



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2025-9
ОЭФ

Н.Е. Воронков⁺, А.М. Горин⁺, С.В. Евдокимов⁺, А.А. Зайцев[†],
В.И. Изучеев⁺, Б.В. Полищук⁺, В.И. Рыкалин⁺, С.А. Садовский⁺,
Ю.В. Харлов^{++‡}, А.А. Шангареев⁺

Фотодетекторы на основе SiPM для спектроскопических измерений в широком динамическом диапазоне

⁺НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, Протвино, Московская обл.,
142281, Россия

[†]ОИЯИ, Дубна, Московская обл., 141980, Россия

[‡]МФТИ, Физтех, Долгопрудный, Московская обл., 141701, Россия

Протвино 2025

Аннотация

Воронков Н.Е. и др. Фотодетекторы на основе SiPM для спектроскопических измерений в широком динамическом диапазоне: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2025-9. – Протвино, 2025. – 12 с., 6 рис., 1 табл.

Представлены результаты измерений характеристик фотодетекторов на основе матриц SiPM большой площади с широким динамическим диапазоном. Рассматривается возможность применения фотодетекторов на основе SiPM для электромагнитной калориметрии в диапазоне энергий от сотен кэВ до десятков ГэВ. Обсуждается также возможность применения SiPM в гамма-ядерной спектроскопии.

Abstract

Voronkov N.E. et al. SiPM-based photodetectors for spectroscopic measurements in wide dynamic range: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2025-9. – Protvino, 2025. – p. 12, figs. 6, tables 1.

The results of measurements of the characteristics of photodetectors based on large-area SiPM matrices with a wide dynamic range are presented. The potential application of SiPM-based photodetectors for electromagnetic calorimetry in the energy range from hundreds of keV to tens of GeV is explored. The potential application of SiPM in gamma-spectroscopy is also discussed.

Введение

Задачи измерений потоков слабых световых сигналов в видимом оптическом диапазоне стоят во многих областях физики. Световой поток сигналов преобразуется в электрический сигнал, измеряемый фотодетекторами, и величина тока или заряда, индуцированного фотодетектором, определяет величину падающего светового потока.

В экспериментальной ядерной физике и физике высоких энергий ионизирующее излучение регистрируется посредством световых сигналов видимого и ближнего ультрафиолетового диапазонов, интенсивность которых пропорциональна потерям энергии частиц высоких энергий, проходящих через активное вещество детектора. В частности, в электромагнитных и адронных калориметрах частицы практически полностью выделяют свою начальную энергию в веществе калориметра, и вторичные заряженные частицы, образующиеся в результате взаимодействия первичной частицы с веществом, возбуждают активную среду калориметров — например, сцинтилляторов или черенковских радиаторов. Энергия, выделенная вторичными частицами в этих активных средах, определяет поток света, излученный этими средами, поэтому световой поток зарегистрированных световых импульсов или заряд, индуцированный фотодетектором, однозначно связаны с выделенной энергией, и, следовательно, с начальной энергией падающей высокоэнергетической частицы. Другой класс детекторов, требующий регистрации и измерения величины светового сигнала, — это сцинтилляционные счетчики заряженных частиц. При прохождении частиц через сцинтилляционные счетчики ионизационные потери слабо зависят от скорости частиц, но сильно зависят от заряда частиц. При достаточной точности измерения величины тока или заряда, индуцированного фотодетектором, сцинтилляционные детекторы позволяют определить и заряд, и энергию частиц, а в совокупности с магнитными спектрометрами, измеряющими импульс заряженной частицы, позволяют определить её массу, т.е. тип частицы. Эти задачи налагают требования на основные характеристики фотодетекторов, измеряющих заряд от коротких и слабых свето-

вых импульсов со сцинтилляционных детекторов. Этими основными характеристиками являются эффективность регистрации фотонов, разрешение фотодетекторов по измеряемому световому потоку, стабильность измерения амплитуды во времени, степень линейности измеренной амплитуды светового импульса от выделенной начальной энергии частицей в активной среде детектора. Характерный диапазон индуцированных зарядов от световых импульсов, излучаемых калориметрами и сцинтилляционными счетчиками, применяемыми в физике высоких энергий и ядерной физике, составляет от десятков до сотен тысяч фотоэлектронов. При этом длительность таких световых импульсов достаточно короткая, порядка наносекунд.

Традиционно электрические сигналы от слабых световых сигналов измеряется вакуумными фотоумножителями. Развитие полупроводниковых технологий за последние два десятилетия привело к появлению кремниевых фотодиодов, работающих в гейгеровском режиме, называемых кремниевыми фотоумножителями (SiPM, silicon photomultiplier) или многопиксельными фотонными счетчиками (MPPC, multi-pixel photon counter). Далее в работе будет использоваться термин SiPM. В настоящее время SiPM уже хорошо зарекомендовали себя в сцинтилляционных детекторах [1] в счетном режиме, где требования на точность измерения светового потока и на ширину динамического диапазона достаточно мягкие. Известен также ряд приложений SiPM для регистрации однофотонных световых сигналов [2].

