

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 539.1.074.6

**ФОТОДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ SiPM ДЛЯ
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ШИРОКОМ
ДИНАМИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ**

**Н. Е. Воронков^a, А. М. Горин^a, С. В. Евдокимов^a, А. А. Зайцев^b,
В. И. Изучеев^a, Б. В. Полищук^a, В. И. Рыкалин^a, С. А. Садовский^a,
Ю. В. Харлов^{a,c,*}, А. А. Шангараев^a**

^a *Институт физики высоких энергий им. А.А. Логанова*

Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”

Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1

^b *Объединенный институт ядерных исследований*

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^c *Московский физико-технический институт*

Россия, 141701, Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9

**E-mail: Yuri.Kharlov@ihep.ru*

Поступила в редакцию 06.02.2026

После доработки 28.04.2026

Принята к публикации 17.06.2026

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.

Ключевые слова: ядерная спектроскопия, электромагнитные калориметры, фотодетекторы, кремниевые фотоумножители

1. ВВЕДЕНИЕ

Задачи измерений потоков слабых световых сигналов в видимом оптическом диапазоне стоят во многих областях физики. Световой поток сигналов преобразуется в фотодетекторе в электрический сигнал, 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 ее массу, т.е. тип частицы. Эти задачи налагают требования на основные характеристики фотодетекторов, измеряющих заряд от коротких и слабых световых импульсов со сцинтилляционных детекторов. Такими 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 применяемыми в физике высоких энергий и ядерной физике калориметрами и сцинтилляционными счетчиками, составляет от десятков до сотен тысяч фотоэлектронов. При этом длительность таких световых импульсов достаточно малая, порядка наносекунд.

Традиционно электрические сигналы от слабых световых сигналов измеряются 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 $2 \cdot 10^5$ ф.э. Поскольку амплитуда сигнала от SiPM пропорциональна числу пикселей, активированных падающим светом, на SiPM накладывается требование на количество пикселей в несколько сотен тысяч. Более точные требования на размер SiPM, а также размер и количество пикселей определяются особенностями конкретного калориметра – размерами детектирующего элемента, световыходом, необходимым энергетическим разрешением и диапазоном энергий, определяемыми физическими задачами данного эксперимента.

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

Таблица 1. Сравнительная таблица спектрометрических SiPM, представленных на рынке

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	$V_{br} + 5$	$V_{br} + 5$	$V_{br} + 8$	$V_{br} + 5$
Коэффициент усиления	$1.8 \cdot 10^5$	$3.6 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^5$	$8.0 \cdot 10^5$
Скорость счета темновых импульсов, с ⁻¹	$(3-10) \cdot 10^6$	$(3-10) \cdot 10^6$	10^7	$(6-16) \cdot 10^6$
Длина волны в максимуме эффективности λ_{max} , нм	460	460	420	420
Эффективность регистрации фотонов при λ_{max} , %	18	32	45	47.8
Температурный коэффициент V_{br} , мВ/°С	34	34	28	24.8
Емкость, пФ	2200	2200	218	397

2. ФОТОДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ МАТРИЦ SiPM

Требования к фотодетекторам для регистрации световых импульсов от ячеек электромагнитного калориметра определяются конструкцией и технологией изготовления калориметра, световых 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 молекулярным радиусом вещества радиаторов калориметра. Типичные 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 мегаэлектронвольтового диапазона энергий на основе сцинтиллирующих кристаллов с большим световыходом, например 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 от радиаторов детекторов естественно использовать матрицы из SiPM.

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

Рис. 1. Гибридная схема объединения четырех SiPM в фотодетекторную матрицу

3. ВЫБОР РАБОЧЕГО РЕЖИМА ФОТОДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ SiPM

Производитель SiPM EQR15 11-6060D-S указывает рекомендуемое рабочее напряжение, равное $V_{br} + 8 \text{ В}$ [7]. Чтобы определить оптимальное напряжение смещения для задач спектрометрических измерений, необходимо измерить вольт-амперную характеристику 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 четырех SiPM, соединенных по гибридной схеме. Для обоих фотодетекторов напряжение пробоя, при котором ток начинает течь через SiPM, равно примерно 31–32 В. При напряжениях выше 43 В зависимость тока от напряжения меняет свой наклон, и ток резко возрастает.

