

УДК 53.082.7

**В. А. Бабкин, С. Г. Бузин, А. С. Бурдыко, М. Г. Буряков, Н. В. Горбунов,
А. В. Дмитриев, П. О. Дулов, М. М. Румянцев**

Исследование прототипа многозачерной резистивной плоской камеры с коротким стрипом и аналоговым считыванием

Рассматриваются конструкция и характеристики многозачерной резистивной плоской камеры (МРПК) с 15-сантиметровым считывающим электродом и аналоговым считыванием. Приведены результаты исследований характеристик разработанной структуры МРПК с помощью космических лучей.

Ключевые слова: времяпролетные измерения, детекторы, многозачерная резистивная плоская камера, космические лучи

Об авторах

Бабкин Вадим Андреевич – старший научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований лаборатории физики высоких энергий. *E-mail*: babkin@jinr.ru. 141980 Московская обл., г. Дубна, ул. Академика Балдина, 4.

Бузин Святослав Геннадьевич – инженер Объединенного института ядерных исследований лаборатории физики высоких энергий.

Бурдыко Александр Сергеевич – студент 6-го курса кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс» государственного университета «Дубна».

Буряков Михаил Геннадьевич – инженер Объединенного института ядерных исследований лаборатории физики высоких энергий.

Горбунов Николай Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс» государственного университета «Дубна».

Дмитриев Александр Владимирович – студент 3-го года обучения в аспирантуре кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс» государственного университета «Дубна».

Дулов Петър Огнянов – научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований лаборатории физики высоких энергий и Пловдивски Университет «Паисий Хилендарски».

Румянцев Михаил Михайлович – научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований лаборатории физики высоких энергий.

Проблема надежной идентификации заряженных частиц особо актуальна в физике высоких энергий. Оценка массы частиц по времени, затрачиваемым ими на пролет определенного расстояния – эффективный способ идентификации частиц в области низких энергий [1].

В каждом эксперименте присутствуют специфические требования к времяпролетной системе, зависящие от решаемой задачи. Экспериментальные установки на выведенных пучках с фиксированной мишенью [2; 3; 4] отличаются в первую очередь плоскостной геометрией системы. Времяпролетная база

таких установок имеет большой диапазон и может достигать несколько десятков метров. В большинстве случаев времяпролетная система в таких экспериментах не находится в магнитном поле. Для установок коллайдерного типа [5; 6; 7] необходима 4π геометрия системы с короткой времяпролетной базой 1.5–2 м и возможностью функционирования в магнитном поле.

Основные параметры времяпролетных систем:

- 1) геометрическая эффективность;
- 2) временное разрешение;
- 3) координатное разрешение;
- 4) радиационная стойкость компонентов системы;
- 5) радиационная длина.

В настоящее время в физике высоких энергий многозачерная резистивная плоская

камера (МРПК) – наиболее подходящий кандидат для создания больших по площади времяпролетных систем [8; 9; 10]. К преимуществам МРПК относятся: низкая стоимость, высокая эффективность регистрации заряженных частиц и не чувствительность к наличию магнитного поля.

Примером времяпролетного детектора может быть разработанная в ОИЯИ (г. Дубна) трехстековая конструкция МРПК со стриповым считыванием и активной областью 300×600 мм² [11]. Для считывания и управления разработана электроника: накамерный усилитель-дискриминатор на основе микросхемы *NINO* и система сбора данных на базе время-цифрового преобразователя (ВЦП) *HPTDC* [12; 13; 14; 15]. С упомянутой электроникой в качестве метода обработки сигналов возможно применение только метода превышения порогового значения (*time-over-threshold, TOT*), используемого для вычисления информации о времени путем измерения времени прихода импульса и его длительности в течение заданного порогового значения. Методические исследования данного типа детектора показали возможность измерения времени пролета с временным разрешением до 42 пс [16].

Известны работы, где показано, что эту величину можно существенно улучшить. Так, в работе [17] получено временное разрешение 20 пс для МРПК с 24 зазорами. Существует модельное предсказание [18], что МРПК с газовым промежутком 0.3 мм и 6 зазорами имеет предельное временное разрешение, равное 25 пс.

