

УДК 539.122.16:543.429.3

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/73

Т.Г. НИКИШКИН

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПОРТАТИВНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИКРОПИКСЕЛЬНЫХ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ *

Исследована возможность разработки портативного детектора гамма-излучения с чувствительным элементом на основе связки твердотельный фотодетектор – сцинтиллятор. Проведены исследования характеристик и возможности применения кремниевых фотодиодов в качестве фотоприемников для сцинтилляционных детекторов в различных прикладных задачах регистрации гамма-излучения.

Ключевые слова: гамма-излучение, твердотельный детектор, сцинтиллятор, микропиксельные лавинные фотодиоды, твердотельный фотоэлектронный умножитель, кремниевый фотоумножитель, портативный детектор, микропиксельный лавинный фотодиод, сцинтилляционный детектор.

Введение

В науке и технике широко применяются детекторы для регистрации нейтронного (n) и гамма (γ)- излучений. Данные детекторы применяются для измерения характеристик ядерных материалов и радиоактивных веществ, а также для проведения ядерно-физических экспериментов.

Одним из наиболее распространенных типов детекторов являются детекторы на базе сцинтилляционных материалов, в основу работы которых положено преобразование энергии частиц в энергию пропорциональных световых вспышек с определенным спектром высвечивания и последующей регистрации фотонов фотоприемником. Интерес к сцинтилляционным детекторам связан с их высокой эффективностью и оптимальной разрешающей способностью при относительной простоте устройства. Поэтому при решении многих научных и практических задач сцинтилляционные спектрометры успешно конкурируют с полупроводниковыми, обладающими высокой разрешающей способностью, но существенно меньшей эффективностью регистрации, а методы спектрометрии, построенные на основе сцинтилляционного принципа регистрации все еще сохраняют значительный потенциал для своего совершенствования.

В общем случае сцинтилляционный детектор состоит из сцинтиллятора, который выдает вспышку света под действием ионизирующего излучения, и фотоприемника для регистрации и преобразования этой вспышки в электрический сигнал для дальнейшей обработки. Большинство используемых в экспериментах сцинтилляторов имеют максимум свечения в видимой области спектра с длиной волны от 415 до 480 нм. Самыми распространенными фотоприемниками являются вакуумные фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Достоинство их заключается в высокой чувствительности и в том, что максимум чувствительности совпадает с максимумом длины волны свечения сцинтиллятора. Однако ФЭУ имеет ряд существенных недостатков, таких, как необходимость высоковольтного питания, большие габариты, высокая стоимость и необходимость магнитного экранирования [1].

В настоящее время в качестве альтернативы фотоэлектронным умножителям существуют новые типы фотоприемников, которые лишены данных недостатков. Их можно разделить на две большие группы: фотодетекторы без внутреннего усиления заряда (PIN-фотодиоды), фотодетекторы с внутренним усилением заряда (лавинные фотодиоды (ЛФ) и микропиксельные лавинные фотодиоды (МЛФД)) [2].

К недостаткам PIN-фотодиодов можно отнести необходимость использования внешнего усилителя, что из-за шумов самого усилителя не позволяет зарегистрировать вспышку света с количеством фотонов < 1000 .

МЛФД превосходят фотоэлектронные умножители по целому ряду параметров: низкое напряжение питания, меньшая потребляемая мощность, высокая надежность и стабильность характеристик, нечувствительность к магнитным полям, высокая линейность световой характеристики в широком диапазоне интенсивности светового потока. Несмотря на их очевидные преимущества, они пока не получили широкого распространения, более того, не все специалисты знают об их су-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта на выполнение НИР № 13452ГУ/2018.

существовании. Однако в последнее время многие образцы таких фотодиодов стали коммерчески доступны и могут стать заменой традиционных ФЭУ.

Исследование характеристик микропиксельных лавинных фотодиодов с точки зрения регистрации ионизирующего излучения

Регистрация ядерного излучения основана на физических и химических эффектах, которые возникают при взаимодействии ядерного излучения с веществом. На таких эффектах базируются методы регистрации и обработки гамма-излучения.

К созданию новых детекторов чаще всего предъявляются противоречивые требования. Современные детекторы должны обладать максимальным быстродействием, высокой эффективностью и высоким энергетическим разрешением, имея при этом минимальные размеры и невысокую конечную стоимость.