Рис. 2. Вольт-амперная характеристика фотодетекторов

Были также измерены зависимости средней амплитуды и ее среднеквадратичного отклонения от поданного напряжения смещения в диапазоне от 33 до 45 В. В качестве импульсного источника света использовался генератор светодиодных импульсов с обратной связью производства ООО “Высоковольтные системы”, обеспечивающий погрешность

стабилизации энергии вспышки 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). Производитель генератора светодиодных импульсов отмечает нелинейную зависимость амплитуды импульсов от значения кода ЦАП, поэтому амплитуда сигналов измерялась независимо, не основываясь на значении кода ЦАП. Амплитуда сигналов измерялась с помощью спектрометрического амплитудно-цифрового преобразователя АЦП-RS-8К с динамическим диапазоном 13 бит производства АО “НПЦ “АСПЕКТ” [10]. 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 измерялся при фиксированной амплитуде генератора светодиодных импульсов и определялся как отношение средней амплитуды сигнала A_U от фотодетектора при заданном напряжении U_{bias} к амплитуде A_{33} при напряжении $U_{bias} = 33$ 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. Погрешности измерений пренебрежимо малы благодаря высокой статистике набора данных, используемого для определения параметров амплитудных спектров. Важно отметить, что при напряжениях заметно выше 43 В зависимость коэффициента усиления SiPM от напряжения 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 (а) и относительного амплитудного разрешения (б) фотодетектора на основе SiPM от напряжения смещения

4. ЛИНЕЙНОСТЬ ФОТОДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ SiPM

Для спектрометрических детекторов линейность, т.е. пропорциональность зависимости 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, так как сами детекторы могут обладать незначительной нелинейностью, вызванной неполным энергосвободением 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 от фотодетектора на основе 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, была проведена независимая проверка линейности от кода генератора амплитуды сигнала от 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 примерно 1.3 В при нагрузке 50 Ом [11].

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

Рис. 4. Измеренные зависимости амплитуды сигнала с фотодетектора на основе четырех ...

Измерение абсолютного значения светового потока на чувствительную область SiPM не проводилось. Относительное изменение потока света при измерении линейности отклика фотодетектора на основе SiPM, показанного на рис. 4, составило величину более чем 30, оно было ограничено областью перекрытия динамического диапазона генератора светодиодных импульсов и диапазонов амплитуд сигналов от фотодетектора на основе четырех SiPM и ФЭУ-84-3.

5. 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. Одними из факторов, дающих вклад в амплитудное разрешение

спектрометрического детектора, являются внутренние шумы измерительной электроники, в частности шумы фотодетектора, усилителя и электроники оцифровки сигнала. Этот шумовой вклад, как правило, не зависит от амплитуды сигнала. При регистрации слабых световых сигналов стохастический вклад, т.е. вклад, 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 превышал 0.3%, поэтому влияние нестабильности генератора на разрешение не являлось определяющим.

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

Была проведена серия измерений разрешений фотодетектора на основе одного SiPM, и фотодетектора на основе четырех SiPM, соединенных по гибридной схеме, описанной выше. Для измерения зависимости разрешения фотодетектора от амплитуды сигнала 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 на основе 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.

Рис. 5. Зависимости относительного амплитудного разрешения

Фотодетектор на основе четырех SiPM был применен для спектрального анализа амплитуд с прототипа счетчика спектрометра гамма-ядерных переходов GNT эксперимента Гиперон+ [12] на основе кристалла NaI(Tl), который облучался в процессе калибровки спектрометра γ -источником ^{22}Na . Счетчик детектора GNT, состоящий из кристалла NaI(Tl) и

фотодетектора на основе четырех SiPM, схематично изображен на рис. 6. Спектр излучения источника ^{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. Радиоактивный источник ^{22}Na был установлен на одном торце цилиндра, а фотодетектор был установлен на противоположном прозрачном торце инкапсулированного кристалла. Учитывая радиационную длину NaI(Tl), равную $X_0 = 25.9$ мм, мы можем сказать, что между источником излучения γ -кванта и фотодетектором расстояние, равное 2.43 радиационных длин, что достаточно для полного поглощения энергии измеряемых γ -квантов. Оптический контакт фотодетектора с кристаллом был обеспечен оптической замазкой фирмы Saint Gobain. Противоположный торец и боковая поверхность кристалла имели матовые белые отражатели для изотропного отражения сцинтилляционного света, излучаемого в кристалле. Сцинтилляционный свет может быть зарегистрирован только лишь через один круглый открытый торец кристалла диаметром 63 мм. Поскольку суммарная площадь фотодетектора на основе четырех SiPM, равная 155 мм^2 , в 20 раз меньше площади торца кристалла 3117 мм^2 , на котором был установлен фотодетектор, 95% сцинтилляционного света, излучаемого через торец кристалла, не попадает в фотодетектор. Для улучшения светосбора на торце кристалла был установлен отражатель из белого матового тайвека – нетканого материала с высокой степенью диффузного отражения производства DuPont [13] – в виде круга диаметром 63 мм с квадратным вырезом под фотодетектор на основе четырех SiPM. При наличии такого матового отражателя излучение кристалла, выходящее через торец, возвращается обратно в кристалл и после внутренних отражений может попасть на фотодетектор. Фактически отражатель улучшает светосбор в 1.5 раза.