Однако у МРПК с усилителем на базе *NINO* существует недостаток при больших множественностях частиц, связанный с размером считывающего электрода детектора и особенностями считывания сигнала ВЦП. Для оцифровывания сигнала ВЦП необходимы сигналы с длительностью минимум 6 нс. Соответственно, усилитель на базе *NINO* формирует сигналы не менее указанной длительности. Регистрация двух и более событий с временным промежутком меньшей величины приведет к искажению принятой информации и, как следствие, потере информации о частицах.

Для увеличения эффективности разделения близких по времени сигналов при больших множественностях частиц предлагается замена на аналоговый накамерный усилитель и увеличение гранулярности детектора. Использование всей формы сигнала позволит

увеличить точность регистрации частиц, а также применять методы цифровой обработки сигналов.

Целью работы является разработка и исследование прототипа нового типа времяпролетного детектора – многозазорной резистивной плоской камеры с коротким стрипом и аналоговым считыванием, способного идентифицировать заряженные частицы и ядерные фрагменты путем точного измерения времени пролета при больших множественностях частиц.

Устройство и принцип работы детектора

Схематическое изображение МРПК представлено на рис. 1. Детектор состоит из трех стеков по пять газовых зазоров каждый. Каждый стек ограничен двумя печатными платами (ПП) с обеих сторон и состоит из двух внешних толстых электродов, четырех внутренних тонких, а также пяти слоев монофиламентной лески, определяющей зазор между электродами. В качестве резистивных электродов используются стекла. Внешние стекла каждого стека имеют толщину 400 мкм. Внутренние стекла – 280 мкм. Монофиламентная леска – 200 мкм. Толщина лески влияет на множество параметров камеры. Одна сторона внешних стекол покрывается токопроводящей краской для подачи высокого напряжения. Поверхностное сопротивление слоя выбирается в интервале 5–20 МОм/кв, чтобы обеспечить прозрачность слоя для сигнала и уменьшить величину сигналов межэлектродных наводок за счет паразитной емкостной связи между ПП со считывающими электродами (стрипами) и проводящим слоем.

Все внутренние неокрашенные стекла электрически изолированы друг от друга. Размеры стекол определяют активную область МРПК. Отличительная особенность трехстековой конструкции со стриповым считыванием заключается в расположении стрипов только на внутренних ПП. Это обеспечивает симметрию между стрипами, одинаковую скорость распространения сигнала и как результат предотвращает расхождение сигналов между анодом и катодом. Сигналы считываются с двух сторон стрипов на накамерную электронику [11].

Для работы МРПК необходим постоянный поток газовой смеси через детектор. Ти-

пичный рецепт смеси для временных измерений: $C_2H_2F_4$ 90%, $i-C_4H_{10}$ 5%, SF_6 5% [19].

При прохождении ионизирующей частицы через газовый зазор вдоль её трека образуются кластеры первичной ионизации. Из-за наличия приложенного поля электроны и ионы начинают ускоряться и дрейфовать, испытывая упругие и неупругие соударения с нейтральными молекулами газовой смеси [20].

В многозатворном детекторе пролетающая частица создает кластеры ионизации в несколь-

ких газовых промежутках и каждый кластер тут же развивается в лавину (рис. 2). Полный заряд сигнала будет являться суммой всех зарядов лавин, вызванных каждым кластером первичной ионизации. Заряд на стеклянных пластинах не накапливается, т.к. вследствие газового усиления на разные поверхности одного и того же электрода приходят равные отрицательный и положительный заряды, компенсирующие друг друга [18].

