

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
ИМ. В.И.ВЕКСЛЕРА И А.М. БАЛДИНА

На правах рукописи

Бабкин Вадим Андреевич

**Времяпролетная система идентификации частиц
многоцелевого детектора MPD**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2020

Работа выполнена в Лаборатории Лаборатории физики высоких энергий
им. В. И. Векслера и А. М. Балдина
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель – *Головатюк Вячеслав Михайлович,*
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты – *XXX,*
ученая степень, ученое звание, организация/место
работы, должность
YYY,
ученая степень, ученое звание, организация/место
работы, должность

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru/ru>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Карамышева
Галина Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Данная диссертация посвящена разработке и исследованию характеристик быстрых детекторов, предназначенных для времяпролетной системы Многоцелевого детектора MPD на коллайдере НИКА. Диссертация основывается на результатах работ, выполненных автором в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в период с 2008 по 2019 год.

С 2007 года в ОИЯИ начата программа изучения свойств барионной материи при высоких плотностях и температурах. Для этого на базе существующего ускорительного комплекса Нуклотрон Лаборатории физики высоких энергий создается ускорительный комплекс NICA, включающий в себя коллайдер с пучками тяжелых ионов и протонов (NICA – Nuclotron-based Ion Collider fAcility). Первой экспериментальной установкой на будущем коллайдере должен стать Многоцелевой детектор (MPD – MultiPurpose Detector).

Актуальность темы

Результаты диссертационной работы использованы для создания времяпролетной системы Многоцелевого детектора (MPD). Создание детектирующей системы, позволяющей измерять время пролета частиц с точностью лучше 80 пс, является актуальной методической задачей. В качестве измеряющего элемента времяпролетной системы используются многоззорная резистивная плоская камера (МРПК). Данный тип детекторов в настоящее время активно развивается с целью получения лучшего временного разрешения и простой и надежной конструкции для использования в системах идентификации, измеряющих время пролета частиц. Публикуется большое число статей по данной тематике и проводятся специальные научно-методические конференции.

Целью диссертационной работы является:

- разработка и создание времяпролетной системы Многоцелевого детектора (MPD), позволяющей совместно с время-проекционной камерой (TRC) надежно идентифицировать пионы, каоны и протоны, образованные при столкновении пучков различных ядер в коллайдере NICA;
- разработка оптимальной конструкции МРПК с целью создания надежного и простого детектора для времяпролетной системы с временным разрешением лучше 80 пс;
- исследование рабочих характеристик и оптимизация на основе проведенных исследований конструкции многоззорных резистивных плоскопараллельных камер для эффективного использования их во времяпролетной системе эксперимента MPD.

Научная новизна и значимость диссертационной работы

Основной научной целью эксперимента MPD является изучение экстремально горячей и плотной ядерной материи. Интерес к таким средам связан с возможностью обнаружить новое состояние ядерной материи – кварк-глюонную плазму, существование которой предсказано современной теорией сильного взаимодействия – квантовой хромодинамикой.

Технически, новизна проявляется в создании детектирующего устройства, необходимого для удовлетворения требований эксперимента. Для получения предельного временного разрешения требуется: во-первых, разработать наиболее подходящую для условий эксперимента конструкцию детектора; во-вторых, изучить и оптимизировать лежащие в основе его работы физические процессы (для газовых детекторов – это оптимизация газового разряда); и, в-третьих, разработать и адаптировать к конструкции детектора электронику считывания, вносящую минимальный вклад в ухудшение его рабочих характеристик и позволяющую максимально эффективно обрабатывать считываемые сигналы.

В данной работе представлены последние результаты оптимизации устройства МРПК в целях получения согласованной дифференциальной линии считывания. Благодаря такому