Рис. 6. Схематическое изображение элемента детектора GNT...

Спектр излучения γ -источника ^{22}Na был измерен с помощью того же спектрометрического амплитудно-цифрового преобразователя АЦП-RS-8K, который использовался для измерения амплитудного разрешения фотодетекторов. Ввиду малой площади фотодетектора количество фотоэлектронов, регистрируемых счетчиком, оказалось недостаточным для проведения измерений в заданном энергетическом диапазоне, т.е. до 5 МэВ. Поэтому сигнал от фотодетектора был подан на АЦП через малошумящий усилитель с коэффициентом усиления 30. Спектр оцифрованных амплитуд приведен на рис. 7а, где отчетливо видны два пика: при 80 и 196 отсчетах АЦП, соответствующие γ -линиям 511 и 1274.5 кэВ источника ^{22}Na .

Рис. 7. Спектр амплитуд со счетчика на основе кристалла NaI(Tl) с фотодетектором в виде матрицы 2×2 SiPM,

Прототип счетчика детектора GNT был также интегрирован в инфраструктуру детектора эксперимента Гиперон+, при этом в процессе калибровки детектора сигналы от счетчика подавались для оцифровки на 12-битный зарядово-чувствительный АЦП ЕМ-6 [14], выполненный в стандарте Евро-МИСС [15]. Полученный в результате спектр оцифрованных амплитуд приведен на рис. 7а, где отчетливо видны два пика: при 524 и 1376 отсчетах АЦП, соответствующие γ -линиям излучения источника ^{22}Na . Подгонка пиков функциями Гаусса с полиномиальным фоном дает немного лучшее относительное разрешение по энергии при использовании АЦП-RS-8K, в результате это разрешение составляет

$$\frac{\sigma}{A}\bigg|_{511 \text{ кэВ}} = 6.9\%, \quad \frac{\sigma}{A}\bigg|_{1274 \text{ кэВ}} = 3.9\%,$$

что несколько хуже, чем разрешения для такого же счетчика, но с ФЭУ-184ГД в качестве фотодетектора [12]. 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, получаемому в случае традиционного использования спектрометрических ФЭУ в качестве фотодетекторов.

Динамический диапазон фотодетектора на основе SiPM, полученный в результате сравнения измерений спектров γ -излучения радиоактивного источника ^{22}Na с усилителем сигнала и генератора светодиодных импульсов без усилителя, соответствует энергии первичных γ -квантов от 0.2 до 320 МэВ, что составляет более трех порядков величины.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на примере SiPM EQR15 11-6060D-S показано, что SiPM большой площади с размером пикселя 15 мкм могут быть использованы для регистрации световых 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 светосбора 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 пропорционально $1/\sqrt{S_A}$. Мелкоячеистые SiPM эффективны для детекторов, предназначенных для измерения амплитуды сигнала в широком динамическом диапазоне по энергии, например в электромагнитных калориметрах. SiPM также могут

использоваться в детекторах для гамма-ядерной спектроскопии на основе сцинтиллирующих кристаллов с большим световыходом. Измерения, проведенные в настоящей работе, демонстрируют способность таких фотодетекторов измерять амплитуды сигналов, варьирующихся более чем на три порядка величины. Поскольку динамический диапазон измерений был ограничен лишь доступными источниками фотонов от радиоактивного источника и светодиодного генератора, можно утверждать, что диапазон самих фотодетекторов на основе SiPM гораздо шире.

