характеристики (ВАХ), определение напряжения пробоя и добавления к нему значения перенапряжения, в указанном производителем диапазоне. Измерение ВАХ не является рациональным в готовом многоканальном детекторе. Это приводит к усложнению электроники и увеличению конечной стоимости детектора.

По этой причине был предложен метод, основанный на измерении средней величины амплитуды шумового сигнала (U_{p-p}) в зависимости от напряжения смещения (U_{bias}). При этом изменение амплитуды при различном напряжении определяется как флуктуациями темнового тока самого SiPM, так и шумами усилителя сигнала. Преимущество этого метода заключается в возможности быстрого нахождения нормирующего напряжения в готовом многоканальном детекторе, используя шумовую характеристику. Данное напряжение коррелирует с напряжением пробоя.

В то же время совместное измерение шумовой характеристики SiPM и электронного тракта является недостатком в случае определения параметров отдельного SiPM. Например, производитель Hamamatsu поставляет каждый SiPM с индивидуальным рекомендуемым напряжением смещения. Однако, практическое применение SiPM осуществляется вместе с электронным трактом, а влияние указанного электронного тракта на характеристики SiPM всегда требует дополнительного рассмотрения.

Метод измерения средней величины амплитудных пиков шумового сигнала был применен к разработанным 16-канальным прототипам детекторов. Во время измерений рабочая температура опытных образцов составляла $31 \pm 0.26^\circ\text{C}$. Напряжение смещения устанавливается программой HVSys в диапазонах 20.0–24.7 В для SiPM Ketek и 50.0–75.0 В для SiPM Hamamatsu. Количество исследованных значений напряжения смещения в соответствующих диапазонах составляло около 20 для обоих прототипов. Сигналы считывались с прототипов осциллографом Tektronix TDS2024B, подключенным к компьютеру через USB (рис. 1б). Для автоматизации процедуры измерения была разработана программа TDS2024B, которая использует внутреннюю библиотеку и триггер осциллографа от сети напряжения. Усреднение амплитудных пиков проводилось для 100 измерений с соответствующей погрешностью с целью уменьшения вклада случайных импульсов минимально ионизирующих частиц и повышения точности измерений.

Полученный вид зависимости $U_{p-p}(U_{bias})$ очень похож на зависимость $I(U)$ [5] для обоих прототипов. Нами применена линейная аппроксимация к области условного плато и к области роста полученной шумовой характеристики. Из системы уравнений этих прямых была найдена их точка пересечения, являющаяся напряжением излома шумовой характеристики. SiPM Ketek и Hamamatsu имели средние напряжения излома 23.28 ± 0.19 и 73.82 ± 1.26 В соответственно (рис. 2).

Также были получены зависимости напряжений излома шумовых характеристик от температур в диапазоне от 27.7 до 39.1°C . Рабочая температура изменялась элементом Пельтье, радиаторами охлаждения и нагрева, и компьютерными вентиляторами. На рис. 3 показано, что изменение температуры на 1°C изменяет напряжение смещения примерно на 8.5 мВ для SiPM Ketek