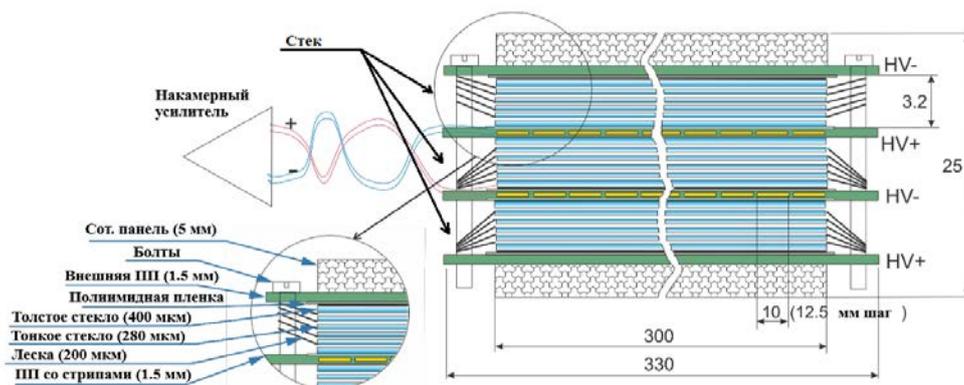


Рис. 1. Схема многозатворной резистивной плоской камеры

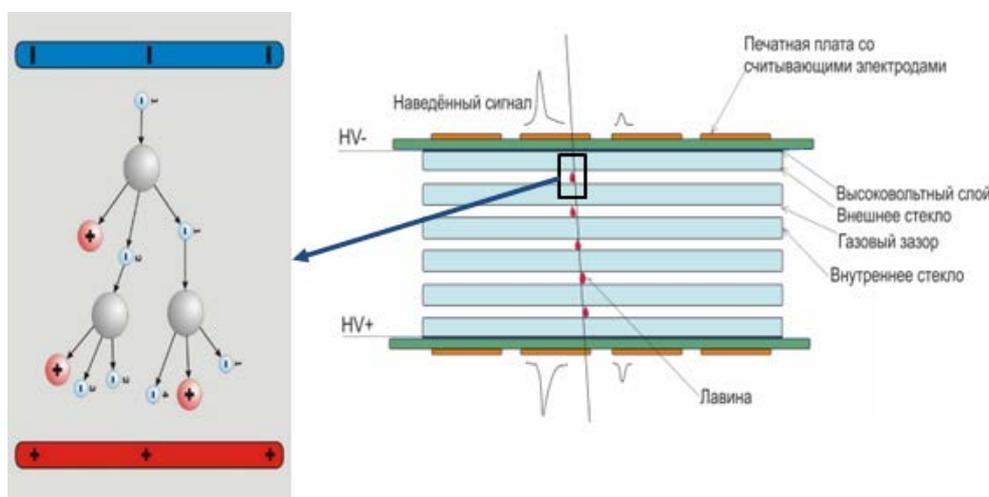


Рис. 2. Схематехническое изображение ионизации газа в МРПК

Вычисление газового усиления в одном зазоре упрощается, если число ионизированных электронов считать не дискретной, а непрерывной величиной заряда, равномерно распределенного в газовом объеме. Первичная ионизация I может быть записана в виде

$$I = eng, \quad (1)$$

где e – заряд электрона; n – число кластеров ионизации на единицу длины; g – ширина газового зазора.

Под действием внешнего поля каждый электрон первичной ионизации дрейфует к аноду и при этом возникает лавина. За время t после появления первичной ионизации возникшие лавины смещаются относительно анода на расстояние $\Delta x = wt$, где w – дрейфовая скорость электрона, и будут иметь газовое

усиление $e^{a\Delta x}$, где a – первый Таунсендовский коэффициент. Полное число собранных на аноде электронов определится как

$$N(t) = n(g - wt)e^{awt}. \quad (2)$$

Исходя из этого и применяя электростатическую теорему Рамо – Шокли [21], токовый сигнал на считывающих электродах будет равен:

$$i(t) = eN(t)\frac{w}{g} = enw\left(1 - \frac{wt}{g}\right)e^{awt}. \quad (3)$$

Причем своего максимального значения он достигнет при $wt = g - 1/a$:

$$i_{\max} = \frac{enw}{ag}e^{ag-1}. \quad (4)$$

Данные соотношения верны согласно предположению, что только движение электронов влияет на развитие токового сигнала на считывающих электродах. Вклад положительных ионов из-за их малой дрейфовой скорости является незначительным [20].

Для объяснения такого предположения рассмотрим только один кластер ионизации, содержащий электрон и положительный ион, которые дрейфуют в различных направлениях. За время t электрон переместится на $\Delta x_e = -wt$, а положительный ион – на $\Delta x_I = Wt$ (причем $w \gg W$). Тогда заряд, индуцированный на электродах, будет определяться суммой вкладов положительного иона и электрона:

$$q = \frac{-e\Delta x_e + e\Delta x_I}{g}. \quad (5)$$

Через какое-то время оба иона достигнут электродов, при этом $-\Delta x_e + \Delta x_I = g$. Отсюда видно, что полный заряд, индуцированный на электродах, будет равен заряду, вызвавшему его.