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 6.9% и 3.9%, соответственно. Дальнейшее улучшение разрешения детектора GNT возможно за счет увеличения матрицы SiPM, объединенных в одном фотодетекторе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00095-П, <https://rscf.ru/project/22-12-00095/> при поддержке НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских В.В., Горин А.М., Дятченко В.А. и др.* ПТЭ. 2024. № 4. С. 5. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80253632>
[Brekhovskikh V.V., Gorin A.M., Dyatchenko V.A., et al. Instrum. Exp. Tech. 2024. V. 67. P. 619. <https://doi.org/10.1134/S0020441224700957>].
2. *Балыгин К.А., Зайцев В.И., Климов А.Н., Кулик С.П., Молотков С.Н.* Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. С. 451 <https://doi.org/10.7868/S0370274X17190109>
[Balygin K.A., Zaitsev V.I., Klimov A.N., Kulik S.P., Molotkov S.N. JETP Lett. 2017. V. 106. P. 470. <https://doi.org/10.1134/S0021364017190043> .]
3. *Seez C., Virdee T., et al., (CMS Collaboration).* The Phase-2 Upgrade of the CMS EndcapCalorimeter. CERN-LHCC-2017-023, CMS-TDR-019. 2017.
<https://doi.org/10.17181/cern.iv8m.1jy2> .
4. *Балыгин К.А., Ипполитов М.С., Климов А.И. и др.* ПТЭ. № 5. 2018. С. 13. <https://doi.org/10.1134/S003281621804016X>
[K.A. Balygin, M.S. Ippolitov, A.I. Klimov et al. Instrum. Exp. Tech. 2018. V. 61. P. 639. <https://doi.org/10.1134/s0020441218040140>].

5. *Borisevich A., A. Fedorov A., A. Hofstaetter A. et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2005. V. 537. P. 101. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.07.244> .
6. Hamamatsu Photonics. Single MPPCs (SiPMs) and multi-channel MPPCs Datasheet. 2025. https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array.html.
7. Novel Device Laboratory. Regular SiPMs Datasheet. 2025. <http://www.ndl-sipm.net/PDF/Datasheet-EQR15.pdf>
8. Capital Photonics Technology (Tianjin) Co., Ltd. Regular SiPMs – EQR SiPM Datasheet. <https://en.zjgd.com.cn/upload/files/20241104/Datasheet-EQR20.pdf> , (2025).
9. *Bonesini M., Bertoni R., Abba A., Caponio F., Prata M., Rossella M.* Condens. Matter. 2023. V. 8. P. 99. <https://doi.org/10.3390/condmat8040099> .
10. АО НППЦ АСПЕКТ. Модули ядерной электроники. 2025. <https://www.aspect-dubna.ru/>.
11. *Binon F., Buyanov V., Donskov S., et al.* Nucl. Instrum. Meth. A 1986. V. 248. P. 86. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(86\)90501-2](https://doi.org/10.1016/0168-9002(86)90501-2) .
12. *Горин А.М., Евдокимов С.В., Зайцев А.А. и др.* Ядерная физика и инжиниринг. 2024. Т. 15. № 6. С. 590. <https://doi.org/10.56304/S2079562924060149>
[*Gorin M., Evdokimov S.V., Zaitsev A.A., et al.* Phys. At. Nucl. 2024. V. 87. P. 1649. <https://doi.org/10.1134/S1063778824090126> .
13. DuPont tyvek, 2025. <https://www.dupont.com/brands/tyvek.html> .
14. *Солдатов М.М., Сенько В.А.* ПТЭ. 2019. № 3. С. 25. <https://doi.org/10.1134/S0032816219030108>
[*Soldatov M.M., Senko V.A.* Instrum. Exp. Tech. 2019. V. 62. P. 324. <https://doi.org/10.1134/S0020441219030102> .]
15. *Букреева С.И., Емельянов Н.М., Исаев А.Н. и др.* ПТЭ. № 6. 2014. С. 23. <https://doi.org/10.7868/S003281621405005X>
[*Bukreeva S.I., Emelyanov N.M., Isaev A.N., et al.* Instrum. Exp. Tech. 2014. V. 57. P. 671. <https://doi.org/10.1134/S0020441214050054>].

