

Метод увеличения эффективности регистрации минимально ионизирующих частиц детекторами на МКП

Ф.Ф.Валиев¹, Н.И.Калиниченко¹, А.Кожедуб¹, Н.А.Макаров¹, В.Н.Попов¹,
Г.А.Феофилов¹.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: valiev07@list.ru

Abstract—Предложен и протестирован метод повышения эффективности регистрации минимально ионизирующих частиц с одновременным уменьшением на несколько порядков фона детектирующего устройства за счет уменьшения порогов регистрации и введения схемы совпадения.

Ключевые слова: детектор, микроканальная пластина, ион-ионные взаимодействия, коллайдерный эксперимент.

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения ион-ионных взаимодействий в коллайдерных экспериментах с участием минимально ионизирующих частиц требуются высокоэффективные быстрые детекторы с низким уровнем шума, способные обеспечить событийную регистрацию частиц. Ранее в работе [1] была предложена система быстрого мониторинга событий ядро-ядерных столкновений в экспериментах на коллайдере NICA – FBBC монитор (Fast Beam-Beam Collisions monitor), функциями которого являются контроль интенсивности столкновений и возможность определения в каждом событии точки взаимодействия ионов [1,2] прицельного параметра [3] учет взаимодействия ионов пучка с остаточным газом и режектирование наложений ("pile-up") событий. FBBC использует концепцию регистрации в каждом событии времени пролета и углового распределения частиц путем использования многоанодной и быстрой системы [4] считывания сигналов, поступающих с детекторов на микроканальных пластинах (МКП).

Эффективность регистрации минимально ионизирующих частиц детектором на МКП обычно не превышает 80 % при фоне $1/(\text{сек} \cdot \text{см}^2)$, что связано с вводимым порогом электроники с целью подавления фоновых сигналов. В настоящей работе мы предлагаем и тестируем для МКП метод увеличения эффективности регистрации минимально ионизирующего излучения при одновременном существенном снижении собственного фона устройства. Суть метода состоит в том, что для регистрации минимально ионизирующих частиц используется телескоп из двух сборок МКП детекторов. На первом этапе, с целью увеличения эффективности регистрации, мы уменьшаем пороги регистрации сигналов в компараторах и, тем самым, создаем условия для фиксации минимально ионизирующих частиц, для которых импульсы от МКП имеют малые амплитуды. При этом, естественно, для каждого канала регистрации ухудшается соотношение сигнал/шум. На следующем этапе импульсы с компараторов подаются на наносекундную схему совпадений с разрешающим временем $\tau = 50$ нс. Так как шумы МКП детекторов телескопа не коррелированы, то они подавляются схемой совпадения

(При интенсивности шумов детекторов N_1 и N_2 уровень случайных совпадений $N_{сл}=2 \cdot \tau \cdot N_1 \cdot N_2$). Таким образом, в новом устройстве телескопа из двух МКП детекторов снижение порогов срабатывания компараторов приводит к увеличению эффективности регистрации минимально ионизирующих частиц, при этом одновременное увеличение собственных шумов в отдельных каналах детектирования существенным образом нивелируется схемой совпадений."

Ниже в следующем разделе представлена блок-схема устройства с низким фоном для регистрации минимально ионизирующих заряженных частиц и приводятся результаты проверки эффективности при регистрации космических мюонов. В Заключение сформулированы краткие выводы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕАЛИЗУЕМОСТИ МЕТОДА

Проверка метода проводилась с использованием двух детекторов на микроканальных пластинах и наносекундной схемы совпадений. Блок-схема устройства с низким фоном для регистрации минимально ионизирующих заряженных частиц, представлена на рис.1. Короткие (~ 2 нс) сигналы с МКП детекторов, сформированные на соответствующих анодах, подаются по согласованным линиям передачи (6,7,8,9) на входы пороговых компараторов с высоким быстродействием (микросхема ADCMP604BKSZ-R2). Отметим, что помимо анодов (3, 5) мы используем также и нижние поверхности шевронных сборок МКП (см. Рис.1), с которых сигналы обратной полярности передаются на входы компараторов по линиям (6 и 9). На компараторы также подаются отдельно и дифференциальные сигналы смещения порогов, формируемые двумя каналами ЦАП (на блок-схеме не показаны). В качестве среды передачи используется SATA-кабель, что позволяет передавать сигналы с двух детекторов в рамках одного шлейфа. Дополнительное применение стандарта LVDS даёт нечувствительность к синфазным наводкам и малые потери в линии. Дифференциальные приёмники в составе FPGA преобразуют сигнал для дальнейшей обработки - нормировки по длительности и формирования сигналов совпадения.