улучшению конструкции детектора было достигнуто временное разрешение значительно лучше заявленного в требованиях эксперимента MPD.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально изучен принцип работы многозазорных резистивных плоских камер со считывающим электродом в виде длинных полос «стрипов». В ходе оптимизации были значительно изменены многие стандартные конструктивные элементы данного детектора. Впервые была применена конструкция детектора, состоящая из трех сборок стекла (далее – трехстековая) для обеспечения симметричного считывания сигнала со «стрипа» при высокой эффективности регистрации частиц.
2. Разработана, создана, экспериментально изучена и оптимизирована для массового производства МРПК с стриповым считывающим электродом для времяпролетной системы MPD с большой активной площадью ($\sim 0,2 \text{ м}^2$). Измеренное временное разрешение данного детектора в среднем составляет 50 пс (включая разрешение электроники) на всей активной поверхности.
3. Проведена методическая работа по изучению и улучшению загрузочных свойств детекторов различными методами. Впервые для этого было использовано сочетание эффекта уменьшения толщины стекла и увеличения числа узких зазоров для уменьшения заряда лавины в одном газовом зазоре.
4. Проведена работа по исследованию и моделированию особенностей прохождения высокочастотного импульса по считывающим электродам в виде длинных узких полос (стрипов) и на границах стрип-кабель-усилитель. В результате этих исследований были изменены конструкция МРПК и принцип считывания сигнала с электрода, что привело к улучшению временных характеристик детектора.
5. Разработана конструкция цилиндрической части времяпролетной системы MPD, отвечающая всем требованиям эксперимента.
6. Для испытания детекторов создана новая специализированная экспериментальная установка на выведенном пучке Нуклотрона «Тестовый канал MPD». Установка позволяет исследовать любые возможные характеристики детекторов и электроники.
7. Создана и введена в эксплуатацию инфраструктура для массового производства и испытания детекторов для эксперимента MPD.

Научно-практическая ценность работы заключается в разработке конструкции детектора, получения характеристик этого детектора, создания участков для тестирования и массового производства детекторов для экспериментальной установки MPD.

1. Изучено влияние неоднородности диэлектрика вблизи считывающего электрода МРПК на форму выходного дифференциального сигнала. Впервые на основе результатов этого изучения предложена и разработана новая трехстековая конструкция МРПК с симметричным стриповым считыванием.
2. Разработана оригинальная конструкция МРПК для времяпролетной системы многоцелевого детектора MPD со стриповыми считывающими электродами с временным разрешением лучше 50 пс.
3. Впервые на пучке Нуклотрона были изучены загрузочные способности МРПК с полупроводниковым стеклом. Эффективность такого детектора превышает 90% при нагрузках до 70 кГц/см^2 .
4. На выведенном пучке Нуклотрона ОИЯИ создана и введена в эксплуатацию новая современная экспериментальная установка «Тестовый канал MPD» для исследования параметров детекторов и для будущих экспериментов.
5. Спроектирована и запущена в массовое производство времяпролетная система для детектора MPD, позволяющая с высокой эффективностью идентифицировать заряженные частицы в широком диапазоне импульсов.

Достоверность результатов данной работы подтверждается повторяемостью полученных результатов работы в процессе массового производства и использования описываемых детекторов при получении физических результатов в действующем эксперименте. Помимо этого, достоверность подтверждается неоднократным цитированием результатов работы в сторонних публикациях.

Апробация работы и публикации

Значительная часть результатов данной диссертационной работы были представлены соискателем лично на следующих научных мероприятиях:

1. LX Международная конференция по ядерной физике «Ядро-2010» (Санкт-Петербург, Россия, **07/2010**);
2. 12th Vienna Conference on Instrumentation – «VCI 2010» (Вена, Австрия, **02/2010**);
3. Сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (Москва, Россия **11/2012**);
4. XVII конференция ОМУС-2013 (Дубна, Россия, **04/2013**);
5. «Technology and Instrumentation in Particle Physics - TIPP-14» (NIKHEF, Нидерланды, Амстердам, **06/2014**);
6. «13th Pisa meeting for advanced detectors» (INFN, Бьядола, о. Эльба, Италия, **05/2015**);
7. «SPIN-Praha-2015, Advanced Studies Institute, Symmetries and Spin»(Прага, Чешская Республика, **07/2015**);
8. «The XIII workshop on resistive plate chambers and related detectors–RPC2016» (Гент, Бельгия, **02/2016**);
9. «Instrumentation for Colliding Beam Physics – INSTR17» (Новосибирск, Россия, **02/2017**);
10. CREMLIN WP7 "Super c-tau factory workshop" (Новосибирск, Россия, **05/2018**);
11. The European Physical Society Conference on High Energy Physics «EPS-HEP2019» (Гент, Бельгия, **07/2019**);
12. NICA days 2015, 2017, 2019 (Варшава, Польша, **11/2015-2019**);
13. «Instrumentation for Colliding Beam Physics – INSTR-20» (Новосибирск, Россия, **02/2020**).