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Гибридная схема объединения четырех SiPM в фотодетекторную матрицу
- Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика фотодетекторов на основе одного и четырех SiPM
- Рис. 3.** Зависимости относительного коэффициента усиления **(а)** и относительного амплитудного разрешения **(б)** фотодетектора на основе SiPM от напряжения смещения
- Рис. 4.** Измеренные зависимости амплитуды сигнала с фотодетектора на основе четырех SiPM при напряжениях 40 и 42 В и с ФЭУ-84-3 **(а)** и отношения амплитуд четырех SiPM к ФЭУ-84-3 **(б)** от кода ЦАП генератора светодиодных импульсов
- Рис. 5.** Зависимости относительного амплитудного разрешения фотодетекторов на основе одного и четырех SiPM от амплитуды светового сигнала
- Рис. 6.** Схематическое изображение элемента детектора GNT, состоящего из кристалла NaI(Tl) и фотодетектора на основе четырех SiPM
- Рис. 7.** Спектр амплитуд со счетчика на основе кристалла NaI(Tl) с фотодетектором в виде матрицы 2×2 SiPM, облученном γ -источником ^{22}Na : **а** – для оцифровки амплитуд использовался АЦП-RS-8К, **б** – АЦП ЕМ-6. Красными линиями показаны подгоночные функции Гаусса с полиномиальным фоном, описывающим пики γ -излучений 511 и 1274 кэВ

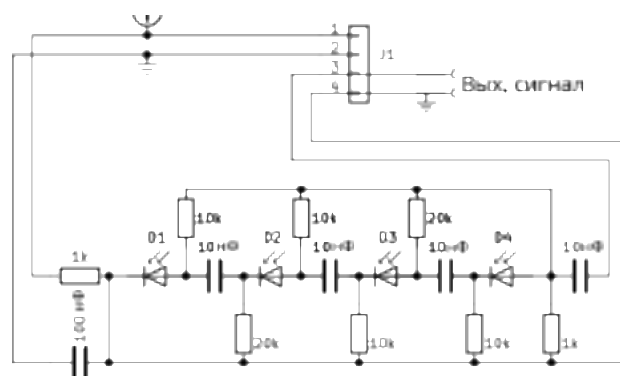


Рис. 1.