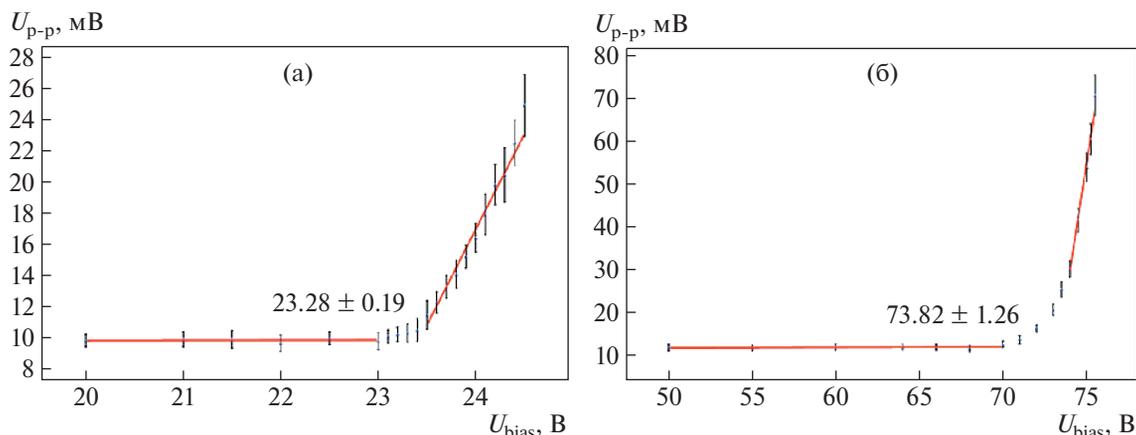


Рис. 2. Шумовая характеристика для прототипов: (а) Ketek, (б) Hamamatsu.

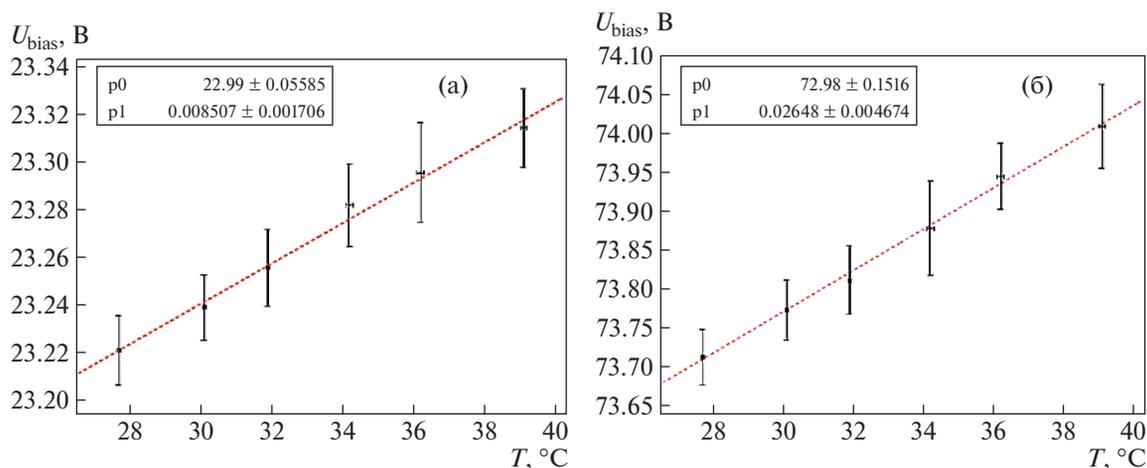


Рис. 3. Зависимость напряжений излома шумовых характеристик в диапазоне температур от 27.7°C до 39.1°C для прототипов: (а) Ketek, (б) Hamamatsu.

(рис. 3а) и на 26.4 мВ для SiPM Hamamatsu (рис. 3б). Нами планируется получить температурный коэффициент для сигнала при использовании светодиодного источника калиброванных световых импульсов (LED). Таким образом, изменяя напряжение смещения, мы сможем компенсировать изменения температурных условий.

Найденные напряжения излома шумовых характеристик для прототипов будут использоваться в качестве базисных для определения рабочего напряжения смещения. Конечное напряжение смещения устанавливается в соответствии с типом SiPM и соображениями исследователей. Полученные значения для нашего электронного тракта и SiPM Hamamatsu выше рекомендованного производителем рабочего напряжения, равного в среднем 71.7 В. Таким образом, необходимо произвести корректировку напряжения для

всех каналов приблизительно на 2.1 В ниже найденных точек излома.

ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОТОТИПОВ

Проверка прототипов Ketek и Hamamatsu осуществлялась с использованием света от LED, который выполнен в виде отдельной платы с возможностью синхронизации сигнала [6]. Такой синхросигнал с выхода LEMO использовался в качестве триггера для DAQ. Данные собирались с помощью системы сбора данных [7] на основе VME (рис. 4). Система включала в себя контроллер FVME – V2.0, модуль TMWR и два 16-канальных модуля TQDC16 (цифровой преобразователь времени и заряда) [8]. Рабочая температура опытных образцов во время измерений составляла $31 \pm 0.37^\circ\text{C}$. Свет передавался на прототипы с помощью равномерного и однородного засвечивания

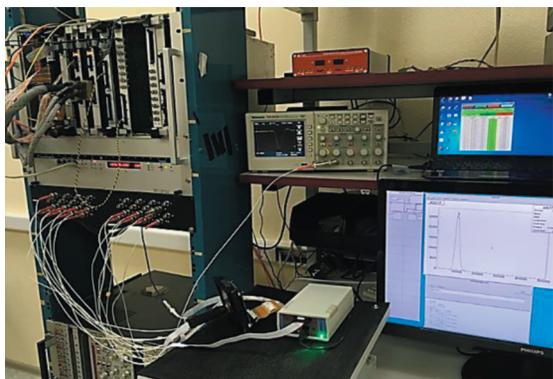


Рис. 4. Вид системы сбора данных.

или одноканального засвечивания оптическим волокном с диаметром сердечника 50 мкм. После прихода с SiPM сигнал интегрировался в заряд в диапазоне времен, соответствующем длительности окна выборки 192 нс. Для проверки работоспособности были построены гистограммы заряда и гистограммы разности времен при различных напряжениях для каждого канала прототипов на Ketek и Hamamatsu. Конечное напряжение смещения было выбрано на основе шумовых характеристик.

Гистограммы разности времен между триггерным сигналом со светодиодного источника, используя оба способа передачи света, и откликом канала в прототипе аппроксимировались функцией Гаусса, и временное разрешение определялось как параметр сигма (σ) гауссовой функции.

Таким образом при равномерном засвечивании временное разрешение составляло $\sigma = 9.0 \times 100$ пс/канал = 0.9 нс при напряжениях 24.7 В для Ketek и 71.7 В для Hamamatsu (рис. 5а). Временное разрешение при засвечивании оптическим волокном составляло в среднем $\sigma = 4.1 \times$

± 100 пс/канал = 0.4 нс, как для прототипа на Ketek, так и для прототипа на Hamamatsu (рис. 5б).

ВЫВОДЫ

Были разработаны и протестированы 16-канальные прототипы детекторов со считыванием сигнала на основе SiPM производства Ketek (PM3350) и Hamamatsu (S12572-010P).

Предложенный метод определения рабочего напряжения смещения представляется целесообразным для практического применения. Средние напряжения излома шумовых характеристик прототипов на Ketek и Hamamatsu составляли 23.28 ± 0.19 и 73.82 ± 1.26 В соответственно.

Было получено временное разрешение фотодетекторов производства Ketek и Hamamatsu с использованием источника LED. При равномерном засвечивании оно составляло приблизительно 1.0 нс при напряжениях 24.7 В для Ketek и 71.7 В для Hamamatsu. Временное разрешение при засвечивании оптическим волокном составляло в среднем 0.4 нс, как для прототипа на Ketek, так и для прототипа на Hamamatsu.

Прототип на Ketek был протестирован на пучке дейтронов Нуклотрона ОИЯИ при энергии 4 ГэВ/нуклон. В настоящий момент производится анализ данных.

Нами планируется определение температурного коэффициента с использованием сигнала LED; создание сборки из нескольких подобных детекторов. В дальнейшем планируется обновление усилителей сигналов до более быстрых.

Представленные прототипы могут быть использованы в калориметре под нулевым углом в экспериментах на будущем ускорительном комплексе NICA.