Длительность сигнала на электроде практически намного меньше времени, которое необходимо положительному иону, чтобы достигнуть катода, поэтому предположение о том, что индуцированный заряд определяется только движением электронов, можно считать верным в данном приближении. Токовый сигнал, индуцированный одной электрон-ионной парой, можно определить, проинтегрировав (5) по времени:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{e(w+W)}{g} \approx \frac{ew}{g}. \quad (6)$$

Заряд, индуцированный на электродах, есть интеграл тока по времени от 0 до $t_{\max} = g/w$:

$$q = \int_0^{g/w} i(t)dt = \frac{I}{(ag)^2}(ag - e^{ag} + 1). \quad (7)$$

При этом полный заряд электронов Q , возникающих в газовом зазоре, будет равен:

$$Q = en \int_0^g e^{ax} dx = \frac{I}{ag}(e^{ag} - 1). \quad (8)$$

Отношение индуцированного заряда к полному заряду, возникшему в газовом зазоре, определяется как

$$\frac{q}{Q} = -\frac{ag - e^{ag} + 1}{ag(e^{ag} - 1)} \approx \frac{1}{ag}. \quad (9)$$

В действительности величина индуцированного заряда относительно полного еще меньше за счет толщины резистивных электродов [18]. Если рассматривать газовый зазор и электроды как систему конденсаторов, включенных последовательно, то можно добавить к соотношению индуцированного заряда к полному заряду (9) такой множитель:

$$\left(1 + \frac{2d}{\epsilon_{\gamma}g}\right)^{-1}, \quad (10)$$

где d – толщина резистивных электродов, а $\epsilon_{\gamma} \approx 5$ – диэлектрическая проницаемость материала электродов. Окончательно соотношение индуцированного заряда к полному заряду примет вид:

$$\frac{q}{Q} = -\frac{ag - e^{ag} + 1}{ag(e^{ag} - 1) \cdot \left(1 + \frac{2d}{\epsilon_{\gamma}g}\right)} \approx \frac{1}{2ag\left(1 + \frac{2d}{\epsilon_{\gamma}g}\right)}. \quad (11)$$

Таким образом, индуцированный заряд уменьшится относительно полного еще приблизительно на 30%. На практике индуцированный заряд составляет доли пКл. Малая величина заряда на считывающем электроде обуславливает необходимость использования накамерной электроники с полосой пропускания 0,5–1 ГГц.

Экспериментальная часть

В процессе работы разработан детектор МРПК. Материалы для производства детектора коммерчески доступны. Список материалов для производства одного детектора представлен в таблице.

Список материалов для производства детектора

Название материала или компонента	Размеры	Количество
Арамидная сотовая панель	600×150 мм ²	2 шт.
Стеклотекстолитная печатная плата со стрипами (внутренняя)	610×180×2 мм ³	2 шт.
Стеклотекстолитная печатная плата без стрипов (внешняя)	610×180×2 мм ³	2 шт.
Стекло (внутреннее)	600×150×0.28 мм ³	12 шт.
Стекло (внешнее)	600×150×0.4 мм ³	6 шт.
Монофиламентная леска	∅ 0.2 мм	100 м
РЕТ болты с гайками	M5×20	40 шт.
Полиамидная пленка	600×150×0.1 мм ³	6 шт.
Полиамидный скотч	10 мм шириной	10 м
Медный скотч	10 мм шириной	10 см
Двухсторонний скотч	20–30 мм шириной	10 см
Токопроводящая краска	–	100 мл
Витая пара 3 М (16 пар)	0.25 м	12 шт.
Двойной пин коннектор	2.54 шаг	2 шт.

Сборка МРПК начинается с подготовки стекла. Все стекла проверяются на равномерность толщины и наличие дефектов (сколы, трещины и грязь). Затем отобранные стекла отправляют на мойку. Для мытья стекол используется ультразвуковая ванна с моющим средством. После мытья в ультразвуковой ванне стекло тщательно промывается деионизированной водой. На следующем этапе стекла сушатся при температуре 70 °С в течение одного часа и затем поступают в сборочную или покрасочную комнату.