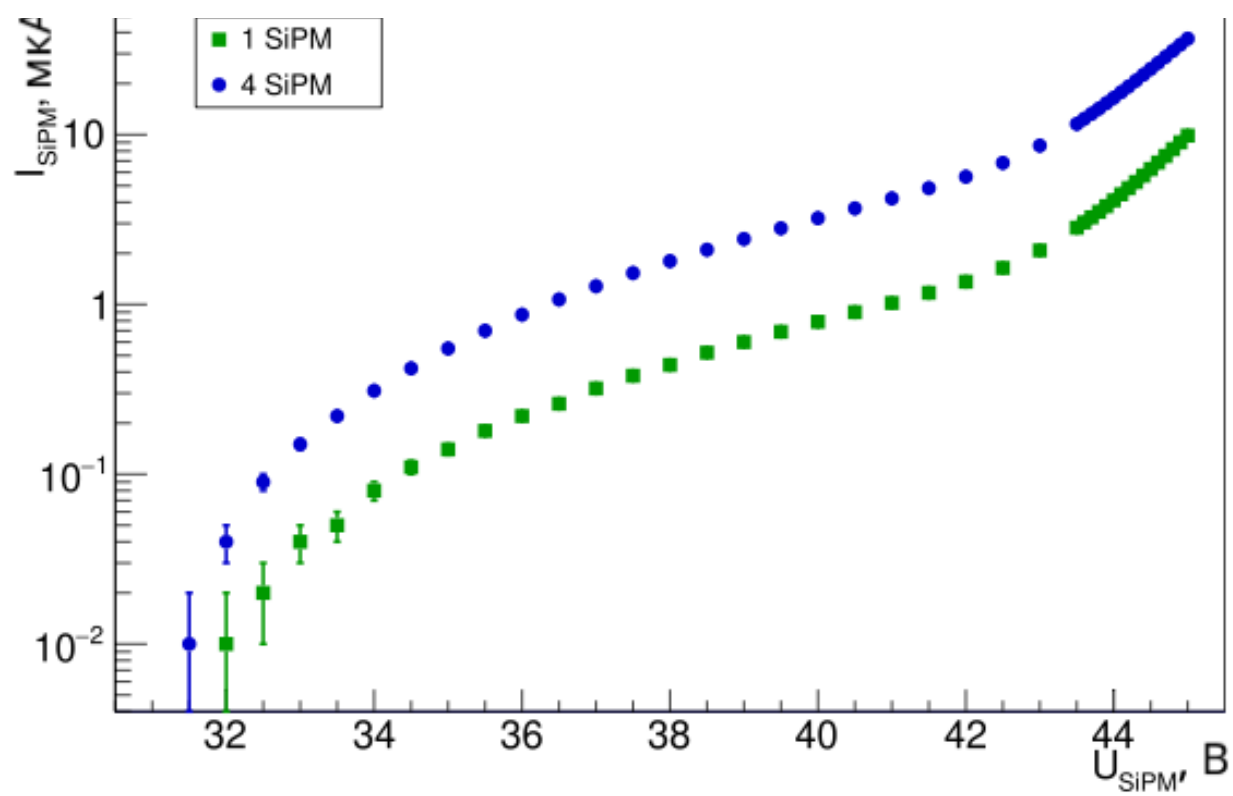
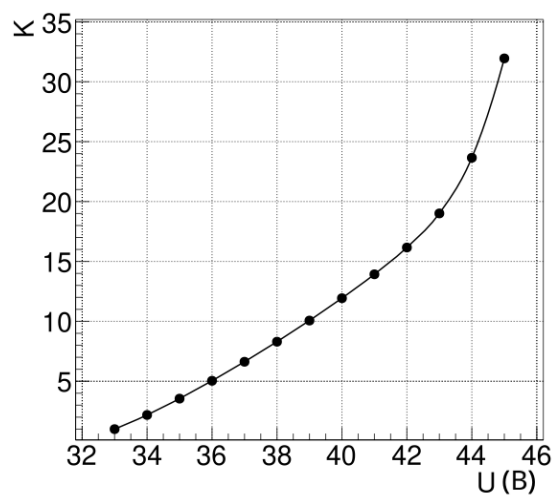
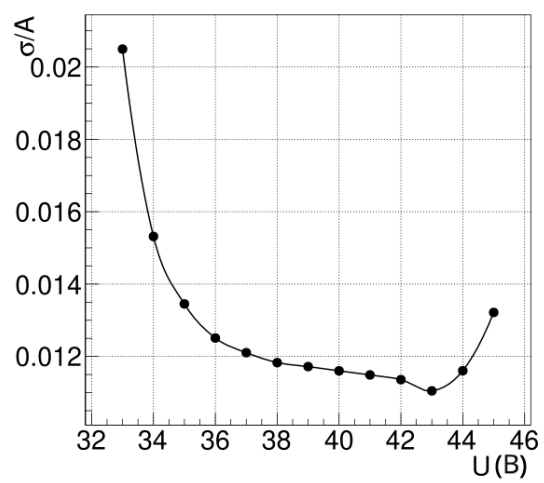


Рис.2.

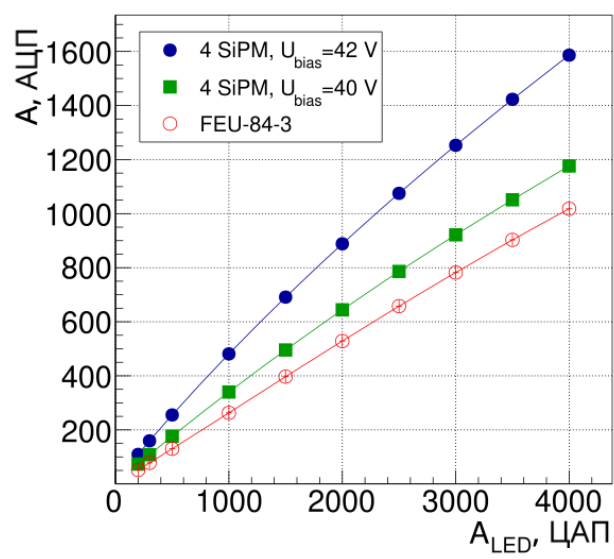


(a)

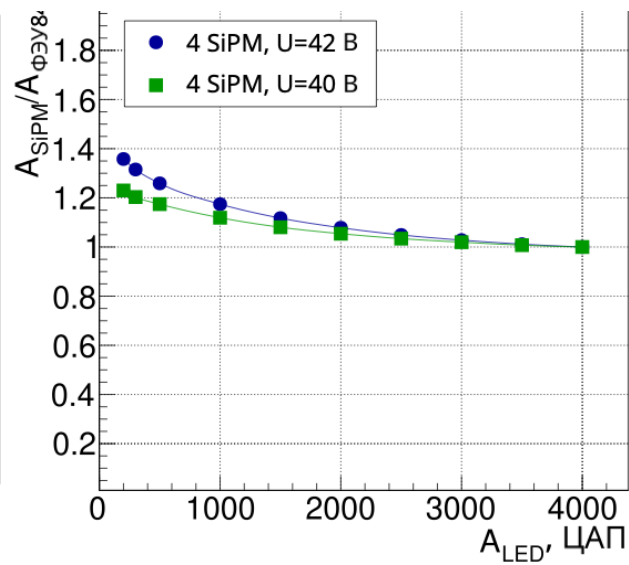


(б)

Рис.3.