Также, результаты работы неоднократно представлялись на общелабораторных и методических семинарах ЛФВЭ и совещаниях коллаборации MPD/NICA. По материалам диссертации опубликовано 15 работ в изданиях, индексируемых в базах научного цитирования Scopus, WoS и РИНЦ. Перечень публикаций приведен в списке литературы.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на **150** страницах и состоит из введения, **5** глав и заключения. Диссертация содержит **99** рисунков, **5** таблиц и список литературы из **99** источников цитирования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** представлено описание целей данной работы, ее актуальность и новизна. Здесь же приводятся основные результаты диссертационной работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной. В ней перечислены цели эксперимента, основные физические задачи и требование к установке для решения этих задач. В этой главе также кратко описан состав и параметры ускорительного комплекса тяжелых ионов NICA и основных экспериментов на нем. В первую очередь уделяется внимание многоцелевому детектору MPD. При описании структуры многоцелевого детектора особое внимание уделяется времяпролетной системе. Приводится историческая справка о развитии методики времяпролетных измерений и обзор экспериментов, использующих данную методику. Далее описываются детекторы для измерения времени пролета, и перечислены требования, предъявляемые к времяпролетной системе MPD, исходя из которых, выбирается тип и конструкция детектора.

В состав ускорительного комплекса NICA входят: линейный ускоритель, который инжектирует ионы с энергиями 3 МэВ/нуклон в бустер – ускоритель на энергию до 600 МэВ/нуклон, из которого пучок инжектируется в Нуклотрон – существующий модернизированный ускоритель. В Нуклотроне пучок ускоряется до энергии 1-4.5 ГэВ/нуклон.

После ускорения ионы инжектируются во встречные кольца коллайдера где циркулируют непрерывно. На коллайдере предусмотрено два места встречи пучков. В северной точке встречи планируется установить Многоцелевой Детектор (MPD), предназначенный для изучения свойств горячей и плотной барионной материи, образующейся при соударениях тяжелых ионов высоких энергий. Исследования такого рода, в первую очередь, связаны с возможностью обнаружения кварк-глюонной плазмы (КГП), существование которой предсказано современной теорией сильного взаимодействия – квантовой хромодинамикой (КХД).

В физической программе на установке MPD можно выделить несколько основных исследуемых проблем современной физики: уравнение состояния ядерной материи при высоких плотностях, восстановление киральной симметрии, фазовый переход в состояние деконфайнмента, свойства кварк-адронной фазы и наличие критической точки на фазовой диаграмме. Помимо данных фундаментальных проблем, исследования позволят лучше понять механизмы образования нейтронных звезд и эволюцию Вселенной.

Фазовая диаграмма сильно взаимодействующей адронной материи представлена на рисунке 1. Согласно предсказаниям КХД, при сверхвысоких температурах и плотностях в адронной среде возможен фазовый переход или деконфайнмент, при котором материя представляет собой смесь свободных кварков и глюонов (кварк-глюонная плазма).

Физическую программу на Многоцелевом детекторе планируется проводить при умеренных температурах и максимальных значениях барионной плотности. В данной промежуточной области фазовой диаграммы должен проявляться деконфайнмент, а также возможно наличие критической точки. Интерес к области фазовой диаграммы с промежуточной энергией и высокой плотностью очень велик. Это подтверждает то, что сразу несколько крупнейших исследовательских центра мира, в числе которых Германия (комплекс FAIR в GSI), США (ускоритель RHIC в BNL, где уменьшается энергия для достижения необходимых параметров) и ЦЕРН (обновленный эксперимент NA61/SHINE), планируют проводить исследования в данной области.

