

УДК 53.082.52

А. С. Бурдыко, Ю. С. Сахаров

Разработка триггерных сцинтилляционных счетчиков для многоцелевого детектора *MPD* проекта *NICA*

Рассматриваются конструкция и характеристики триггерных сцинтилляционных счетчиков, построенных на базе кремниевых фотоумножителей и быстрых сцинтилляторов. Описывается опыт проектирования таких устройств и приводятся результаты исследования показателей разработок.

Ключевые слова: сцинтиллятор, кремниевый фотоумножитель, усилитель, счетчик, *SiPM*

Об авторах

Бурдыко Александр Сергеевич – студент 2-го курса магистратуры кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс» государственного университета «Дубна». *E-mail:* balekserg@gmail.com. 141980 Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19.

Сахаров Юрий Серафимович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования электроники для установок «мегасайенс» государственного университета «Дубна».

Система отбора событий в процессе измерений, также именуемая триггерной системой, является необходимой составляющей любого эксперимента в области физики высоких энергий, позволяющей сгенерировать стартовый импульс для начала записи потока данных с детектора. Данная работа посвящена разработке сцинтилляционных счетчиков на базе кремниевых фотоумножителей (*SiPM*) и сцинтилляторов *EJ-228*, *EJ-230* и *EJ-232* [3; 4] для нахождения варианта с лучшим временным разрешением и создания на их основе триггерной системы многоцелевого детектора *MPD* проекта *NICA* [6].

Счетчики на основе сцинтилляторов (рис. 1) в основном состоят из сцинтилляционного материала и фотодетектора, который может представлять собой либо фотоумножитель (ФЭУ), либо фотодиод. Принцип его действия состоит в регистрации и передаче фотодетектором возникающего сцинтилляционного свечения, образующегося при прохождении ионизирующей частицы через люминесцирующие вещества сцинтиллятора. Роль фотодетектора заключается в преобразовании выходящего света сцинтиллятора в электрический сигнал.



Рис. 1. Общая схема сцинтилляционного счетчика

Сцинтилляционные счетчики многофункциональны. Они активно используются во многих экспериментах благодаря их высокой стабильности, простоте конструирования и эксплуатации. Среди областей их применения следует выделить калориметрию, трекинг, времяпролетные системы, использование

в качестве триггеров.

Отличительной особенностью триггерных сцинтилляционных счетчиков является использование в их основе сцинтилляторов с высоким временным разрешением – время высвечивания должно быть как можно меньше для сокращения интервала времени между прохождением двух частиц, регистрируемых как отдельные события. Данным параметром обла-

дают органические сцинтилляторы из полимеров с добавлением люминесцентных добавок – активатора и спектросмещающих добавок.

В исследовании принимали участие три типа счетчиков на основе высокоточных и вы-

сокоскоростных сцинтилляторов, произведенных *Eljen Technology* – *EJ-228*, *EJ-230* и *EJ-232*. Более подробно свойства каждого сцинтиллятора отображены в таблице [3; 4].

Свойства используемых сцинтилляторов

Свойство	<i>EJ-228</i>	<i>EJ-230</i>	<i>EJ-232</i>
Световыход (% от световыхода антрацена)	67	64	55
Эффективность сцинтилляции (фотонов / 1 МэВ e ⁻)	10200	9700	8400
Максимальная длина волны излучения (нм)	391	391	370
Время нарастания (пс)	500	500	350
Время затухания (пс)	1400	1500	1600
Ширина импульса (на уровне половинной амплитуды) (пс)	1200	1300	1300
Количество атомов водорода на см ³ ($\times 10^{22}$)	5,15	5,15	5,13
Количество атомов углерода на см ³ ($\times 10^{22}$)	4,69	4,69	4,66
Количество электронов на см ³ ($\times 10^{23}$)	3,33	3,33	3,30
Плотность (г/см ³)	1,023	1,023	1,023

Конструкторская часть

Первый разрабатываемый счетчик основан на *SiPM Hamamatsu S13360-6050CS*. Печатная плата спроектирована в соответствии со схемой, рекомендованной производителем (рис. 2) [7].