В покрасочной комнате производится операция нанесения проводящей краски на чистое толстое стекло. Покрасочная комната оборудована в соответствии с классом ИСО7.

Для предотвращения прилипания пыли стекло обдувается «ионизатором» и фиксируется на краях липкой лентой перед покраской. На сторону нанесения краски приклеивается контакт для подачи высоковольтного напряжения. После приготовления стекла его помещают в вытяжной шкаф с пульверизаторами. Стекло окрашивается в два слоя с интервалами порядка 10 мин. для сушки. Окончательная сушка происходит в сушильном шкафу в течение 12 часов при температуре 90 °С. После завершения операции окраски поверхностное сопротивление измеряется в 6–10 точках резистивного слоя. Требуемое значение должно быть в пределах 5–20 МОм/кв.

В это же время подготавливаются сотовые панели для приклеивания к пустым ПП. После приготовления чистые ПП и сотовые панели переносятся на гранитный стол, где они склеиваются эпоксидным клеем. Платы

с приклеенными панелями готовы к сборке через 24 часа после высыхания клея и проверки рабочих поверхностей на плоскостность.

После выполнения всех приготовлений начинается сборка МРПК в чистом помещении с классом ИСО6. Толстые стекла фиксируются на ПП полиамидной клейкой лентой окрашенной поверхностью к плате. К внешним ПП приклеивается стекло с одной стороны, к внутренним – с обеих сторон. Между внутренней ПП и окрашенным стеклом добавляется слой изоляционного полиамидного листа. Прокладка лески диаметром 200 мкм проходит по поверхности толстого стекла и вокруг стягивающих винтов в форме прямоугольника. Для обеспечения зазора на краях дополнительно к леске прокладываются майларовые полоски (шириной 5 мм). После прокладки лески сверху накладывается внутренний тонкий лист стекла. Этапы прокладки лески с майларовыми полосками с последующей укладкой внутреннего стекла повторяются для остальных четырех листов внутренних стекол. Собранный стек (пять зазоров) закрывается ПП с окрашенными стеклами. Окрашенная поверхность следующего толстого стекла должна быть обращена к ПП. Высоковольтный контакт располагается на ПП так, чтобы анодный и катодный контакты располагались по диагонали. Все шаги повторяются до тех пор, пока не будет собрано три стека.

На следующем шаге сборки осуществляется сжатие детектора для затяжки винтов. Затем детектор проверяется на наличие дефектов на оптическом стенде. Завершает процедуру сборки МРПК пайка сигнального

кабеля каждого стрипа, выполненного в виде двойной витой пары.

Собранный детектор проходит ряд испытаний. Для проверки на отсутствие токов утечки проводится высоковольтный тест

на воздухе (± 3 кВ) с учетом величины влажности. В процессе теста исследуется поведение детектора на длительном промежутке времени (рис. 3).

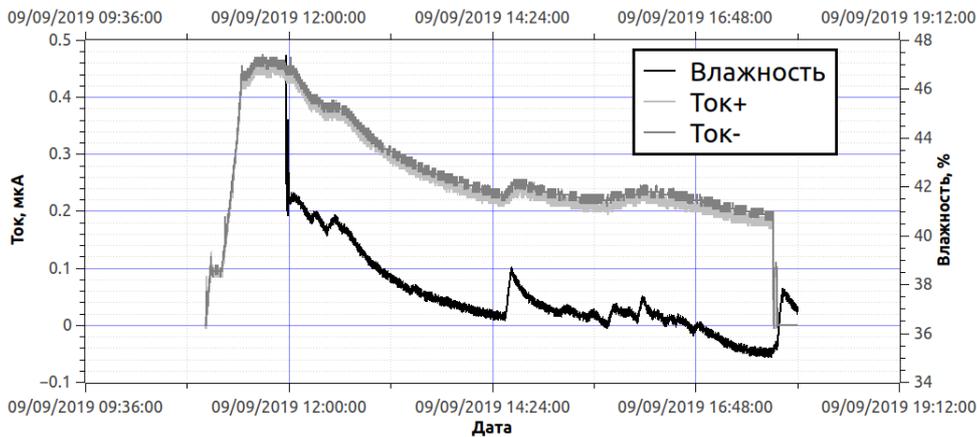


Рис. 3. Показания тока и влажности для МРПК с коротким стрипом в течение суток

На измеренных показаниях можно наблюдать спад величины тока утечки в течение суток. Всплески тока обусловлены изменением влажности в помещении. Общая тенденция кривых тока говорит об отсутствии паразитных токовых каналов.