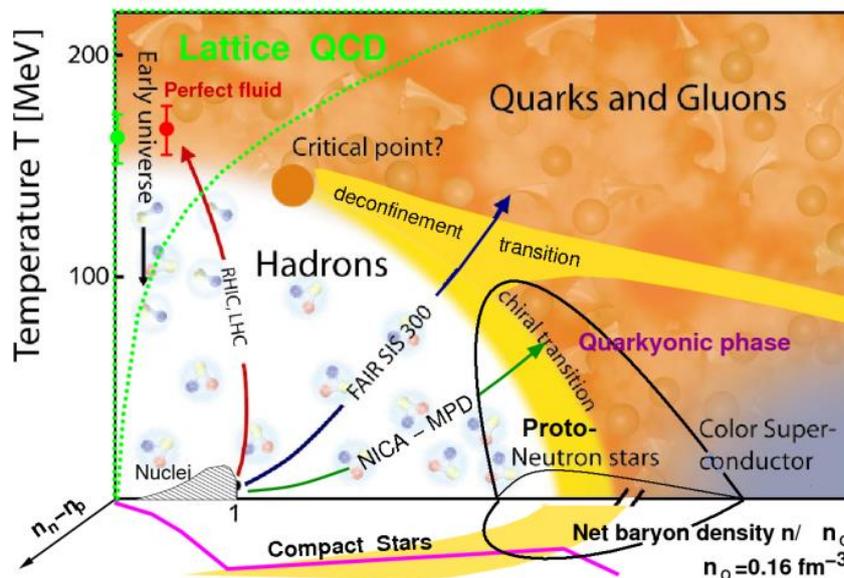


Рис. 1 – Фазовая диаграмма сильно взаимодействующей адронной материи.

Относительно широкий диапазон энергий столкновения ($\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ GeV) и разнообразие сталкивающихся ядер комплекса NICA позволяет просканировать достаточно большую область фазовой диаграммы. В свою очередь, рекордная светимость коллайдера ($L = 10^{27}$ см⁻²с⁻¹) позволяет набрать высокую статистику даже для очень редких процессов.

Благодаря таким планируемым параметрам ускорителя на установке MPD можно успешно решить следующие задачи:

- изучение выходов адронов (полной множественности и спектров) включая мульти-странные барионы и антибарионы;
- изучение критических явлений в пособытийных флуктуациях множественности, поперечного импульса, отношения частиц и барионной плотности;
- изучение коллективных эффектов (прямых и эллиптических потоков) для идентифицированных адронов включая странные частицы;
- фемтоскопия (НВТ интерферометрия) идентичных частиц и поиск негауссовых компонент в корреляционных функциях;
- подробное изучение электромагнитных пробников (фотоны и дилептоны).

Помимо этого, комплекс НИКА предоставляет возможность проводить другие фундаментальные исследования.

Для решения таких сложных и требующих высокой точности измерения задач необходима экспериментальная установка с наилучшими возможными параметрами. Предлагаемый Многоцелевой детектор, удовлетворяющий таким требованиям, создается с учетом последних достижений в методике детектирования частиц и электроники.

На рисунке 2 приведена структура Многоцелевого детектора в виде осевого сечения с основными размерами. Многоцелевой детектор MPD разрабатывается как 4π спектрометр, позволяющий регистрировать заряженные адроны, электроны и фотоны, образующиеся в столкновениях тяжелых ионов. Для достижения этой цели, детектор будет включать прецизионную трековую систему и высокопроизводительную систему идентификации частиц (PID), основанную на времяпролетных измерениях и калориметрии. Детектор сконструирован в виде цилиндра (барреля) с торцевыми частями. Системы в нем располагаются слоями вокруг области столкновения пучков таким образом, что перекрывают область вылета частиц в диапазоне псевдобыстрот $|\eta| \leq 2$.