Для измерений световых сигналов в широком диапазоне амплитуд необходимы SiPM с большим количеством пикселей, а с ростом плотности потока света необходимо уменьшать размер пикселя для минимизации вероятности попадания нескольких фотонов в один пиксель. Современные эксперименты в физике высоких энергий рассматривают SiPM как направление модернизации фотодетекторов для адронной [3] и электромагнитной калориметрии [4]. Необходимый диапазон индуцированных зарядов от активного детектирующего элемента калориметра, измеренный в фотоэлектронах (ф.э.), можно оценить на примере сцинтиллирующего кристалла PbWO_4 , предлагаемого для электромагнитного калориметра эксперимента PANDA [5]. Световой выход одного полноразмерного кристалла этого калориметра составляет не менее 20 ф.э./МэВ. Для измерения энергии фотонов в диапазоне от 10 МэВ до 10 ГэВ необходимо регистрировать сигналы в диапазоне от 200 до 2×10^5 ф.э. Поскольку амплитуда сигнала от SiPM пропорциональна числу пикселей, активированных падающим светом, то на SiPM накладывается требование на количество пикселей в несколько сотен тысяч. Более точные требования на размер SiPM, размер и количество пикселей определяются особенностями конкретного калориметра — попечерными размерами детектирующего элемента, световым выходом, необходимым энергетическим разрешением и диапазоном энергий, задаваемыми физическими задачами данного эксперимента.

На рынке представлены SiPM производства Hamamatsu и Capital Photonics Technology (Tianjin) Co., Ltd., которые могут использоваться для спектрометрических измерений. В таблице 1 представлены несколько SiPM площадью $6.0 \times 6.0 \text{ мм}^2$ и размером пикселя от 10 до 20 мкм, которые рассматриваются как перспективные фотодетекторы для амплитудных измерений световых импульсов в широком дина-

мическом диапазоне. В данной работе исследуются характеристики одного из этих SiPM, а именно EQR15 11-6060D-S производства компании NDL с размером пикселя 15 мкм и количеством пикселей более 170 тыс.

Параметр	Hamamatsu S14160-6010PS [6]	Hamamatsu S14160-60105S [6]	NDL EQR15 11-6060D-S [7]	ZJGD EQR20 11-6060D-S [8]
размер, мм^2	6.0×6.0	6.0×6.0	6.24×6.24	6.24×6.24
размер пикселя, мкм	10	15	15	20
количество пикселей	359011	159565	173038	97344
напряжение пробоя V_{br} , В	38 ± 3	38 ± 3	30	27.2 ± 1
рабочее напряжение, В	$V_{br} + 5$	$V_{br} + 5$	$V_{br} + 8$	$V_{br} + 5$
эффективность регистрации фотонов, %	18	32	45	47.8
коэффициент усиления	1.8×10^5	3.6×10^5	4.0×10^5	8.0×10^5
скорость счета темновых импульсов, с^{-1}	$(3 - 10) \times 10^6$	$(3 - 10) \times 10^6$	10^7	$(6 - 16) \times 10^6$
длина волны в макс., нм	460	460	420	420
тепл.коэфф., мВ/С°	34	34	28	24.8
емкость, пФ	2200	2200	218	397

Таблица 1. Сравнительная таблица спектрометрических SiPM, представленных на рынке.

1. Фотодетекторы на основе матриц SiPM

Требования к фотодетекторам для регистрации световых импульсов от ячеек электромагнитного калориметра определяются конструкцией и технологией изготовления калориметра, световыходом радиаторов калориметра, диапазоном энергий первичных фотонов и энергетическим разрешением, определяемым физическими задачами эксперимента. Если рассматривать гомогенные калориметры, например, из свинцового стекла или неорганических сцинтилляторов, то в них регистрация сигнала происходит через торцы ячеек калориметра. Поперечный размер ячеек в свою очередь определяется Мольеровским радиусом вещества радиаторов калориметра. Ти-

личные электромагнитные калориметры, распространенные в физике высоких энергий, имеют поперечный размер ячеек от 22 – 26 мм, как в калориметрах на основе кристаллов вольфрамата свинца, до 40 – 85 мм как в калориметрах с радиаторами из свинцового стекла. К категории однородных детекторов относятся также и γ -спектрометры МэВ-ного диапазона энергий на основе сцинтилирующих кристаллов с большим световым выходом, например, таких как NaI(Tl), CsI(Tl), GAGG и др. При этом площадь фотодетектора, устанавливаемого на торце ячейки калориметра или γ -спектрометра, напрямую определяет эффективность светосбора и, соответственно, энергетическое разрешение всего детектора в целом. Поэтому для увеличения светосбора с радиаторами детекторов естественно использовать матрицы из SiPM.