После электрических испытания для проверки на отсутствие короткого замыкания и обратной полярности подключения высоковольтный тест при большем напряжении (± 6 кВ) повторяется с заполнением детектора рабочей газовой смесью. На рис. 3 показано, что в процессе теста токи утечки опустились до нуля, как и предполагалось.

Для установления полного сопротивления линии электропередачи МРПК со считывающими кабелями детектор исследовался на целостность сигналов в межсоединениях с помощью рефлектометра *PicoScope 9312* (стробоскопический осциллограф АКПП-4112/5). В процессе исследования было измерено полное сопротивление детектора 58 Ом, что позволило согласовать камеру с считывающими кабелями (рис. 4). В месте соединения кабель–детектор присутствует пик, что объясняет изменение импеданса линии.



Рис. 4. Результат измерения полного сопротивления линии электропередачи. Усредненный импеданс дифференциальной линии соответствует 58 Ом

Дальнейшее исследование детектора возможно только в газовом боксе на стенде для тестирования на космическом излучении. Герметичный газовый бокс изготовлен из алюминиевых профиля и сотовых панелей со специальными отверстиями под газовые, высоковольтные и сигнальные разъемы.

Тестирование изготовленного детектора в течение двух месяцев проводилось на стенде (рис. 5). В качестве стартовых детекторов использовались два четырехканальных черенковских счетчика [22] (*FFD1* и *FFD2*). Детекторы подвергались воздействию потока космических лучей. К детекторам МРПК, *FFD1* и *FFD2* прикладывались напряжения ± 5.75 кВ (11.5 кВ), 1.6 кВ и 1.4 кВ соответственно. Во время тестирования МРПК использовалась стандартная газовая смесь ($C_2H_2F_4$ 90%, $i-C_4H_{10}$ 5%, SF_6 5%).

Триггер на прохождение заряженной частицы через исследуемую камеру вырабатывался при совпадении сигналов от сцинтилля-

ционных счетчиков *S1-S8*. Площадь триггера составляет около 15×15 см², телесный угол порядка 0.18 ср. В качестве накамерной электроники МРПК использовался аналоговый усилитель, разработанный на базе коммерческих микросхем *ADA4960* и *ADA4937*. Усиленные сигналы и сигналы с черенковских счетчиков оцифровывались с помощью 16-канального цифрового преобразователя *DT5742* с частотой выборки 5 ГС/с. Для исследования с МРПК считывалась информация с 4 стрипов с двух сторон. Суммарная ширина исследуемой зоны – 5 см.

Обработка полученных сигналов (рис. 6) выполнялась с помощью программно-реализованного метода со следящим порогом для вычисления временной отметки сигнала.

На рис. 7–9 представлены распределения разницы времен между *FFD1*, *FFD2* и исследуемой МРПК. Разницы времен аппроксимировались нормальным распределением для нахождения среднеквадратичного отклонения.

