

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 539.1.07

### КАНАЛ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ВЫСОКОЙ ПИКОВОЙ ЗАГРУЗКЕ\*

Ю. В. Юдин<sup>1,2</sup>, Д. Н. Григорьев<sup>1,2,3</sup>, Л. Б. Эпштейн<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

E-mail: Yu.V.Yudin@inp.nsk.su

Предложен метод усиления и формирования аналогового сигнала, оптимизированный для достижения наибольшего отношения сигнал/шум при работе с источником сигнала большой ёмкости и позволяющий при этом распознавать сигналы, которые поступили с небольшим интервалом времени. Разработан усилительный канал, реализующий предложенный метод. Данный канал предназначен для усиления сигналов лавинных фотодиодов в детекторах, построенных на основе быстрых сцинтилляторов. Описаны структура усилительного канала, принцип восстановления формы входного сигнала и основные схемотехнические решения, использованные в разработанном усилителе.

*Ключевые слова:* усилители сигналов, лавинные фотодиоды.

DOI: 10.15372/AUT20180212

**Введение.** Многие детекторы элементарных частиц имеют в своём составе электромагнитные калориметры полного поглощения, построенные на основе сцинтилляционных кристаллов. Одним из важных факторов, влияющих на выбор материала сцинтиллятора, является ожидаемая пиковая нагрузка одного кристалла частицами. При пиковых нагрузках от 3–4 МГц и выше для измерения энергии отдельных частиц необходимо использовать сцинтилляционные материалы с коротким временем высвечивания основной компоненты, чтобы не происходило существенных наложений сигналов от последующих частиц. Подходящими сцинтилляторами являются, например, силикат гадолиния (GSO, время высвечивания  $\cong 60$  нс) [1] или силикат лютеция и иттрия (LYSO, время высвечивания  $\cong 40$  нс) [2].

Выделенная в кристалле энергия каждой частицы преобразуется в световую вспышку и далее с помощью различных фотоприёмников в электрический сигнал. При вышеупомянутых пиковых нагрузках для увеличения отношения сигнал/шум невозможно использовать формирующие схемы с временами формирования порядка микросекунд, так как это привело бы к недопустимым наложениям сформированных сигналов. Поэтому в качестве фотоприёмников необходимо применять лавинные фотодиоды (ЛФД), обеспечивающие величину электрического сигнала в десятки раз больше, чем PIN-фотодиоды в тех же условиях. Соответственно получается большее отношение сигнала к приведённым ко входу шумам усилительного канала, что, в принципе, позволяет достичь лучшей точности измерения энергии частиц.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-02-01073).

Данная работа проводится в рамках участия Института ядерной физики СО РАН в эксперименте СОМЕТ по поиску безнейтринной конверсии мюона в электрон [3, 4]. В искомым событиях энергия родившихся электронов фиксирована и составляет примерно 105 МэВ. Основным источником фона при поиске этого процесса являются события распада мюона, занявшего орбиту вокруг ядра вещества мишени. В этих событиях рождаются электроны, большая часть которых вылетает из мишени с энергиями 35–50 МэВ. В детекторе СОМЕТ сигналы электромагнитного калориметра будут использоваться для измерения энергии частиц и для выработки сигнала запуска измерений. Основным признаком для выделения полезных событий и подавления запусков от фоновых событий является энергия электронов. Чтобы обеспечить требуемую точность измерения энергии частиц и допустимую частоту запусков, электромагнитный калориметр должен иметь энергетическое разрешение лучше 5 % при энергии 105 МэВ. В то же время, чтобы исключить ошибки измерений из-за наложений сигналов при высоких пиковых нагрузках, необходимо обнаруживать наложение сигналов от частиц, пришедших с интервалом времени 220 нс и менее, и исключать такие события из измерений. Для выполнения этих функций измерительные каналы калориметра в целом, в том числе их электронный тракт (включая фотоприёмник), должны удовлетворять жёстким требованиям к уровню шумов и быстродействию.

**Постановка задачи.** Основой электромагнитного калориметра [5] детектора СОМЕТ является матрица из 1920 кристаллов LYSO. В качестве фотоприёмников используются лавинные фотодиоды S8664-1010 [6] (фирмы Hamamatsu Photonics, Япония). При оптимальных технологии обработки кристалла и конструкции чувствительного элемента калориметра (кристалл + ЛФД) коэффициент преобразования ( $K_{пр}$ ) выделенной в кристалле энергии в электрический сигнал приблизительно равен 0,032 пКл/МэВ при номинальном напряжении смещения ЛФД (при котором коэффициент усиления фототока равен 50). Параметры усилительного канала должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Входным сигналом является импульс тока с ЛФД, возникающий от сцинтилляционной вспышки в кристалле LYSO. Ток в импульсе спадает экспоненциально с постоянной времени, равной времени высвечивания основной компоненты сцинтилляции (40 нс).