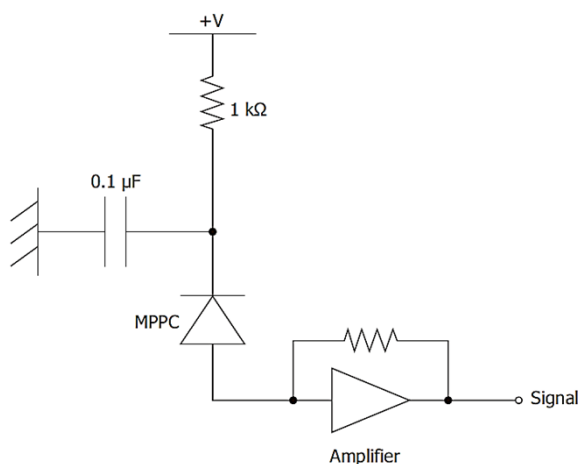


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема включения *SiPM Hamamatsu S13360-6050CS*

Основными принципами при проектировании печатных плат являлись минимизация длины проводниковых дорожек следования аналоговых сигналов с целью сокращения паразитных эффектов, обеспечение простоты и единства проводных соединений, а также достижение нечувствительности их поверхности к свету. Исходя из данных соображений, посадочные места некоторых тесно взаимосвязанных компонентов располагались вна-

хлест, подвод сигнальных и питающих линий осуществлялся при помощи стандартных штыревых и гнездовых соединений, цвет маски печатной платы был выбран черным.

Конструкция корпуса была разработана специально под данную печатную плату для тестирования счетчика на ускорителе заряженных частиц. Корпусные детали изготавливались методом послойного наплавления с помощью 3D-принтера. Данная технология подразумевает создание 3D-объектов путем последовательного нанесения слоев материала, подобных контурам спроектированной модели. В нашем случае в качестве материала для печати выступал *ABS-пластик* – полимер, обладающий высокой механической прочностью. Платы с *SiPM* крепились четырьмя винтами *ISO 14579 A2 M2×5 TX6* с каждой стороны составных частей корпуса. Для дополнительной светоизоляции между платой и корпусом, а также между окнами сквозной связности прокладывался слой светонепроницаемого материала с вырезом по контуру лицевой поверхности *SiPM*. Благодаря этому удалось обеспечить полное отсутствие засветов внутри корпуса, что было подтверждено результатами тестирования при использовании принудительного освещения поверхности счетчика.

Сигнал, снимаемый с *SiPM Hamamatsu*, обладает быстрым передним фронтом, длительностью около 1,5 нс и медленно спадающим задним фронтом, также именуемым периодом восстановления. Пример получаемых сигналов представлен на осциллограмме (рис. 3).

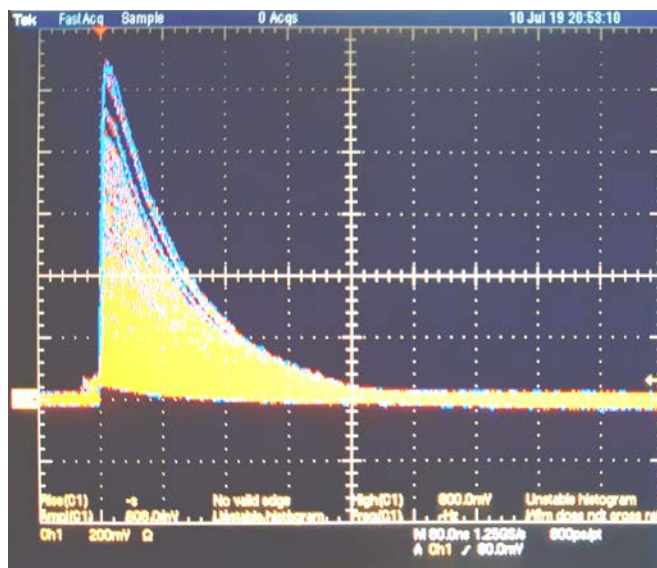


Рис. 3. Сигнал с *SiPM Hamamatsu S13360-6050CS*

Вид счетчика в сборе представлен на рис. 4.