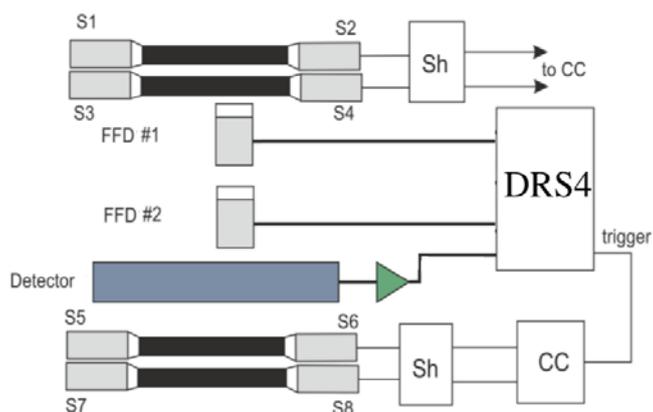


Рис. 5. Схема стенда на космических лучах

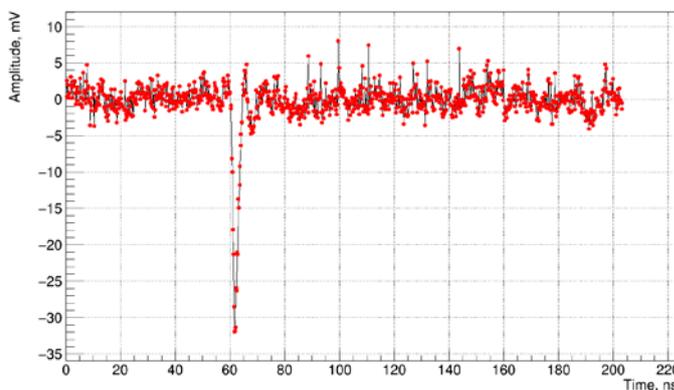
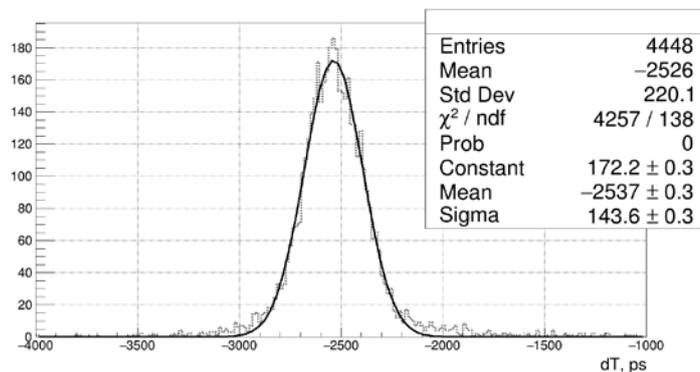
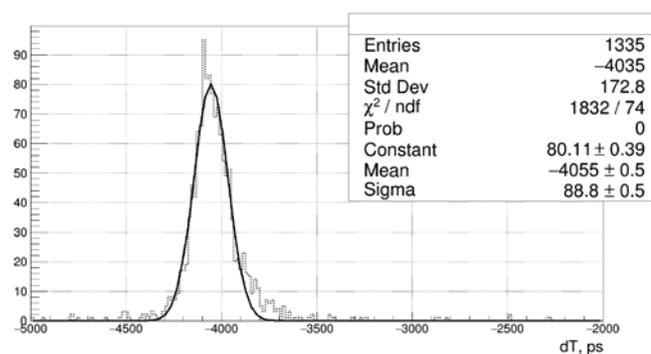
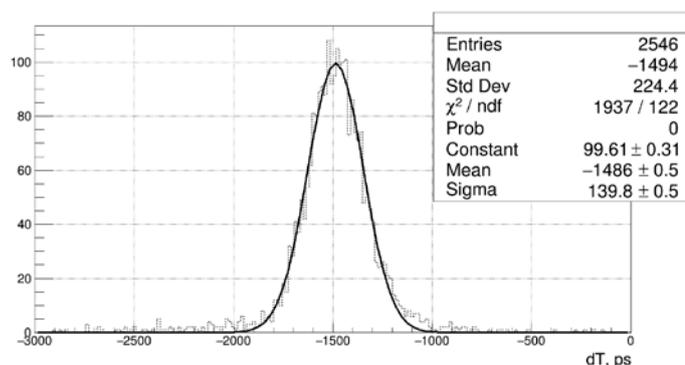


Рис. 6. Пример сигнала, полученного с цифрового преобразователя *DT5742*

Рис. 7. Разница времен между *FFD1* и *FFD2*Рис. 8. Разница времен между *FFD1* и *МРПК*Рис. 9. Разница времен между *FFD2* и *МРПК*

На основе полученных значений среднеквадратичных отклонений составлялась система уравнений для вычисления временного разрешения МРПК:

$$\begin{cases} \sqrt{\sigma_{FFD1}^2 + \sigma_{FFD2}^2} = 144 \text{ пс} \\ \sqrt{\sigma_{FFD1}^2 + \sigma_{МРПК}^2} = 89 \text{ пс} \\ \sqrt{\sigma_{FFD2}^2 + \sigma_{МРПК}^2} = 140 \text{ пс} \end{cases} \quad (12)$$

Решение системы уравнений позволяет вычислить собственное временное разрешение исследуемой МРПК – 59 пс. Полученный результат временного разрешения показывает,

что использование МРПК с укороченным стрипом с аналоговым считыванием показывает соразмерную величину временного разрешения детектора с усилителем на базе *NINO*. Для окончательного вывода необходимо произвести исследование характеристик детектора в зависимости от напряжения, чтобы определить рабочую точку детектора, а также получить полную информацию по временному разрешению.