2. Пиковая нагрузка входных импульсов от частиц с энергиями более 10 МэВ в канале калориметра может достигать 20 МГц (в течение 200 нс после выпуска первичных протонов на мишень).

3. Полоса пропускания электронного тракта и формирование аналогового сигнала в нём должны обеспечить возможность обнаружения наложенных сигналов с помощью последующей цифровой обработки. Минимальный интервал между наложенными сигналами, начиная с которого необходимо отличать их от одного отдельного сигнала, должен быть не более 50 нс. Это позволит исключать из измерений почти все сигналы, интервал между которыми менее 220 нс.

4. Энергетический эквивалент шумов усилителя должен быть, как минимум, в 3–4 раза меньше флуктуаций утечек электромагнитных ливней в кристалле, которые составляют около 1,6 МэВ. С учётом вышеупомянутого значения коэффициента  $K_{пр}$  приведённый ко входу эквивалентный шумовой заряд усилителя должен быть не более 0,014 пКл ( $8,8 \cdot 10^4$  электронов) при ёмкости ЛФД в рабочем режиме  $C_{ЛФД} \cong 270$  пФ и при используемом способе определения амплитуды сигналов посредством цифровой обработки. Этого достаточно, чтобы получить требуемое энергетическое разрешение. Однако, чтобы улучшить отбор событий триггерной системой (системой запуска измерений) и повысить надёжность распознавания наложенных сигналов, желательно достичь как можно более низкого уровня шумов.

5. Диапазон рабочих входных сигналов составляет от 0 до 6 пКл (соответствует энергетическому выделению в кристалле до 190 МэВ).

6. Интегральная нелинейность усилительного тракта во всём диапазоне входных сигналов должна быть не более 1 %.

**Предложенное решение.** Функциональная схема электронного тракта с лавинным фотодиодом изображена на рис. 1. Источником сигнала является ЛФД. В нём доминирующий источник шума — темновой ток, типичное значение которого менее 10 нА. Поэтому в качестве входного устройства усилительного канала используется зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ), который позволяет достичь наибольшего отношения сигнал/шум при таких свойствах источника сигнала. Чтобы резисторы, подключённые ко входу ЗЧУ, не давали заметного вклада в шумы, их параллельное сопротивление должно быть не менее 6 МОм; в разработанном усилителе используются резисторы 30 МОм. Усилитель интегрирует входные токовые импульсы с постоянной времени немного более 200 мкс, поэтому на его выходе отклики на несколько входных импульсов заведомо накладываются друг на друга. Эти наложения нужно по возможности устранить, чтобы для большинства сигналов обеспечить измерение амплитуды, а также распознать наложения сигналов, поступивших с небольшим интервалом времени. Моделирование показало, что наилучшего распознавания таких сигналов удаётся достичь, если из выходного сигнала ЗЧУ сформировать сигналы, близкие по форме к входным токовым импульсам («восстановить» форму входных импульсов). При этом также обеспечивается почти предельная точность измерения амплитуды сигналов. Восстановление формы входных импульсов производится следующим образом. Выходной сигнал ЗЧУ дополнительно усиливается каскадом У2 и через масштабирующую ёмкость  $C_M$  подаётся на вход трансимпедансного усилителя У3. Величина масштабирующей ёмкости может быть выбрана в пределах 10–40 пФ (о выборе величины этой ёмкости будет сказано далее), а входной импеданс трансимпедансного усилителя составляет менее 50 Ом. При таких значениях постоянная времени дифференцирующей цепочки, состоящей из  $C_M$  и входного импеданса трансимпедансного усилителя, получается менее 1 нс, что в 15–20 раз меньше времени нарастания переходной функции ЗЧУ (при подключённой ёмкости  $C_{ЛФД}$ ). Поэтому в рабочей полосе частот мгновенное значение тока, поступающего на вход трансимпедансного усилителя, пропорционально производной выходного напряжения У2. Получается, что сначала ЗЧУ интегрирует входной ток, а затем сигнал дифференцируется ёмкостью  $C_M$ . Таким образом, на выходе трансимпедансного усилителя формируются сигналы, близкие по форме к исходным токовым импульсам ЛФД. Чтобы уменьшить влияние индивидуальных различий быстродействия усилительных секций в каналах калориметра и получить более идентичные переходные функции всех усилительных каналов, выходной сигнал трансимпедансного усилителя пропускается через  $RC$ -цепочку с  $RC \approx 6$  нс (соответствует полосе пропускания 26,5 МГц). После этого сигнал подаётся на выходной буферный усилитель (БУ), который формирует дифференциальный выходной сигнал.