Для разработки модели детектора было решено использовать полупроводниковые микропиксельные лавинные фотодиоды, так называемые твердотельные ФЭУ, которые существенно превосходят классические фотоэлектронные умножители по целому ряду параметров и являются перспективными для разработки сцинтилляционных детекторов (табл. 1). По сравнению с ФЭУ, фотодиоды гораздо прочнее и компактнее, имеют очень высокий коэффициент усиления, высокую квантовую эффективность, работают от низкого напряжения питания, не подвержены воздействию внешних электрических полей и имеют значительно меньшую стоимость [3].

Таблица 1

Сравнительные характеристики фотодетекторов [2]

Параметр	МЛФД	ФЭУ
Эффективность регистрации света с длиной волны, %		
470 нм	15	20
590 нм	25	7–15
670 нм	15	<1
Усиление	10^5 – 10^6	10^6 – 10^8
Фактор шума, ENF	1.1–1.3	1.15–4
Пороговая чувствительность, фотоэлектроны	1	1
Разброс времени срабатывания, нс	0.3	1
Динамический диапазон	10^2 – 10^4	10^2 – 10^3
Напряжение смещения, В	25–80	1000–2000
Работа в магнитном поле	Можно	Нельзя

Микропиксельные лавинные фотодиоды являются новым направлением для спектрометрии и приборостроения. МЛФД – это пиксельное устройство, где каждый пиксель или микроячейка представляет собой последовательную комбинацию лавинного фотодиода и гасящего резистора. МЛФД позволяет регистрировать отдельные заряженные частицы. Однако не все падающие фотоны могут вызвать срабатывание микроячейки. Поэтому для фотодиодов введено понятие эффективности детектирования фотонов (Photodetection Efficiency – PDE), которое определяется количеством фотонов, вызывающих срабатывания микроячеек, к общему числу падающих фотонов. Иными словами, PDE – это вероятность того, что падающий на фотоприемную площадку МЛФД фотон будет зарегистрирован. Для модели разрабатываемого детектора был выбран МЛФД серии C – 60035, квантовая эффективность которого достигает 41%. При использовании детекторов на основе МЛФД будут обеспечены их одинаковые характеристики при одинаковом напряжении питания.

Главным источником шума в МЛФД является темновой счет, сильно зависящий от температуры. Высокое усиление МЛФД делает шум электроники незначительным по сравнению с данным шумом. Он возникает вследствие спонтанного срабатывания микропикселей от носителей заряда, возникающих в чувствительной области микроячеек в отсутствие светового воздействия, и характеризуется таким параметром, как скорость темнового счета (число импульсов в секунду). Для выбранного МЛФД максимальный темновой ток равен 1.7 мкА [4].

Выходной сигнал МЛФД пропорционален числу сработавших микроячеек и таким образом зависит от числа падающих фотонов. Значение динамического диапазона МЛФД определяется числом микропикселей, количество которых составляет 18980. По величине динамического диапа-

зона, МЛФД ($\approx 1.9 \cdot 10^4$) опережают стандартные ФЭУ ($\approx 10^3$) и могут составлять им достойную конкуренцию при выборе фотоприемника для различных прикладных физических задач.

Временные характеристики МЛФД определяются временем гейгеровского разряда и временем восстановления микроячейки. В системе сцинтиллятор – МЛФД временные характеристики выходного импульса также зависят от типа сцинтиллятора и быстродействия схемы усиления сигнала.

Принцип работы твердотельного сцинтилляционного детектора

Принцип работы сцинтилляционного детектора заключается в следующем. При попадании ионизирующего излучения в рабочий объем сцинтилляционного кристалла, в нем образуются электроны и дырки, которые под действием электрического поля, приложенного к электродам, двигаются в направлении электродов, собираются на них, и это приводит к возникновению электрического сигнала в цепи. Образующиеся при этом импульсные сигналы напряжения или тока используются для идентификации ионизирующего излучения. Число возникших электрон-дырочных пар практически полностью зависит только от энергии, потерянной ионизирующей частицей в рабочем объеме детектора, и не зависит от каких-либо других характеристик этой частицы.

Это условие позволяет обеспечить линейную связь между амплитудой импульса и энергией частицы, потерянной в объеме детектора. Для обеспечения максимальной эффективности разделения светогенерированных носителей заряда и полного обеднения i -слоя кремниевого микропиксельного лавинного детектора на его контакты необходимо подать обратное смещение порядка 24.2–24.7 В.