Выводы

1. Разработана конструкция МРПК с укороченным стрипом и аналоговым считыванием.

2. Определено полное сопротивление линии электропередачи детектора и считывающих электродов. Импеданс линии составил 58 Ом.

3. С помощью метода следящего порога определено временное разрешение детектора в точке напряжения 11,5 кВ. Собственное временное разрешение исследуемой МРПК составило 59 пс.

Библиографический список

- Jacazio N. PID performance of the ALICE-TOF detector in Run 2 // PoS. 2018. Vol. LHCP2018. P. 232.
- HADES Collaboration (Kornakov G., et al.) Time of flight measurement in heavy-ion collisions with the HADES RPC TOF wall // JINST. 2014. Vol. 9, № 11. P. C11015.
- BM@N Collaboration (Kapishin M., et al.) Studies of baryonic matter at the BM@N experiment (JINR) // Nuclear Physics A. 2019. Vol. 982. P. 967–970.
- NA61 Collaboration (Abgrall N., et al.) NA61/SHINE facility at the CERN SPS: beams and detector system // JINST. 2014. Vol. 9, № 6. P. P06005.
- Production of gas gaps for the Forward RPCs of the CMS experiment / S. Park [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. 2005. Vol. 550. P. 551–558.
- The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR / Kh.U. Abraamyan [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. 2011. Vol. 628. P. 99.
- A multigap resistive plate chamber prototype for time-of-flight for the STAR experiment at RHIC / B. Bonner [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. 2002. Vol. 478. P. 176–179.
- A new type of resistive plate chamber: The multigap RPC / E. Cerron Zeballos [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. 1996. Vol. 374. P. 132–135.
- Development of the MRPC for the TOF system of the multipurpose detector / V.A. Babkin [et al.] // JINST. 2016. Vol. 11, № 06. P. C06007.
- The MRPC-based ALICE Time-Of-Flight detector: Commissioning and first performance / A. Akindinov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. 2012. Vol. 661. P. 98–101.
- Triple-stack multigap resistive plate chamber with strip readout / V. Babkin [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. 2016. Vol. 824. P. 490–492.
- Status of the front-end-electronics for the time-of-flight measurements at the MPD experiment / M.G. Buryakov [et al.] // Phys. Part. Nuclei Lett. 2016. Vol. 13, № 5. P. 532–534.
- NINO: an ultra-fast and low-power front-end amplifier/discriminator ASIC designed for the multigap resistive plate chamber / F. Anghinolfi [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. 2004. Vol. 533. P. 183–187.
- AFI Electronics. – URL: <http://afi.jinr.ru> (дата обращения: 11.12.2019).
- Christiansen J. HPTDC High Performance Time to Digital Converter. – 2004. – Pp. 102. – URL: <https://cds.cern.ch/record/1067476> (дата обращения: 21.12.2019).
- The MPD test beam setup for testing detectors with the Nuclotron beams / V. Babkin [et al.] // Instrum Exp Tech. 2017. Vol. 60, № 3. P. 307–313.
- A 20-ps timing device: A Multigap Resistive Plate Chamber with 24 gas gaps / S. An [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. 2008. Vol. 594. P. 39–43.
- Riegler W., Lippmann C., Veenhof R. Detector physics and simulation of resistive plate chambers // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. Vol. 500. P. 144–162.
- Effect of adding SF₆ to the gas mixture in a multigap resistive plate chamber / E. Cerron Zeballos [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. 1998. Vol. 419. P. 475–478.
- Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- Ramo S. Currents induced by electron motion // Proc. Inst. Radio Eng. 1939. Vol. 27. P. 584–585.
- Beam tests of Cherenkov detector modules with picosecond time resolution for start and L0 trigger detectors of MPD and BM@N experiments / V. Yurevich [et al.] // Phys. Part. Nuclei Lett. 2015. Vol. 12, № 6. P. 778–785.