Для объединения нескольких SiPM в один фотодетектор в литературе обсуждаются несколько схем. Оптимальной признана так называемая гибридная схема соединения нескольких SiPM, в которой напряжение смещения подается параллельно на все SiPM, а сигналы с индивидуальных SiPM снимаются последовательно через развязывающие емкости [9]. Схема объединения четырех SiPM в массив одного фотодетектора, который исследовался в данной работе, изображена на рис. 1. В случае объединения коммерческих SiPM производителя NDL, представленных в таблице 1, такой фотодетектор обеспечит сбор света с площади от $12.5 \times 12.5 \text{ mm}^2$, а с учетом высокой квантовой эффективности SiPM это уже позволяет рассматривать 2×2 -матрицу SiPM как альтернативу вакуумным ФЭУ.

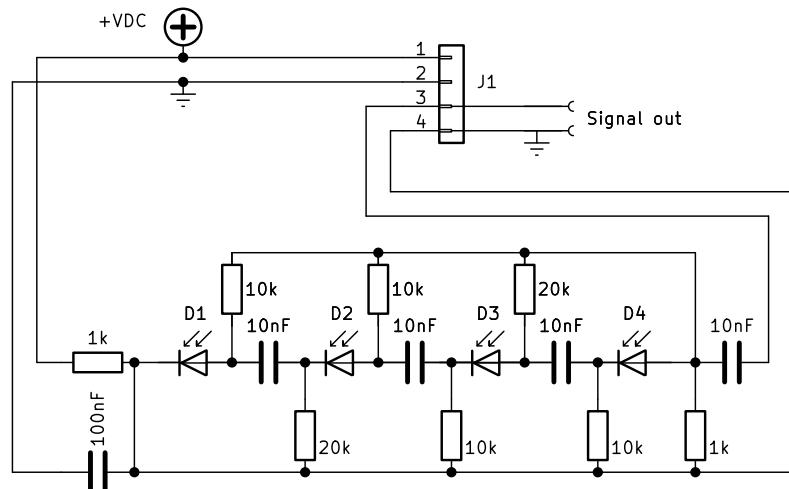


Рис. 1. Схема объединения четырех SiPM в фотодетекторную матрицу.

2. Выбор рабочего режима фотодетекторов на основе SiPM

Производитель SiPM EQR15 11-6060D-S указывает рекомендуемое рабочее напряжение, равное $V_{br} + 8$ В [7]. Чтобы определить оптимальное напряжение смещения для задач спектрометрических измерений, необходимо измерить вольт-амперную ха-

рактеристику фотодетектора, а также зависимости его коэффициента усиления и амплитудного разрешения от напряжения смещения. На рис. 2 представлена измеренная вольт-амперная характеристика для двух фотодетекторов — состоящего из одного SiPM и состоящего из четырех SiPM, соединенных по гибридной схеме. Для обоих фотодетекторов напряжение пробоя, при котором начинает течь ток через SiPM, равно примерно 31 – 32 В. При напряжениях выше 43 В поведение зависимости тока от напряжения меняет свой наклон, и ток резко возрастает.

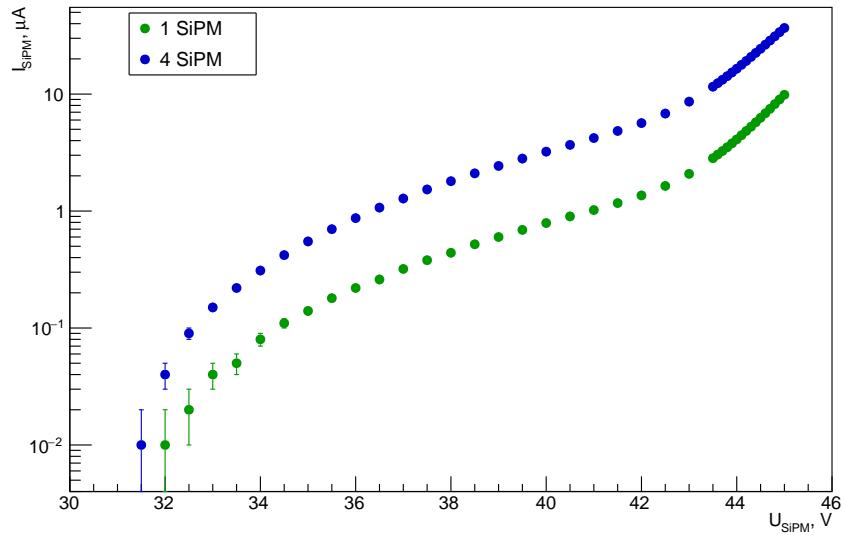


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика фотодетекторов с 1 и 4 SiPM (цвета в онлайн версии).