Фотоприемник в виде микропиксельного лавинного фотодетектора с активной областью 6×6 мм позволяет регистрировать видимое излучение электромагнитного спектра в диапазоне от 300 до 950 нм. Максимум спектральной чувствительности фотоприемника находится в диапазоне от 430 до 470 нм, что позволяет использовать его практически с любым сцинтиллятором. Максимальная квантовая эффективность фотоприемника составляет 41% при рабочем напряжении от 24.2 до 24.7 В, а темновой ток при этом не превышает 1750 нА [4].

Сцинтилляционный кристалл германата висмута BGO обладает большой плотностью и, следовательно, малой радиационной длиной $X_0 = 1.2$ см, не гигроскопичен, легко обрабатываем. Спектр его излучения с максимумом 480 нм соответствует чувствительности фотодиодов. Сцинтиллятор BGO обладает высокой прозрачностью, длина затухания достигает 3.5–4 м. Время свечения составляет 300 нс, но сильно зависит от температуры, что, пожалуй, является его единственным недостатком [5].

На рис. 1 представлен разрез чувствительного элемента сцинтилляционного детектора, где 1 – твердотельный детектор на основе микропиксельного лавинного фотодиода с размером активной области 6×6 мм, 2 – сцинтилляционный кристалл BGO размерами 10×10 мм, соединенный с активной областью твердотельного детектора оптически прозрачным клеем [6].



Рис. 1. Чувствительный элемент детектора в разрезе

На рис. 2 представлена функциональная схема основных составляющих сцинтилляционного твердотельного детектора. К основным составляющим детектора ионизирующего излучения на основе твердотельного фотоумножителя относится детектор ионизирующего излучения, предназначенный для регистрации низкоэнергетического и высокоэнергетического гамма-излучения, состоящий из чувствительного элемента в виде полупроводникового микропиксельного лавинного фотодиода размером активной области 6×6 мм и квантовой эффективностью 41%, соединенный поверхностью активной области со сцинтилляционным кристаллом BGO 10×10 мм оптически прозрачным клеевым веществом. Устройство отличается тем, что содержит предварительный усилитель, быстродействующий малошумящий дифференциальный операционный усилитель с широкой

полосой пропускания, помещенный в изолированный корпус с выходом усилителя для подключения ко входу амплитудно-цифрового преобразователя (АЦП), и блок питания.

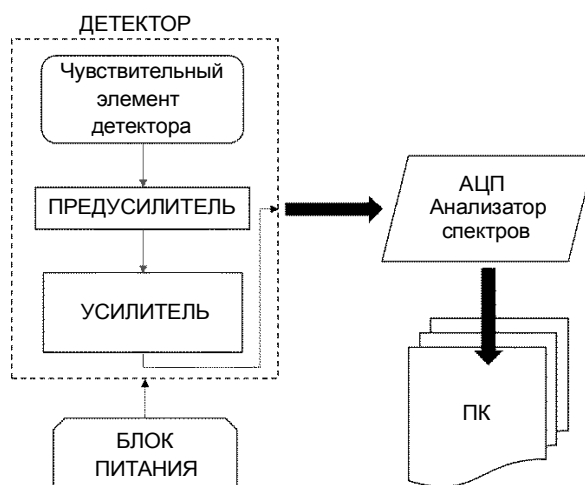


Рис. 2. Функциональная схема основных составляющих сцинтилляционного твердотельного детектора

Экспериментальная часть

Для оценки работоспособности собранной схемы был проведен эксперимент по использованию разработанного макета детектора на восприимчивость и отклик к ионизирующему излучению. Для съема аналогового сигнала макет детектора был подключен к осциллографу Tektronix TDS 2024. Далее вблизи детектора устанавливались образцовые спектрометрические гамма-источники (ОСГИ) Cs-137 и Ba-133. Эксперимент показал, что макет портативного переносного детектора гамма-излучения позволяет регистрировать ионизирующее излучение от различных гамма-источников. Был проведен эксперимент по использованию разработанного макета детектора в режиме интегрального счета гамма-квантов. Вблизи детектора устанавливались следующие образцовые спектрометрические гамма-источники Cs-137 и Am-241. Макет детектора подключался к дискриминатору и затем сигнал подавался на счетчик импульсов. В табл. 2 приведены характеристики образцовых спектрометрических гамма-источников и полученная скорость счета макета детектора.