Масштабирующая ёмкость выбирается из следующих соображений. Когда на вход усилительного канала поступает токовый импульс максимальной амплитуды (интеграл

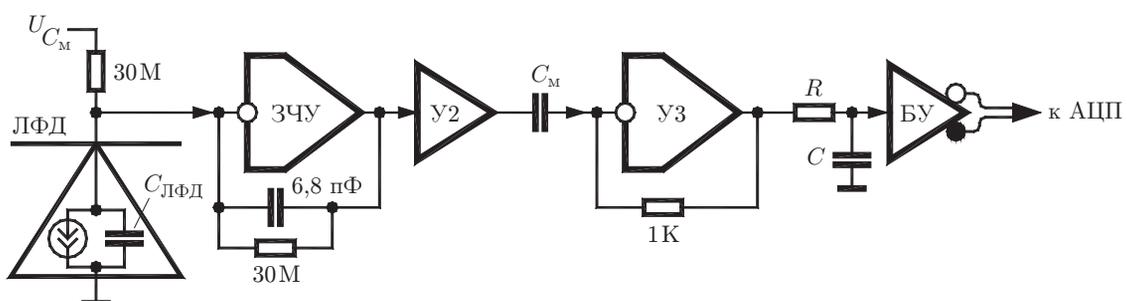


Рис. 1

тока равен 6 пКл), на выходе каскада У2 получается наибольшая скорость нарастания сигнала. Она определяется скоростью нарастания переходной функции ЗЧУ при конкретной суммарной ёмкости ЛФД и сигнальной линии, идущей от ЛФД на вход ЗЧУ, а также корректирующей цепью в ЗЧУ, обеспечивающей его устойчивость, и составляет примерно 80 В/мкс. При этом пиковое значение тока, поступающего через масштабирующую ёмкость на вход трансимпедансного усилителя,  $I_{\text{вхmax}} = C_{\text{м}}(dU_{\text{У2}}/dt)_{\text{max}}$ . Это значение должно равняться 1 мА, чтобы амплитуда максимального сигнала на выходе трансимпедансного усилителя получалась равной расчётному значению 1 В. Отсюда следует, что значение масштабирующей ёмкости равно 12 пФ.

**Зарядочувствительный усилитель.** Уровень собственных шумов и быстродействие ЗЧУ оказывают определяющее влияние на качество работы всего усилительного тракта в целом. При разработке данного тракта фактором, в наибольшей степени ограничивающим возможности понижения уровня шума ЗЧУ, было энергопотребление, так как необходимо разместить платы усилителей в ограниченном объёме позади матрицы кристаллов калориметра и обеспечить работу большого числа таких плат без принудительного охлаждения. Поэтому особенностью ЗЧУ является использование во входном каскаде четырёх полевых транзисторов 2SK932-22 (ON Semiconductor) [7], включённых параллельно; их суммарный ток покоя равен 12 мА.

**Конструктивное исполнение.** Усилители для калориметра СОМЕТ реализованы в виде 16-канальных плат размером 160 × 120 мм; на верхней и нижней сторонах платы размещены по восемь усилительных каналов, четыре 4-входных аналоговых сумматора, формирующих сигналы для триггерной системы, а также стабилизаторы питающих напряжений и источники опорных напряжений, используемых в усилительных каналах.

**Результаты испытаний прототипа.** Разработанные усилители совместно с прототипом калориметра испытаны на выведенном пучке позитронов. Прототип калориметра представляет собой матрицу из 8 × 8 плотно собранных кристаллов с присоединёнными к ним ЛФД. Коэффициент преобразования входного заряда в амплитуду выходного сигнала у всех усилительных каналов был установлен  $\approx 140$  мВ/пКл, разброс значений получился менее 5 %. Начальные различия  $K_{\text{пр}}$  (пКл/МэВ) чувствительных элементов (кристалл + ЛФД) были измерены с помощью калибровки по космическим частицам и затем в основном скомпенсированы изменением коэффициентов усиления ЛФД. Таким образом, общие коэффициенты преобразования энергосигнала в амплитуду выходного сигнала у всех каналов получились около 3,9 мВ/МэВ.