Схема проверки устройства с низким фоном для регистрации минимально ионизирующих заряженных частиц с помощью космических мюонов представлена на рис. 2. Для проверки эффективности устройства из двух сборок МКП и схемы совпадений используются две дополнительные аналогичные сборки. Таким образом, если обозначить условно эти последовательно расположенные на пути мюонов детекторы, как D1,D2,D3,D4, то в случае прохождения мюона через детекторы D1 и D4 он проходит и через детекторы D2 и D3. Соотношение N_{1234} / N_{14} , где N_{1234} и N_{14} – число событий совпадений с блоков совпадений 1,2,3,4 и 1,4 (см. рис.2), соответственно, позволяет оценить эффективность устройства при регистрации космических мюонов. Четыре канала счёта отвечают за регистрацию событий – счётных или совпадений, в соответствии с установленным режимом. Режим регистрации сигналов одинаковый для всего массива МКП детекторов (D1–D4). Информация с детекторов может быть считана в режиме реального времени. Аппаратный таймер позволяет установить интервал измерения от 1 мс до 2-х часов с разрешением 1мс. Устройство работает под управлением программы написанной в среде LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)

Функции нормализации длительности импульса, формирование сигналов совпадений от детекторов (D1 – D4), а также основные элементы тракта регистрации, за исключением

пороговых компараторов, реализованы в составе FPGA. Нормализация длительности импульса состоит в формировании импульса фиксированной длительности, равной периоду тактовой частоты устройства. Нормализация необходима для повышения эффективности регистрации при работе в счётном режиме.

В работе также проводилось изучение эффективности при различных порогах дискриминации компараторов, в данной реализации основной результат был получен при порогах компараторов 5 мВ. Уровень собственных шумов менее $\sim 10^{-3}$ 1/(сек·см²) был получен при постоянной окна совпадений $\tau = 50$ нс. Снижение порогов регистрации и введение наносекундной схемы совпадений сигналов с двух последовательно установленных на траектории МКП детекторов позволило добиться – в сравнении с одним МКП детектором, повышения эффективности обнаружения минимально ионизирующих частиц (~95%) при одновременном снижении фона (менее $\sim 10^{-3}$ 1/(сек·см²)). Уровень шума можно дополнительно снизить до $\sim 10^{-5}$ 1/(сек·см²) при $\tau = 5$ нс.

ВЫВОДЫ

Предложен метод повышения эффективности обнаружения минимально ионизирующих частиц детекторами на МКП с одновременным снижением фона детектирующего устройства на несколько порядков.

Показано, что снижение порогов регистрации и введение наносекундной схемы совпадений сигналов с двух последовательно установленных на траектории МКП детекторов позволяет добиться повышения – в сравнении с одним МКП детектором, эффективности обнаружения минимально ионизирующих частиц (~95%) при одновременном снижении фона (менее $\sim 10^{-3}$ 1/(сек . см²)). Результаты позволяют рассматривать такой детектор также и в качестве эффективной быстрой триггерной системы для регистрации редких сигналов.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 103821868

