**Метод увеличения эффективности регистрации минимально ионизирующих частиц детекторами на МКП**

Ф.Ф.Валиев*1*, Н.И.Калиниченко*1*, А.Кожедуб*1*, Н.А.Макаров*1*, В.Н.Попов*1*, Г.А.Феофилов*1*.

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

*\*E-mail: valiev07@list.ru*

**Abstract**—Предложен и протестирован методповышения 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 (MIPs) требуются высокоэффективные быстрые детекторы с низким уровнем шума, способные обеспечить пособытийную регистрацию частиц

В [1] предложен FBBC монитор (Fast Beam-Beam Collisions monitor), функциями которого являются контроль интенсивности столкновений и возможность определения в каждом событии точки взаимодействия ионов [1-4], прицельного параметра [5-8], учет взаимодействия ионов пучка с остаточным газом, отсев pile-up событий.

Ранее в работе [1] была предложена система быстрого мониторирования событий ядро-ядерных столкновений в экспериментах н коллайдере NICA ̶  FBBC монитор (Fast Beam-Beam Collisions monitor), функциями которого являются контроль интенсивности столкновений и возможность определения в каждом событии точки взаимодействия ионов [1-4] [1,2] прицельного параметра [5-8] [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 [9] [4] считывания сигналов. поступающих с ~~быстрых~~ детекторов на микроканальных пластинах (МКП) .

Эффективность регистрации минимально ионизирующих частиц детектором на МКП обычно не превышает 80 % при фоне 1/(сек·см2), что связано с вводимым порогом электроники с целью режекции 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. ~~Импульсы, создаваемые минимально ионизирующими частицами регистрируются как первым, так и вторым детектором.~~ На следующем этапе импульсы с компараторов подаются на наносекундную схему совпадений с разрешающим временем τ = 50 нс. Так как шумы МКП детекторов телескопа не коррелированы, то они подавляются схемой совпадения (При интенсивности шумов детекторов N1 и N2 уровень случайных совпадений Nсл=2·τ·N1·N2).

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 Заключении 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. Четыре канала счёта отвечают за регистрацию событий - счётных или совпадений- в соответствии с установленным режимом.

Режим регистрации одинаковый для всего массива счётчиков. Информация со счётчиков может быть считана «на лету». **в режиме реального времени** Аппаратный таймер позволяет установить интервал измерения от 1 mS до 2х часов с разрешением 1mS. Устройство работает под управлением программы написанной в среде LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)

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 N1234 / N14 ,где N1234 иN14  ̶ 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). счётчиков. Информация со ~~счётчиков~~ с детекторов может быть считана ~~«на лету».~~ **в режиме реального времени.** Аппаратный таймер позволяет установить интервал измерения от 1 mS до 2х часов с разрешением 1mS. 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 тракта регистрации. Нормализация необходима для повышения эффективности регистрации при работе в счётном режиме.

В работе также проводилось изучение эффективности при различных порогах дискриминации компараторов, в данной схемотехнике основной результат был получен при порогах компараторов 5 мВ. Уровень собственных шумов менее ~**10-3** 1/(сек . см2 был полученпри постоянной окна совпадений τ = 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 ~ 10-3 1/(сек·см2)). Уровень шума можно дополнительно снизить до ~10⁻⁵ 1/(сек·см²) при τ = 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 ~~учета~~ совпадений сигналов с двух последовательно установленных на траектории МКП детекторов позволяет добиться повышения эффективности обнаружения минимально ионизирующих частиц (~95%) при одновременном снижении фона (менее ~10**-3** 1/(сек . см2)). Результаты позволяют рассматривать такой детектор также и в качестве эффективной триггерной системы для регистрации редких сигналов.

Работа выполнена при поддержке проекта Санкт-Петербургского университета № 103821868

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, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, " Fast beam–beam collisions monitor for experiments at NICA", NIM A, 958, 162154 (2020). DOI:[10.1016/j.nima.2019.04.108](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.04.108" \t "_blank)

## 2. В. C. Сандул., Г. А Феофилов., Ф. Ф. Валиев Ф. Ф. ,

## 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).

Физика элементарных частиц и атомного ядра. 54, 4, 848 (2023).

DOI: 10.1134/S1063779623040275

3.M. Zharov, F. Valiev and V. Monakhov, "Evaluation of the Influence of the Beam Pipe on the Accuracy of Solving the Problem of Determining the Coordinates of Au–Au Interactions", Physics of Atomic Nuclei. 88, 902 (2024).

DOI: 10.1134/S1063778825700334

4.M. Zharov, K. Razmyslov, V. Monakhov and F. Valiev. Physics of Atomic Nuclei , 88, 302 (2025) DOI: 10.1134/S1063778825700334

5.Galaktionov K., Roudnev V., Valiev F. , "Neural Network Approach to Impact Parameter Estimation in High-Energy Collisions Using Microchannel Plate Detector Data", Moscow University Physics Bulletin. 78, S52 (2024).

DOI: 10.3103/S0027134923070081

. 6.Galaktionov K., Roudnev V., Valiev F.," Artificial Neural Networks Application in Estimating the Impact Parameter in Heavy Ion Collisions Using the Microchannel Plate Detector Data", Physics of Atomic Nuclei. 86, 1426 (2024).