Таблица 2

Характеристики ОСГИ и скорость счета макета детектора

Источник	Активность, Бк	Энергия гамма-квантов, кэВ	Скорость счета, имп./с
Cs-137	8500	661	245
Am-241	10000	59	113

Таким образом, по результатам эксперимента были получены следующие данные:

1. ОСГИ – Am-241 ($A = 10000$ Бк; $k = 0.36$):

$$N_{\pi} = \frac{1000 \cdot 0.36 \cdot 1.1}{4 \cdot 3.14 \cdot 0.5^2} = 1146 \text{ квант/с}, \quad (1)$$

$$\Theta_{Am} = \frac{113}{1146} = 0.10. \quad (2)$$

2. ОСГИ – Cs-137 ($A = 8500$ Бк, $k = 0.85$):

$$N_{\pi} = \frac{8500 \cdot 0.85 \cdot 1.1}{4 \cdot 3.14 \cdot 0.5^2} = 2300 \text{ квант/с}, \quad (3)$$

$$\Theta_{Cs} = \frac{245}{2300} = 0.11. \quad (4)$$

Из эксперимента видно, что макет портативного переносного детектора гамма-излучения позволяет регистрировать ионизирующее излучение от различных гамма-источников.

Заключение

Выполнен обзор существующих перспективных типов фотоприемников для детекторов гамма-излучения, в том числе сцинтилляционных детекторов. Исследованы характеристики микропиксельных лавинных фотодиодов с точки зрения регистрации ионизирующего излучения. Проведен анализ возможных радиоэлектронных схем включения МЛФД.

На основании проведенных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ была разработана радиоэлектронная схема макета портативного детектора гамма-излучения, включая блок чувствительного элемента детектора, блок предусилителя, блок усилителя сигнала.

Был собран лабораторный образец-макет детектора на основе МЛФД MicroFC-60035 с активной областью 6×6 мм и сцинтиллятором BGO 10×10 мм, предусилителем на основе операционного усилителя AD8132, усилителем AD8051, многоканальным анализатором MD-198. Проведено его тестирование на восприимчивость к ионизирующему излучению от образцовых спектрометрических гамма-источников Ba-133, Am-241 и Cs-137. Установлено, что лабораторный образец регистрирует низкоэнергетическое и высокоэнергетическое гамма-излучения от образцовых спектрометрических гамма-источников. По расчетам эффективность регистрации лабораторного образца-макета детектора составила ~10%. Таким образом, была оценена возможность использования макета детектора в качестве регистратора ионизирующего излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусиенко Ю. В. // Семинар ОФВЭ ИЯИ РАН. – 2011.
2. Шумаков А. В., Свиридов А. С., Колесников С. В. // Атомная энергия. – 2011. – Т. 110. – № 3.
3. Renker D. and Lorenz E. // JINST. – 2009. – V. 4. – P. 289–295.
4. Каталог фирмы «SensL, C-Series». Технические данные микропиксельных лавинных фотодиодов (SiPM) фирмы SensL серии C. // <http://www.sensl.com/downloads/ds/DS-MicroCseries.pdf>.
5. Каталог фирмы «Азимут Фотоникс». Технические данные сцинтиллятора (BGO) производства Saint-Gobain Crystals. // <http://www.azimp.ru/catalogue/Scintillators-crystals1/32/>.
6. Th eremino. SiPM. Silicon Photomultipliers for radiation detection // Th eremino System Rev.3. – 2015.

Поступила в редакцию 20.10.2020.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

Никишкин Тимофей Геннадьевич, аспирант ИЯТШ НИ ТПУ, e-mail: timofei.nikishkin@gmail.com.

T.G. NIKISHKIN

DEVELOPMENT OF A MODEL OF PORTABLE SCINTILLATION DETECTOR OF GAMMA RADIATION BASED ONMPCC (SIPM)

The possibility of developing a portable gamma radiation detector with a sensitive element based on a solid-state photodetector-scintillator bundle. Investigations of the characteristics and the possibility of using silicon photodiodes as photodetectors for scintillation detectors in various applied problems of detecting gamma radiation is presented.

Keywords: gamma radiation, solid-state detector, scintillator, micropixel avalanche photodiodes, solid-state photomultiplier tube, silicon photomultiplier, portable detector, micropixel avalanche photodiode, scintillation detector.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Nikishkin Timofey Gennadevich, Postgraduate Student of Institute of Nuclear Physics and Technology of NR TPU, e-mail: timofei.nikishkin@gmail.com.