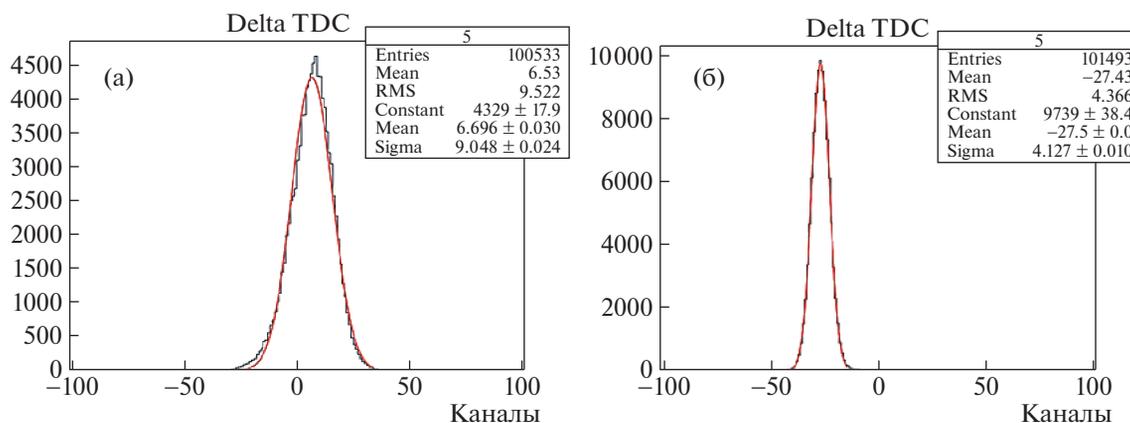


Рис. 5. Гистограммы разности времен между откликом SiPM Hamamatsu и триггерным сигналом в случае: (а) равномерного засвечивания, (б) засвечивания оптическим волокном.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность иностранным коллегам V. Kushpil, M. Janek и O. Mezhenska за помощь при подготовке и проведении тестов. Работа частично поддержана грантом РФФИ № 19-02-00079а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ /REFERENCES

1. *Timoshenko A., Finogeev M., Guber F. et al.* Tech. Design Report for the MPD Experiment.
2. Ketek PM3350 Datasheet. <http://www.ketek.net/products/sipm/pm3350/>
3. Hamamatsu S12572-010P Datasheet. <http://www.hamamatsu.com/jp/en/S12572-010P.html>
4. http://hvsys.ru/images/data/news/2_small_1368802824.pdf
5. *Kushpil V. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 675. P. 012039.
6. http://hvsys.ru/images/data/news/5_small_1368802948.pdf
7. *Isupov A.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 204. P. 10003.
8. <https://afi.jinr.ru>

Study of the 16-Channel Scintillation Detector Prototype with Silicon Photomultipliers Readout

A. V. Tishevskiy^{1, *}, Yu.V. Gurchin¹, A.Yu. Isupov¹, P.K. Kurilkin¹, V.P. Ladygin¹, S.G. Reznikov¹, Ya.T. Skhomenko¹, A.A. Terekhin¹, and A.N. Khrenov¹

¹ *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia*

**e-mail: tishevskiy@jinr.ru*

Received August 7, 2020; revised August 11, 2020; accepted August 11, 2020

In the Laboratory of High-Energy Physics, 16-channels prototypes of detectors (with SiPM readout produced by Ketek and Hamamatsu) were developed for their application in zero-degree calorimetry and for measuring the profile of a low-energy neutron beam. This paper presents the method for determining the voltage of the breakpoint of the noise characteristic of the silicon photomultipliers in the multichannel detector and its temperature dependence in the range from 27.7 to 39.1°C. The response of SiPM to the LED source of calibrated light pulses has been studied and the time resolution has been obtained.

Keywords: avalanche photodiode (APD), silicon photomultipliers (SiPM), breakpoint of the noise characteristic, data acquisition (DAQ) system, spin-physics detector (SPD)