Были также измерены зависимости средней амплитуды и её среднеквадратичного отклонения от поданного напряжения смещения в диапазоне от 33 В до 45 В. В качестве импульсного источника света использовался генератор светодиодных импульсов с обратной связью, обеспечивающей стабильность светового потока не хуже 0.3%. Длительность световых импульсов генератора составляла 8 – 20 нс, длина волны излучаемого света $\lambda = 460$ нм, частота следования импульсов была 1000 Гц, амплитуда задавалась 12-битным кодом цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Спектры амплитуд измеренных сигналов от фотодетектора при каждом заданном напряжении U_{bias} подгонялись функцией Гаусса, из которой определялись среднее значение A и среднеквадратичное отклонение σ . Относительный коэффициент усиления K изменился при фиксированной амплитуде генератора светодиодных импульсов и определялся как отношение средней амплитуды сигнала A_U с фотодетектора при заданном напряжении U_{bias} к амплитуде A_{33} при напряжении $U_{\text{bias}} = 33$ В, $K = A_U/A_{33}$. На рис. 3 показаны зависимости относительного коэффициента усиления K и относительного амплитудного разрешения σ/A от напряжения U_{bias} , которые показывают изменение поведения при напряжениях выше 43 В. Важно отметить, что при напряжениях заметно выше 43 В, зависимость коэффициента усиления SiPM от напряже-

ния становится существенно нелинейной, а разрешение ухудшается. Таким образом, как вольт-амперная характеристика, так и усиление и амплитудное разрешение, указывают на то, что приемлемое рабочее напряжение на SiPM находится в диапазоне от напряжения пробоя до 43 В.

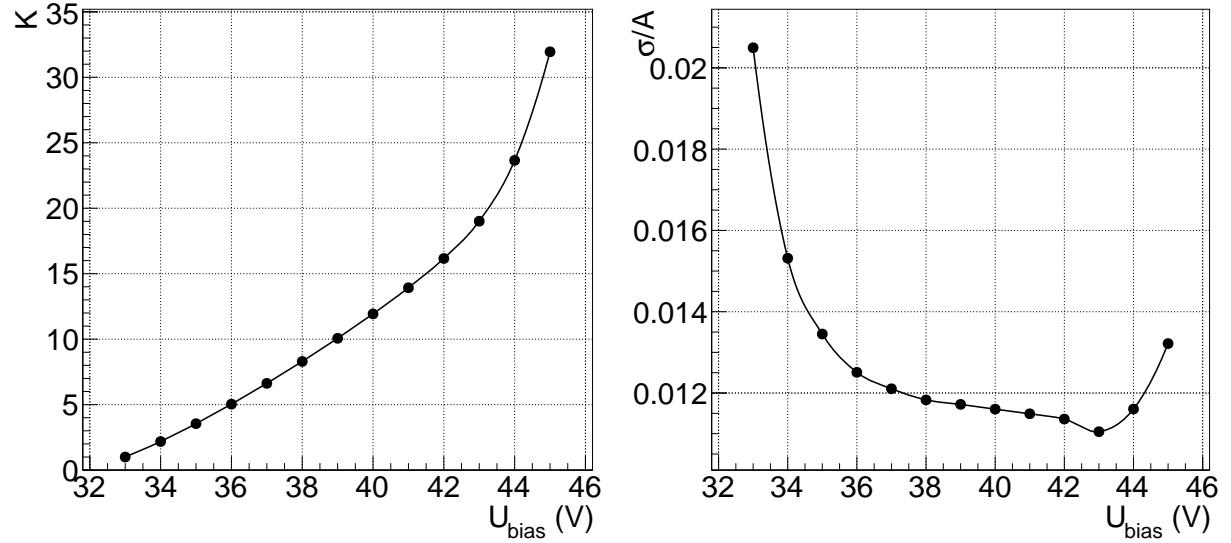


Рис. 3. Зависимости относительного коэффициента усиления (слева) и относительного амплитудного разрешения (справа) фотодетектора на основе SiPM от напряжения смещения.

3. Линейность фотодетектора на основе SiPM

Для спектрометрических детекторов линейность, т.е. пропорциональная зависимость измеряемого сигнала фотодетектора от падающего потока света, является важной характеристикой. Тем не менее, возможная нелинейность фотодетектора не является существенным препятствием для его применения в калориметрах в физике высоких энергий или в γ -спектроскопии в ядерной физике, т.к. сами детекторы могут обладать незначительной нелинейностью, вызванной неполным энерговыделением первичного фотона в радиаторе калориметра и порогом регистрирующей электроники. Поэтому нелинейность фотодетектора, если она есть, необходимо измерять отдельно для последующей калибровки измеряемого сигнала по отношению к энергии падающего фотона.