(a)



(б)

Рис.4.

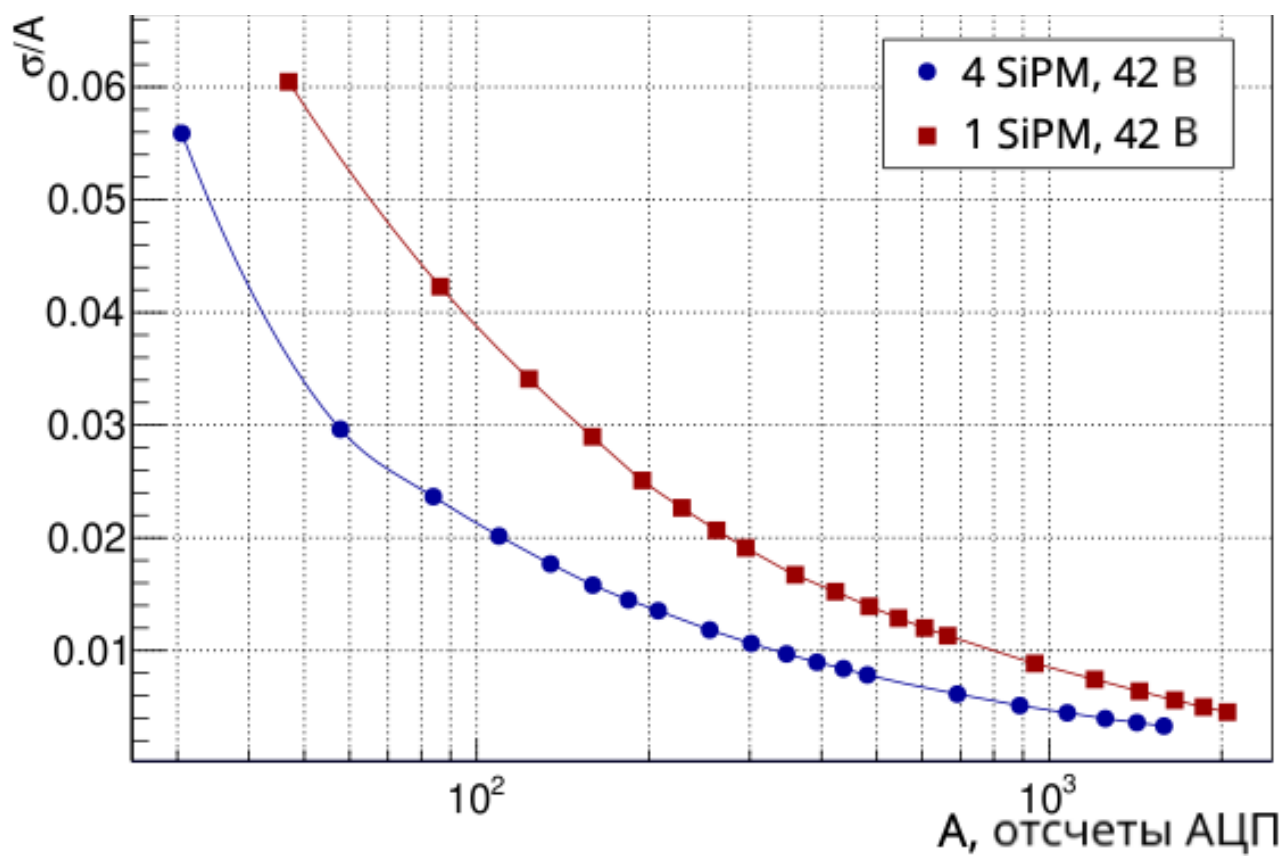


Рис. 5.