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A.Baldin., G.Feofilov., P.Har'yuzov., F. Valiev, " Fast beam–beam collisions monitor for experiments at NICA", NIM A, 958, 162154 (2020). DOI:10.1016/j.nima.2019.04.108
2. Sandul, V. S. Feofilov, G. A. Valiev, F. F.” Studying Capabilities of a Fast Monitor for Beam Collisions by Monte Carlo Simulations and Machine Learning Methods, Physics of Particles and Nuclei, Volume 54, Issue 4, pp. 712-716(2023). DOI: 10.1134/S1063779623040275
3. Rudnev V., Galaktionov K., Valiev F.," Detector Optimization Based on Artificial Neural Network Training», Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 89,1335 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1062873825712139>
4. Valiev Farkhat, N. I. Kalinichenko, N. A. Makarov, Grigory Feofilov, "Hardware Implementation and Testing of 4-Channel Fast Electronics for an MCP Detector", Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 88(8), 1319 (2024). DOI: 10.1134/S1062873824707505

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Блок-схема устройства с низким фоном для обнаружения минимально ионизирующих заряженных частиц.

- 1 -- Вакуумный корпус;
- 2 -- Верхняя сборка микроканальных пластин;
- 3 -- Анод верхней сборки;
- 4 -- Нижняя сборка микроканальных пластин;
- 5 -- Анод нижней сборки;
- 6 и 7 -- Линии передачи сигналов с анодов МКП;
- 8 и 9 -- Линии передачи сигналов с нижних поверхностей МКП сборок;
- 10 и 11 — Вакуумные разъемы;
- 12 и 13 — Быстродействующие компараторы;
- 14— Схема наносекундных совпадений;
- 15 — Блок записи;
- 16 -- Высоковольтный делитель.

Рис.2. Блок схема проверки устройства с низким фоном для регистрации минимально ионизирующих заряженных частиц с помощью космических мюонов.

- 1, 2 и 3 -- Наносекундные схемы совпадений;
- 4 -- Блок записи.

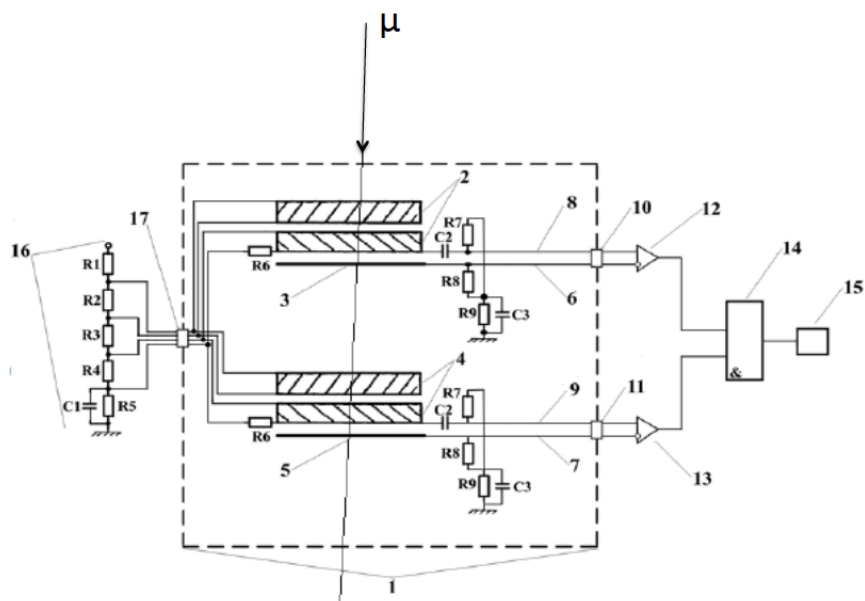


Рис. 1. Блок-схема устройства с низким фоном для обнаружения минимально ионизирующих заряженных частиц.

- 1 -- Вакуумный корпус;
- 2 -- Верхняя сборка микроканальных пластин;
- 3 -- Анод верхней сборки;
- 4 -- Нижняя сборка микроканальных пластин;
- 5 -- Анод нижней сборки;
- 6 и 7 -- Линии передачи сигналов с анодов МКП;
- 8 и 9 -- Линии передачи сигналов с нижних поверхностей МКП сборок;
- 10 и 11 — Вакуумные разъемы;
- 12 и 13 — Быстродействующие компараторы;
- 14— Схема наносекундных совпадений;
- 15 — Блок записи;
- 16 -- Высоковольтный делитель.