Для измерения зависимости амплитуды сигнала с фотодетектора, состоящего из четырех SiPM, от потока падающего света, был использован генератор светодиодных импульсов, описанный в предыдущем разделе. Поток падающего на фотодетектор света задавался кодом ЦАП генератора. Поскольку сам светодиодный генератор может быть нелинейным, то была проведена независимая проверка линейности от кода генератора амплитуды сигнала с фотоумножителя ФЭУ-84-3, широко использовавшегося ранее в электромагнитных калориметрах и хорошо зарекомендовавшего себя

как спектрометрический фотодетектор с широким динамическим диапазоном, обладающий линейностью отклика до амплитуд сигналов ≈ 1.3 В на нагрузке 50 Ом [10].

На левом рис. 4 показаны зависимости амплитуд сигналов с фотодетектора из четырех SiPM при напряжении смещения 42 В и с фотоумножителя ФЭУ-84-3 при напряжении 1700 В, от кода ЦАП светодиодного генератора A_{LED} . Отношение амплитуд фотодетектора на 4 SiPM при значениях напряжения смещения 40 и 42 В к амплитуде ФЭУ-84-3, нормированные на отношение при максимальном потоке света, показано на правом рис. 4. Наблюдается незначительная нелинейность отклика фотодетектора на 4-x SiPM относительно ФЭУ-84-3 на уровне 20% при $U_{bias} = 40$ В и 25% при $U_{bias} = 42$ В в диапазоне световых потоков, отличающихся более чем в 20 раз. Эта относительная нелинейность фотодетектора на 4 SiPM, измеренная с помощью светодиодного генератора, может служить для коррекции амплитуды.

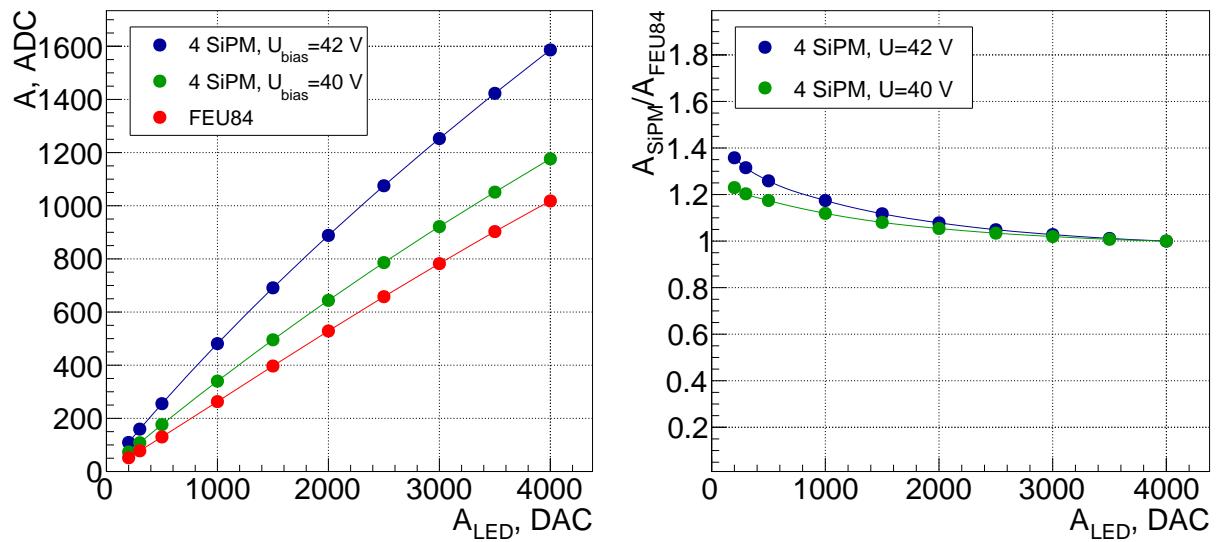


Рис. 4. Измеренные зависимости амплитуды сигнала с фотодетектора на основе 4-x SiPM при напряжениях 40 и 42 В и с ФЭУ-84-3 (слева) и отношения амплитуд 4 SiPM к ФЭУ-84-3 (справа) от кода ЦАП генератора светодиодных импульсов (цвета в онлайн версии).