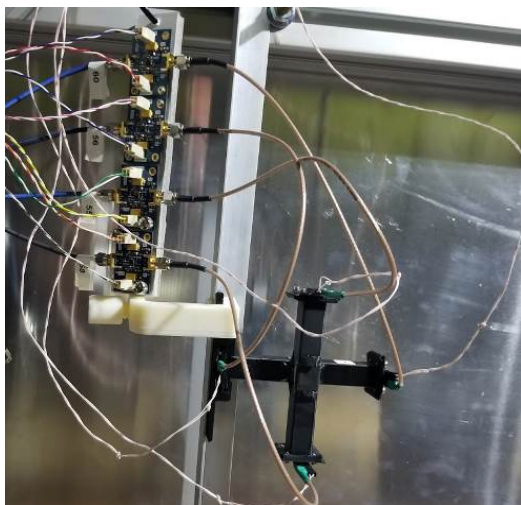


Рис. 4. Счетчик на *SiPM Hamamatsu S13360-6050CS*

Физические размеры счетчика ограничиваются количеством составляющих его элементов. Внешний операционный усилитель THS4303 [9], усиливающий поступающие с *SiPM* сигналы, является одноканальным, требующим рекомендуемой производителем обкладки для его корректного функциониро-

вания. Поэтому возникает необходимость в изыскании и исследовании более компактных вариантов.

Второй счетчик построен на базе восьмиканального усилителя-дискриминатора *NINO*, разработанного специально для эксперимента *ALICE* [1]. Вход чипа является дифференциальным трансимпедансным, что дает высокую устойчивость к шумам по питанию и земле. Входное сопротивление задается параметрически во входном каскаде и может изменяться в небольшом диапазоне дифференциальных значений от 40 до 75 Ом. Обладает регулируемым порогом дискриминатора (10–100 фКл). Постоянный потенциал входов не равен нулю, зависит от значения входного импеданса входов и находится в диапазоне от 0,4 до 1 В. Разность напряжений на входах не превышает 2 мВ. Формирование сигнала происходит внутри чипа – он не преобразует форму сигнала, а работает как быстрый дискриминатор, воспринимая сигнал в исходном виде (рис. 5) [10, с. 3]. Выход выдает сигнал, совместимый с *LVDS*-приемниками, ширина которого пропорциональна входному заряду.