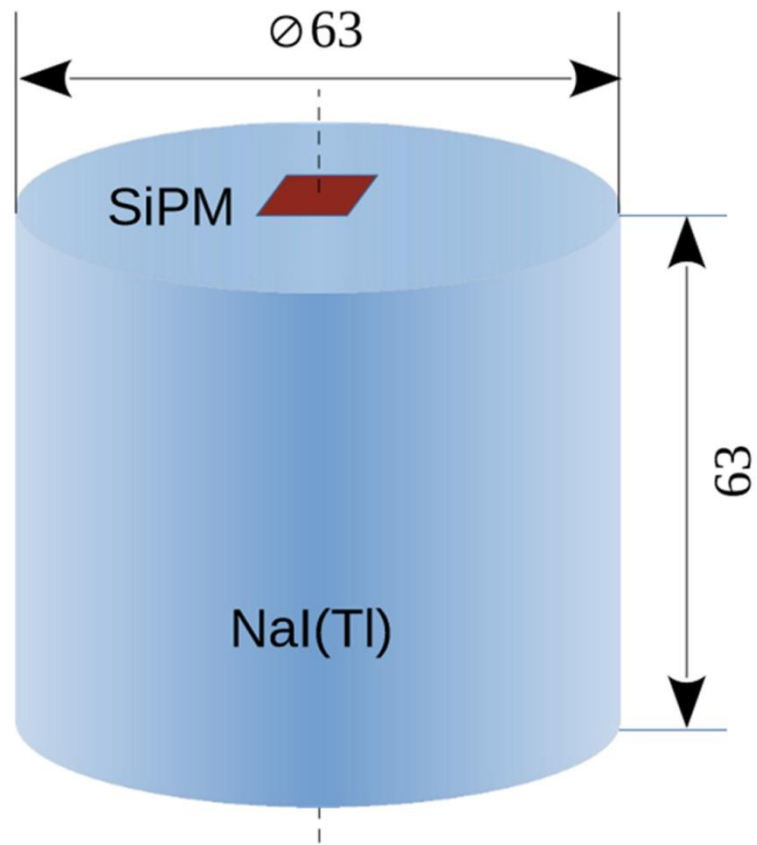
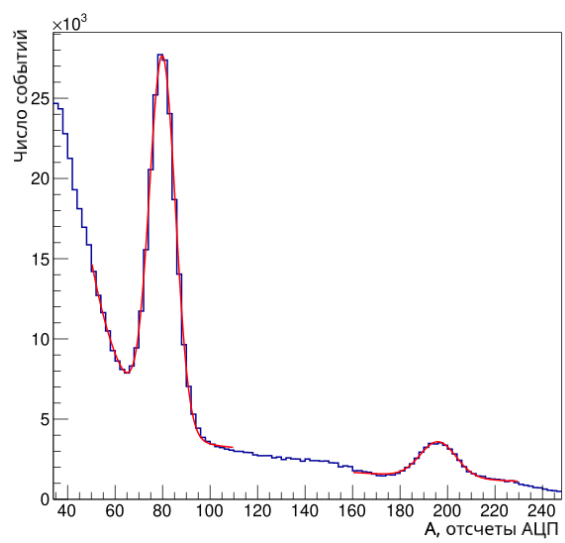
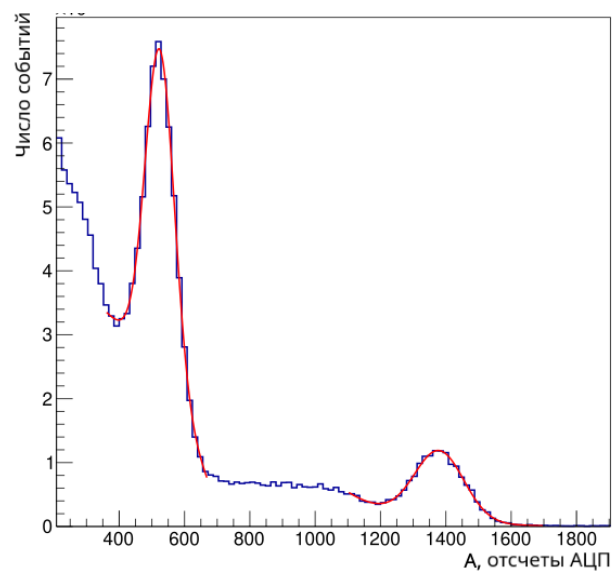


Рис. 6.



(a)



(б)

Рис.7.