4. Амплитудное разрешение фотодетекторов на основе SiPM

Для прецизионных спектрометрических измерений амплитудное разрешение детектора является одной из основных характеристик, по которой сравнивают различные детекторы данного класса. Одним из факторов, дающих вклад в амплитудное разрешение спектрометрического детектора, является внутренний шум измерительной электроники, в частности, шум фотодетектора, усилителя, электроники оцифровки сигнала. Этот шумовой вклад, как правило, не зависит от амплитуды сигнала. При регистрации слабых световых сигналов стохастический вклад, т.е. определяемый

стохастическими флуктуациями конечного числа фотоэлектронов, в разрешение детектора может быть определяющим. Точность задания амплитуды источника света тоже может влиять на измеряемое амплитудное разрешение изучаемого фотодетектора. Исследование разрешения фотодетектора на основе SiPM осуществлялось с помощью светодиодного генератора, вклад которого в измеряемое разрешение не больше 0.3%, поэтому влияние нестабильности генератора на разрешением не является определяющим.

Амплитуда измеряемого сигнала пропорциональна количеству зарегистрированных фотонов (фотоэлектронов), поэтому стохастический вклад в разрешение пропорционален квадратному корню из амплитуды. При достаточно широком потоке света количество зарегистрированных фотонов напрямую определяется площадью фотодетектора.

Была проведена серия измерений разрешений фотодетектора, состоящего из одного SiPM, и фотодетектора из четырех SiPM, соединенных по гибридной схеме, описанной выше. Для измерения зависимости разрешения от амплитуды сигнала фотодетектора использовался светодиодный генератор, амплитуда импульсов которого варьировалась во всем диапазоне 12-битного ЦАП, т.е. от 1 до 4095. На рис. 5 приведены зависимости относительного амплитудного разрешения σ/A от амплитуды измеренного сигнала для фотодетекторов из одного и четырех SiPM. Соотношение разрешений 1:2 для этих двух фотодетекторов прослеживается на всем диапазоне амплитуд, что подтверждает зависимость разрешения от квадратного корня соотношения площадей фотодетекторов или числа SiPM, установленных на фотодетекторах. Этот важный вывод о зависимости разрешения от количества SiPM в фотодетекторе можно использовать для экстраполяции на большее количество SiPM. Например, фотодетектор, состоящий из девяти SiPM, должен иметь трехкратное улучшение амплитудного разрешения по сравнению с фотодетектором с одним SiPM и т.д.

Фотодетектор из четырех SiPM был применен для спектрального анализа амплитуд с прототипа счетчика спектрометра гамма-ядерных переходов GNT эксперимента Гиперон+ [11] на основе кристалла NaI(Tl), который облучался в процессе калибровки спектрометра γ -источником ^{22}Na . Спектр излучения ^{22}Na содержит две линии с энергиями 511 и 1274.5 кэВ. Кристалл NaI(Tl) представляет собой цилиндр с размерами $D/L = 63/63$ мм. Фотодетектор был установлен на прозрачном торце инкапсулированного кристалла. Оптический контакт фотодетектора с кристаллом был обеспечен оптической замазкой фирмы Saint Gobain. Противоположный торец и боковая сторона кристалла имели матовые белые отражатели для изотропного отражения сцинтиляционного света, выходящего из кристалла. Поскольку суммарная площадь четырех SiPM, равная 155 mm^2 , в 20 раз меньше площади торца кристалла 3117 mm^2 , на котором был установлен фотодетектор, то 95% сцинтиляционного света, излучаемого кристаллом, не попадает в фотодетектор. Для улучшения светосбора на торце кристалла был установлен отражатель из белого матового тайвека в виде круга диаметром 63 мм с квадратным вырезом под фотодетектор из четырех SiPM. Такой отражатель улучшает светосбор в 1.5 раза.

Прототип счетчика был интегрирован в инфраструктуру детектора GNT. В про-

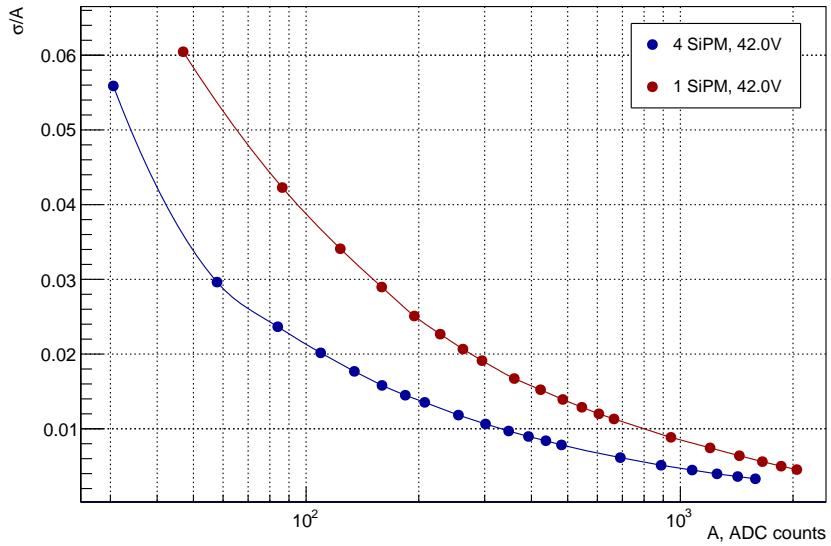


Рис. 5. Зависимости относительного амплитудного разрешения фотодетекторов из одного и четырех SiPM от амплитуды светового сигнала (цвета в онлайн версии).