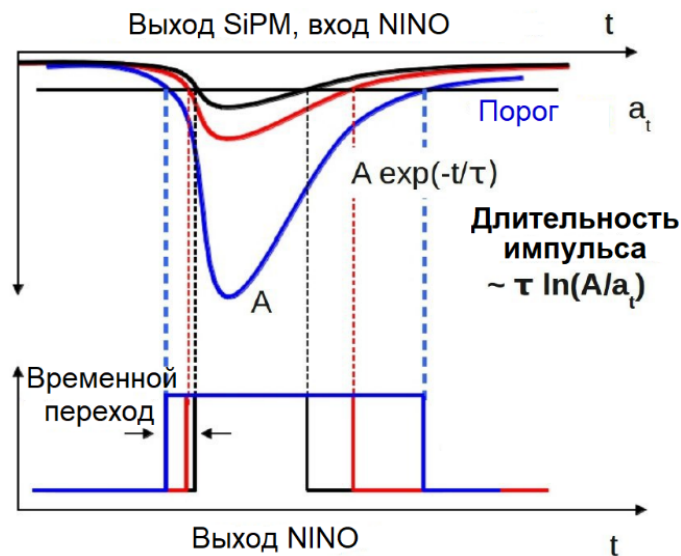


Рис. 5. Пример формирования сигнала внутри чипа *NINO*

Всего требовалось разработать две платы – основную с усилителем-дискриминатором и дополнительную с *SiPM*. Для счетчика используется одна основная и две дополнительных платы, размещающиеся перпендикулярно основанию. Основание предусматривает проведение испытаний сцинтилляторов с длинами 100, 80, 50 и 20 мм. При взаимном размещении отверстий для дополнительных плат учитывалась их толщина в сборе, что помогло обеспечить максимально плотное прилегание поверхностей *SiPM* и сцинтиллятора. Исходя из существенных различий в схеме питания *SiPM* и *NINO* (+55 В и +2,5 В соответственно), было решено вынести источник питания *SiPM* за пределы основания счетчика. Источником высокого напряжения выступал модифицированный *DC-DC* преобразователь *XL6009*. Питание к каждому *SiPM* подводилось отдельно через питающую ножку по выделенной проводниковой линии. Источник питания для *NINO* на основе регулятора напряжения *MIC37302WR-2.5* был распаян на плате. Основание разрабатывалось таким образом, чтобы аналоговое считывание с двух *SiPM* осуществлялось параллельно и независимо друг от друга. Дополнительные платы с *SiPM* выполнялись в схожем с предыдущим счётчиком

конструктиве. Схема была несколько иной – в сигнальных цепях добавились сопротивления номиналом 200 Ом. Катод *SiPM* подводился к инвертирующему входу *NINO*, анод – к неинвертирующему (рис. 6).

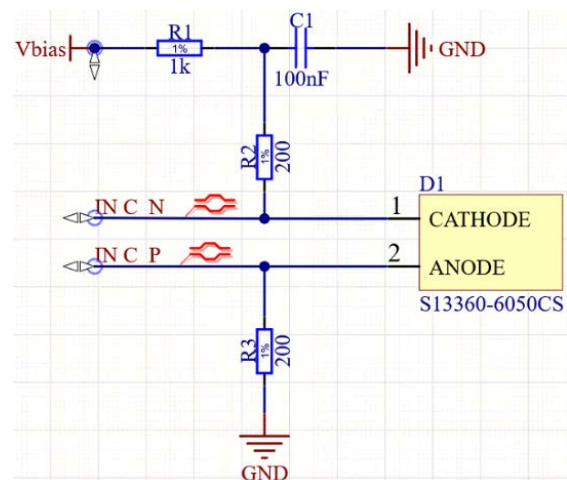


Рис. 6. Электрическая принципиальная схема включения *SiPM Hamamatsu S13360-6050CS* для счетчика на базе *NINO*

Основная часть счетчика в сборе представлена на рис. 7.



Рис. 7. Основная часть счетчика на базе NINO

Набор данных производится на осциллографе *LeCroy WS 44Xs-A*. Регистрация шла только в случае одновременного срабатывания всех четырех задействованных каналов *NINO*. Испытание триггерного сцинтиляционного

счетчика (ТСС) на базе *NINO* производилось на космических лучах в лабораторных условиях на собранном стенде (рис. 8).

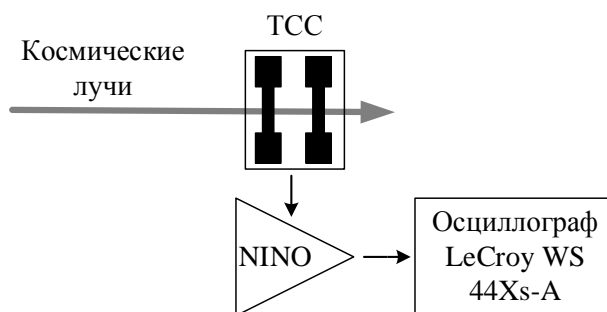


Рис. 8. Схема стенда для тестирования счетчика на базе NINO

Длительность фронтов сигнала с счетчика не может превысить 1 нс, что следует из характеристик чипа. В данном случае, измеряемая по уровням 10–90%, длительность пе-

реднего фронта составила около 700 пс. Развертка переднего фронта регистрируемого сигнала представлена на рис. 9.