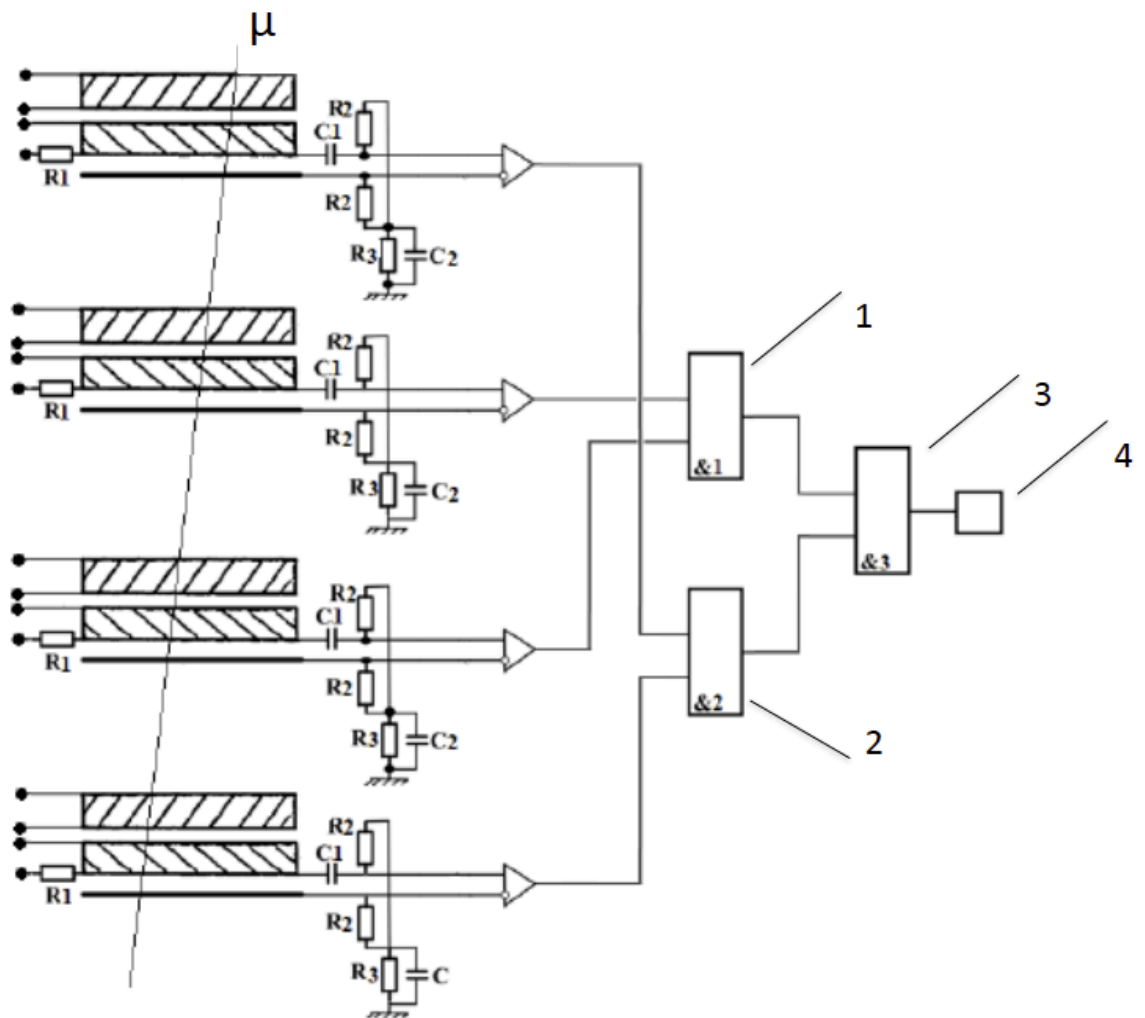


Рис.2. Блок схема проверки устройства с низким фоном для регистрации минимально ионизирующих заряженных частиц с помощью космических мюонов.

1, 2 и 3 -- Наносекундные схемы совпадений;

4 -- Блок записи.