цессе калибровки детектора сигналы со счетчика подавались для оцифровки на 12-битный зарядово-чувствительный АЦП ЕМ-6 [12], выполненный в стандарте Евро-МИСС [13]. Ввиду малой площади фотодетектора количество фотоэлектронов, регистрируемых счетчиком, оказалось не достаточным для проведения измерений в заданном энергетическом диапазоне, т.е. до 5 МэВ. Поэтому сигнал с фотодетектора был подан на АЦП через малошумящий усилитель с коэффициентом усиления 30. Полученный в результате спектр оцифрованных амплитуд приведен на рис. 6, где отчетливо видны два пика, при 524 и 1376 отсчетов АЦП, соответствующие γ -линиям 511 и 1274.5 кэВ источника ^{22}Na . Подгонка пиков функциями Гаусса с полиномиальным фоном дает относительное разрешение по энергии, равное

$$\left. \frac{\sigma}{A} \right|_{511 \text{ кэВ}} = 8.8\%, \quad \left. \frac{\sigma}{A} \right|_{1274 \text{ кэВ}} = 5.3\%,$$

что несколько хуже, чем разрешения для такого же счетчика, но с ФЭУ-184ТД в качестве фотодетектора, см. [11]. Вместе с тем, учитывая эффект улучшения разрешения счетчика с ростом площади фотодетектора, можно ожидать, например, что для фотодетектора в виде матрицы 4×4 SiPM разрешение будет близко к разрешению, получаемого в случае традиционного использования спектрометрических ФЭУ в качестве фотодетекторов.

Заключение

В работе на примере SiPM EQR15 11-6060D-S показано, что SiPM большой площади и размером пикселя 15 мкм могут быть использованы для регистрации свето-

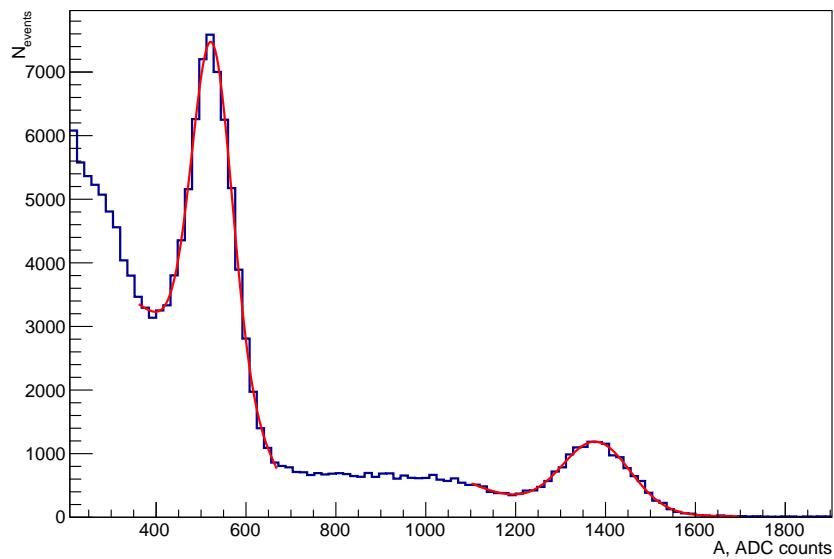


Рис. 6. Спектр амплитуд со счетчика на основе кристалла NaI(Tl) с фотодетектором в виде матрицы 2×2 SiPM, облученном γ -источником ^{22}Na .

вых импульсов в широком диапазоне световых потоков с достаточно хорошим амплитудным разрешением и линейностью отклика. Объединение нескольких SiPM в один фотодетектор по гибридной схеме позволяет увеличить эффективность сбора света при регистрации потоков света большой площади. При этом относительное амплитудное разрешение массива SiPM улучшается с ростом суммарной активной площади S_A фотодетектора или количества объединенных SiPM как $\sim 1/\sqrt{S_A}$. Мелкочастичные SiPM эффективны для детекторов, предназначенных для измерением амплитуды сигнала в широком динамическом диапазоне по энергии, например, в электромагнитных калориметрах. SiPM также могут использоваться в детекторах для гамма-ядерной спектроскопии на основе сцинтилирующих кристаллов с большим световым выходом. Такие фотодетекторы позволяют измерять амплитуды сигналов, варьирующихся более чем на 4 порядка величины.