Так как для работы алгоритма, определяющего амплитуду сигналов по их дискретизованным значениям, необходимо присутствие сигнала, для измерения вклада шумов усилителя в амплитудное разрешение каждого канала на входы всех каналов подавались калибровочные токовые импульсы, близкие по форме к сигналам ЛФД. При этом для каждого канала был набран спектр измеренных значений амплитуды, после чего спектры подгонялись функцией Гаусса. Усреднённое значение дисперсии амплитуд для всех каналов получилось  $\sigma_{\text{а}} \approx 1,26$  мВ, что соответствует величине эквивалентного шумового заряда  $\sigma_{\text{Q}} \approx 0,01$  пКл и энергетическому эквиваленту шума  $\approx 0,32$  МэВ. Эти значения удовлетворяют установленным требованиям с существенным запасом.

Поскольку в проведённых пучковых испытаниях загрузки от частиц на 1–2 порядка меньше, чем требуемые предельные загрузки, невозможно непосредственно проверить распознавание наложенных сигналов, поступающих с небольшим интервалом времени. Однако были измерены два параметра, от которых зависит возможность распознавания таких сигналов, — шумовое напряжение на выходе усилителя и время нарастания выходного сигнала. Среднеквадратическое значение напряжения шума на выходе усилительных каналов составило (в среднем) 2,8 мВ. Усреднённая форма выходного сигнала, возникающего при попадании частицы в кристалл, показана на рис. 2. Она рассчитана по сигналам от реаль-

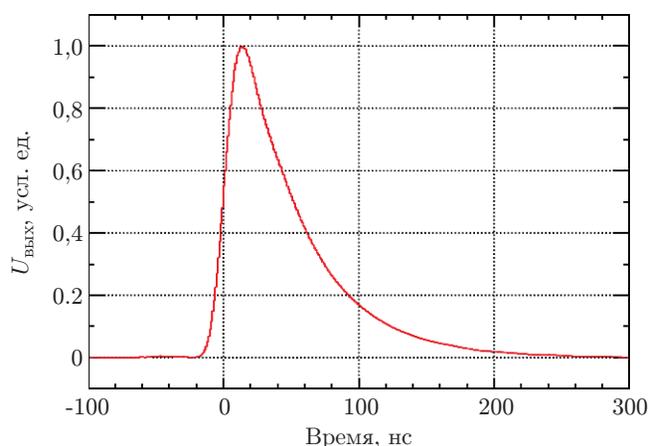


Рис. 2

ных частиц, зарегистрированных во время испытаний. Видно, что время нарастания до пика составляет  $\approx 34$  нс. Для приблизительной оценки возможности распознавания наложенных сигналов была проведена пробная обработка записанных дискретизованных сигналов с использованием простого алгоритма. Результаты показали, что при таком времени нарастания можно распознавать наложение двух сигналов, поступивших с интервалом 50 нс, если амплитуда каждого из них превосходит напряжение шума не менее чем в 8 раз, что соответствует энерговыделениям от 6 МэВ и больше.

**Закключение.** Разработан и протестирован канал усиления сигналов лавинных фотодиодов, предназначенный для спектрометрических измерений при высоких пиковых нагрузках. Усилительный канал оптимизирован для достижения наибольшего отношения сигнал/шум при работе с источником сигнала большой ёмкости. Чтобы обеспечить возможность распознавания наложенных сигналов, поступивших с небольшим интервалом времени, в усилительном канале производится восстановление формы входных токовых импульсов. При этом обеспечивается время нарастания до пика выходного сигнала менее 40 нс. Параметры канала усиления полностью соответствуют установленным требованиям. Усилители реализованы в виде 16-канальных плат, размеры которых позволяют разместить необходимое число каналов позади матрицы кристаллов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Melcher C. L., Schweitzer J. S., Utsu T., Akiyama S. Scintillation properties of GSO // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1990. **37**, N 2. P. 161–164.
2. Pidol L., Viana B., Bessi re A. et al. High efficiency of lutetium silicate scintillators, Ce-doped LPS, and LYSO crystals // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. **51**, N 3. P. 1084–1087.
3. Kuno Y. A search for muon-to-electron conversion at J PARC: The COMET experiment // Prog. Theor. Exp. Phys. 2013. 022C01.
4. Uchida Y. Muon-to-electron conversion with COMET // Journ. Instrument. 2014. **9**. C09008.
5. Oishi K. Development of electromagnetic calorimeter using GSO and LYSO crystals for the J-PARC muon-to-electron conversion search experiment // JPS Conf. Proc. 2015. Vol. 8. 025014.
6. Si APD S8664 Series: Datasheet. URL: [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s8664\\_series\\_kapd1012e.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s8664_series_kapd1012e.pdf) (дата обращения: 14.02.2018).
7. 2SK932: Datasheet. URL: <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/EN2841-D.pdf> (дата обращения: 14.02.2018).