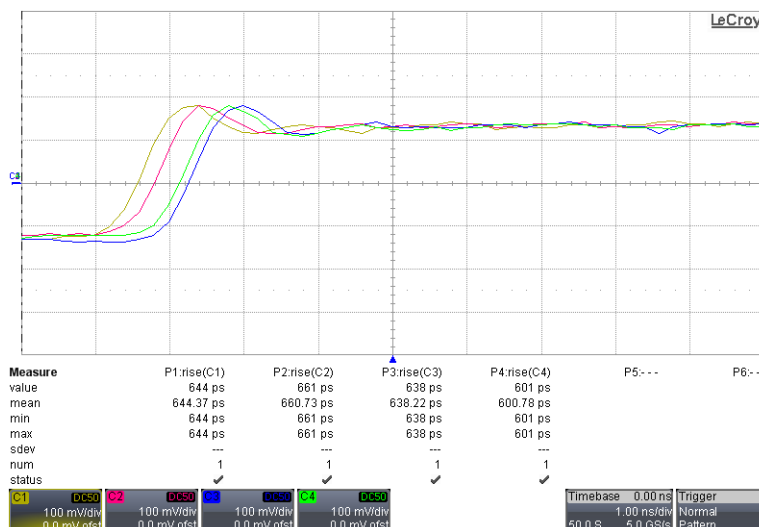


Рис. 9. Передний фронт сигнала с счетчика на базе NINO

Третий счетчик выполнен с использованием *SiPM SensL MICROFJ-30020-TSV*. Его основными отличиями от *SiPM Hamamatsu* являются меньшие размеры корпуса ($3,16 \times 3,16 \times 0,46$ мм против $10,1 \times 8,9 \times 2,0$), бо-

лее широкий диапазон спектрального отклика (270–900 нм против 200–900 нм) и наличие быстрого выхода, позволяющего регистрировать единичные фотоны (рис. 10) [5].

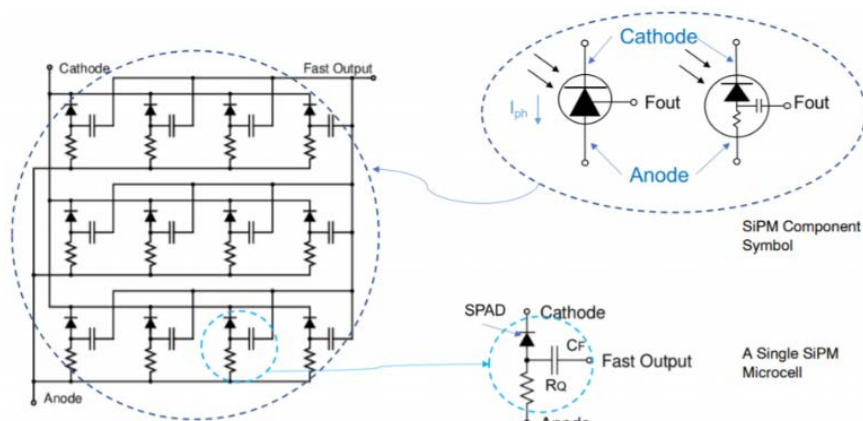


Рис. 10. Внутренняя структура *SensL SiPM*

Как и в предыдущем случае, счетчик разрабатывался по модульному принципу. Несмотря на наличие у производителя готовых модульных конструкций, ни одна из них не удовлетворяла установленным требованиям. Основной особенностью проектного решения стало выполнение плат с *SiPM* в виде массива 1×3 . *SiPM* расположены на плате максимально близко друг к другу для минимизации мертвого пространства между ними. Массив содержит 3 стандартных и 3 быстрых выхода. Прочие выходы, связывающие катоды и землю, являются общими для всех *SiPM*. Основание счетчика выполнено по аналогии с имеющимися в арсенале производителя решениями [2]. Принципиально новыми возможностями в разработанном варианте являются: получение

суммарного сигнала с быстрых выходов за счет добавления сумматора сигналов, построенного на операционном усилителе OPA858 [8]; получение сигнала с отдельных стандартных выводов при допустимости получения с них суммарного сигнала; одновременная реализация всех возможных вариантов съема сигнала. Сигнальные и питающие линии едины по типу и выполнены в виде SMA-соединений. Балуны рядом с выводами необходимы для объединения разнородных линий связи, прежде всего, для согласования импедансов быстрого выхода и считывающей электроники. Общий вид счетчика представлен на рис. 11. По предварительным оценкам, длительность переднего фронта сигнала с быстрых выходов не должна превышать 1 нс.