На прототипе детектора гамма-ядерных переходов эксперимента Гиперон+ на основе кристалла NaI(Tl) показано, что фотодетектор в виде матрицы 2×2 SiPM EQR15 S14160-6010PS, объединенных по гибридной схеме, обеспечивает разрешение γ -линий радиоактивного источника ^{22}Na 511 кэВ и 1274.5 кэВ на уровне 8.8% и 5.3%, соответственно. Дальнейшее улучшение разрешения детектора GNT возможно за счет увеличения матрицы SiPM, объединенных в одном фотодетекторе.

Финансирование работы. Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00095-П, <https://rscf.ru/project/22-12-00095/>.

Список литературы

- [1] V. V. Brekhovskikh, A. M. Gorin, V. A. Dyatchenko, S. V. Evdokimov, A. A. Zaitsev, V. I. Izucheev, M. V. Medynskiy, V. I. Rykalin, S. A. Sadovsky, and A. A. Shangaraev, «Thin Scintillation Counters in Particle Detectors», *Instrum. Exp. Tech.* **67**, 619 (2024).
- [2] K. A. Balygin, V. I. Zaitsev, A. N. Klimov, S. P. Kulik, and S. N. Molotkov, «Implementation of a Quantum Random Number Generator Based on the Optimal Clustering of Photocounts», *JETP Letters* **106**, 470 (2017).
- [3] C. Seez, T. Virdee, et al., [CMS Collaboration], «The Phase-2 Upgrade of the CMS Endcap Calorimeter», *CERN-LHCC-2017-023*, *CMS-TDR-019* (2017).
- [4] K. A. Balygin et al., «Use of Large-Area Photodiodes for Improving the Characteristics of an Electromagnetic Calorimeter Based on Lead Tungstate Crystals», *Instrum. Exp. Tech.* **61**, 639–644 (2018).
- [5] A. Borisevich, A. Fedorov, A. Hofstaetter, M. Korzhik, B. K. Meyer, O. Misevich, and R. Novotny, «Lead tungstate scintillation crystal with increased light yield for the PANDA electromagnetic calorimeter», *Nucl. Instrum. Meth. A* **537**, 101–104 (2005).
- [6] Hamamatsu Photonics, «Single MPPCs (SiPMs) and multi-channel MPPCs Datasheet», online; accessed: https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array.html, (2025).
- [7] Novel Device Laboratory, «Regular SiPMs Datasheet», online; accessed: <http://www.ndl-sipm.net/PDF/Datasheet-EQR15.pdf>, (2025).
- [8] Capital Photonics Technology (Tianjin) Co., Ltd., «Regular SiPMs – EQR SiPM Datasheet», online; accessed: <https://en.zjgd.com.cn/upload/files/20241104/Datasheet-EQR20.pdf>, (2025).
- [9] M. Bonesini, R. Bertoni, A. Abba, F. Caponio, M. Prata, and M. Rossella, «Improving the Time Resolution of Large-Area LaBr₃:Ce Detectors with SiPM Array Readout», *Condens. Mat.* **8**, 99 (2023), [arXiv:2311.15949 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/2311.15949).
- [10] F. Binon, V. Buyanov, S. Donskov, et al., «Hodoscope multi-photon spectrometer GAMS-2000», *Nucl. Instrum. Meth. A* **248**, 86 (1986).
- [11] A. M. Gorin, S. V. Evdokimov, A. A. Zaitsev, V. I. Izucheev, D. S. Krinitzyn, B. V. Polishchuk, V. I. Rykalin, S. A. Sadovsky, Y. V. Kharlov, and A. A. Shangaraev, «Calibration of the Hyperon+ Gamma-Nuclear Transition Detector with an External Trigger», *Phys. Atom. Nucl.* **87**, 1649 (2024).
- [12] M. M. Soldatov and V. A. Senko, «A Module of a 48-Channel Integrating Analog-To-Digital Converter for Calorimeters in High-Energy Physics Experiments», *Instrum. Exp. Tech.* **62**, 324 (2019).

- [13] S. I. Bukreeva, N. M. Emelyanov, A. N. Isaev, Y. D. Karpekov, Y. S. Kiselev, V. S. Petrov, V. A. Senko, M. M. Soldatov, N. A. Shalanda, and V. I. Yakimchuk, «EuroMISS electronic system for physical setups of the institute of high-energy physics», *Instrum. Exp. Tech.* **57**, 671–675 (2014).

Рукопись поступила 22.12.2025 г.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Воронков Н.Е. и др.

Фотодетекторы на основе SiPM для спектроскопических измерений в широком динамическом диапазоне.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **ЛАТЭХ**.

Подписано к печати 24.12.2025 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1. Уч.-изд.л. 1,34. Тираж 68. Заказ 9. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2025-9,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2025