DOI: 10.1134/S1063778823060248

7.Galaktionov K., Rudnev V., Valiev F. ," Application of Neural Networks for Event-by-Event Evaluation of the Impact Parameter", Physics of Particles and Nuclei. 54, 446 (2023).

DOI: 10.1134/S1063779623030152

3. 8. Galaktionov K., Rudnev V., 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). DOI: 10.1134/S1062873825712139

https://doi.org/10.1134/S1062873825712139

4. 9..[Валиев, Ф. Ф.](javascript:void(0);), [Калиниченко, Н. И.](javascript:void(0);), [Макаров, Н. А.](javascript:void(0);) & [Феофилов, Г. А.](javascript:void(0);),  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 -- Нижнняя 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.

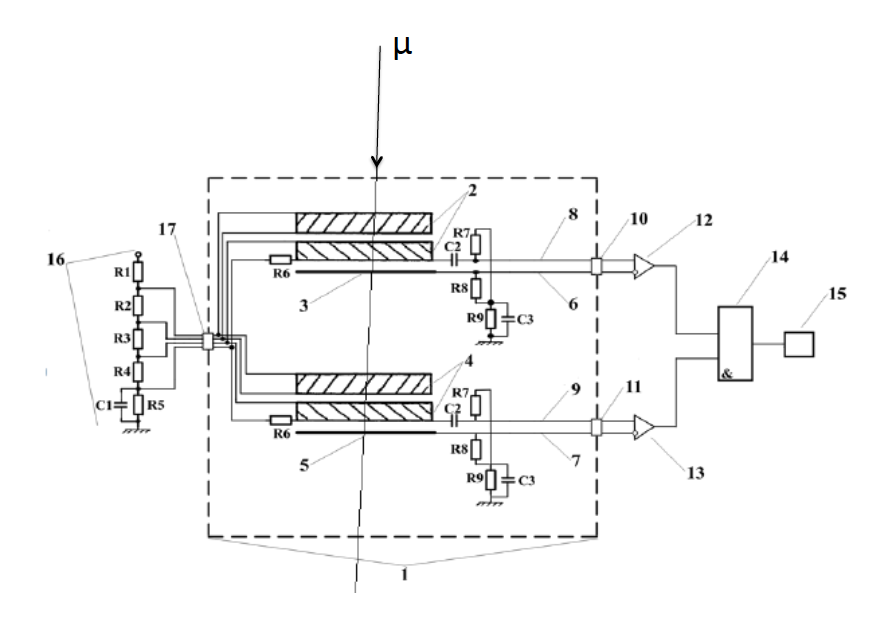


Рис. 1. Блок-схема устройства с низким фоном для обнаружения минимально ионизирующих заряженных частиц.

1 -- Вакуумный корпус;

2 -- Верхняя сборка микроканальных пластин;

3 -- Анод верхней сборки;

4 -- Нижнняя 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.

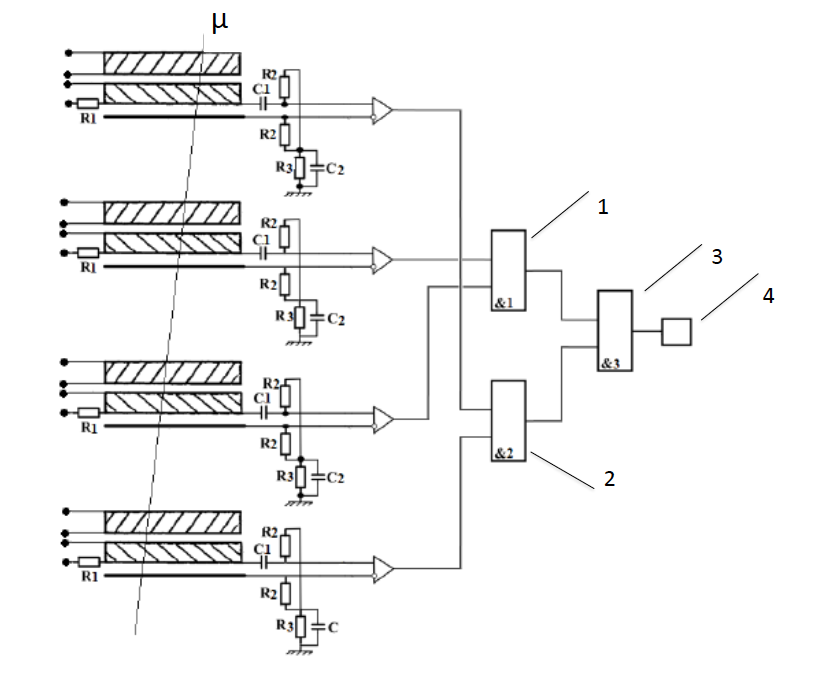


Рис.2. Блок схема проверки устройства с низким фоном для регистрации минимально ионизирующих заряженных частиц с помощью космических мюонов.

1, 2 и 3 -- Наносекундные схемы совпадений;

4 -- Блок записи.