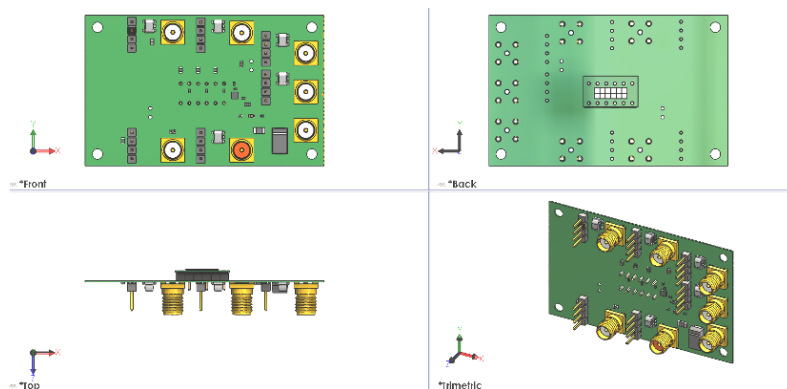


Рис. 11. Счетчик на *SensL MICROFJ-30020-TSV*

Для расчета временного разрешения счетчиков необходимо производить набор статистики на космических лучах либо на ускорителе заряженных частиц. Результаты обработки данных помогут установить счетчик с наилучшими показателями.

Выводы

Характеристики счетчиков в зависимости от используемых элементов могут существенно отличаться.

Особенностью триггерных сцинтилляционных счетчиков является использование в их основе сцинтилляторов с высоким временным разрешением.

При проектировании счетчиков важно производить согласование импедансов сигнальных линий во избежание искажений.

Библиографический список

1. Anghinolfi F., Jarron P., Krummenacher F., Usenko E. and Williams M. C. S. NINO, an ultrafast, low-power, front-end amplifier discriminator for the Time-Of-Flight detector in ALICE experiment // IEEE Transactions on nuclear science. 2004. V. 51, no. 5. P. 1974–1978.
2. ArrayJ Series Silicon Photomultiplier (SiPM) High Fill-Factor Arrays // ON Semiconductor. – Режим доступа: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/ARRAYJ-SERIES-D.PDF> (дата обращения: 12.04.2020).
3. Fast timing EJ-228, EJ-230 // Eljen Technology. – Режим доступа: <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-228-ej-230/> (дата обращения: 12.04.2020).
4. Fast timing plastic scintillator EJ-232, EJ-232Q // Eljen Technology. – Режим доступа: <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-232-ej-232q/> (дата обращения: 12.04.2020).
5. High PDE and Timing Resolution SiPM Sensors in a TSV Package // SensL. – Режим доступа: <https://sensl.com/downloads/ds/DS-MicroJseries.pdf> (дата обращения: 12.04.2020).
6. MPD и SPD на основе новейших разработок: Наука, содружество, прогресс // Ежемесячный объединенного института ядерных исследований. Дубна: Объединенный институт ядерных исследований. 2012. Вып. 9–10 (4099-4100) от 16 марта. 12 с.
7. MPPCs for precision measurement S13360 series // Hamamatsu. – Режим доступа: https://hamamatsu.su/files/uploads/pdf/3_mppc/s13360_1325_3025_6025_1350_3050_6050_1375_3075_6075_cs_pe_kapd1052e.pdf (дата обращения: 12.04.2020).
8. OPA858 5.5-GHz Gain Bandwidth Product, Gain of 7 V/V Stable, FET Input Amplifier // Texas Instruments. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa858.pdf> (дата обращения: 12.04.2020).
9. THS4303 1.8GHz, Wideband Fixed-Gain Amplifier // Texas Instruments. – Режим доступа: <https://www.ti.com/product/THS4303/> (дата обращения: 12.04.2020).
10. Time of flight positron emission tomography towards 100ps resolution with L(Y)SO: an experimental and theoretical analysis // IOPscience. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/8/07/P07014> (дата обращения: 21.02.2020).

Поступила в редакцию
28.08.2020