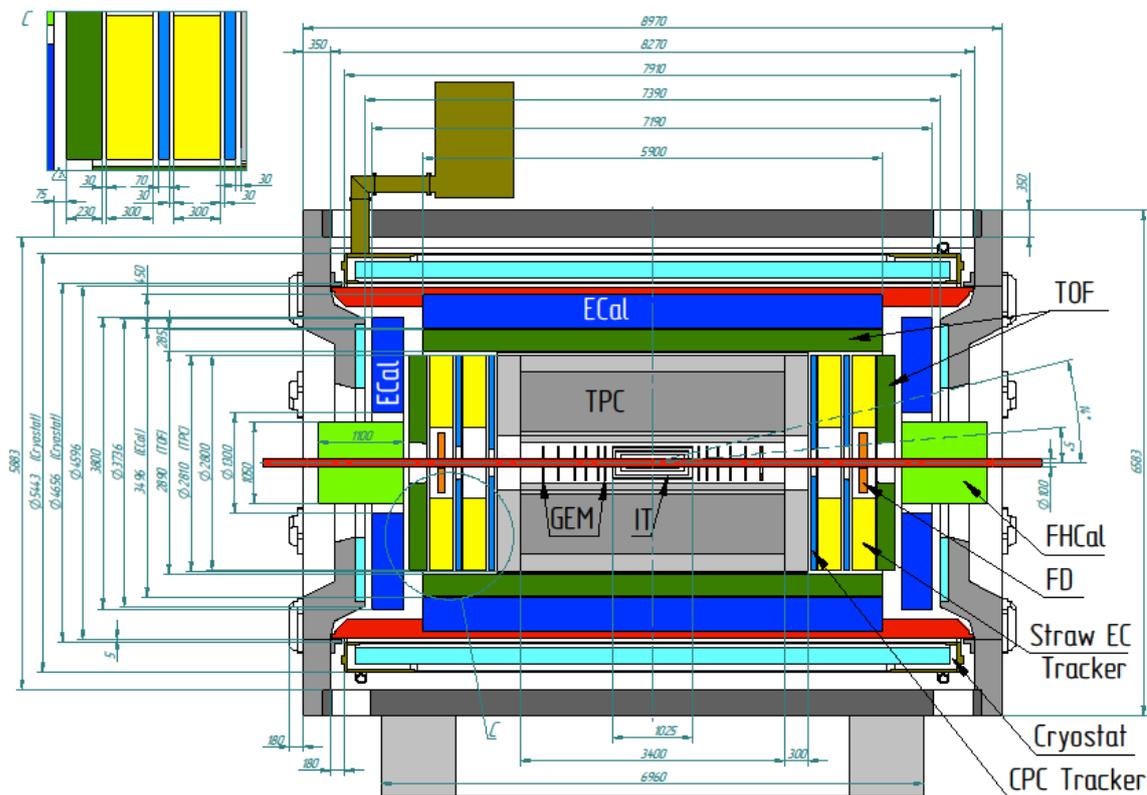


Рис. 2 – Структура Многоцелевого детектора с основными размерами.

В многоцелевом детекторе можно выделить 4 основные системы:

1. *Магнит-соленоид*, который предназначен для создания однородного магнитного поля внутри детектора.
2. *Система идентификации частиц*, включающая в себя: время-проекционную камеру (TPC), времяпролетную систему (TOF) и электромагнитный калориметр (ECal).
3. *Трековая система* включает: внутренний трекер (IT), время-проекционную камеру (TPC) и систему координатных детекторов торцевого трека (ECT и CPC).
4. *Система триггера* содержит: быстрый передний детектор (FFD) и передний адронный калориметр (FHCAL).

Исходя из спектров вторичных частиц можно сформулировать требования к времяпролетной системе: временное разрешение лучше 80 пс (для разделения π/K с поперечными импульсами до $p_t < 1.5$ ГэВ/с);

- оптимальная конфигурация (гранулярность) считывающих электродов для минимизации множественности срабатываний ($< 15\%$) и количества каналов электроники;
- хорошее координатное разрешение (< 10 мм) для эффективного согласования трека, определенного в TPC с положением частицы в TOF;
- детектор должен работать в магнитном поле до 0.5 Тл;
- временное разрешение и эффективность не должны деградировать при нагрузках до 50 Гц/см².
- конструкция детектора должна быть достаточно недорогой и простой для создания системы с большой площадью;

Зная импульс частицы p , и время t , за которое она пролетела расстояние L , можно определить

её массу $m_0 c^2 = pc \sqrt{\frac{t^2 c^2}{L} - 1}$, а соответственно, и тип. Из соотношения видно, что способность идентификации частиц в первую очередь определяется точностью измерения импульса и времени пролета.

Времяпролетные измерения в ядерной и атомной физике начали применяться довольно давно. Изначально методика, в основном, использовалась для масс-спектрометрии тяжелых

ионов. Но с появлением быстрой электроники времяпролетную методику стали использовать для идентификации более легких заряженных адронов. До 90х годов XX века основным и практически не имеющим конкурентов детектором для времяпролетных измерений был сцинтилляционный счетчик, временное разрешение которого было порядка 150 пс. Разработанный Ю.Н. Пестовым в 70-е годы искровой плоскопараллельный газонаполненный детектор позволял получить временное разрешение до 25 пс, но был крайне сложен в эксплуатации и использовал очень дорогую на то время быструю электронику. С появлением в 90х годах резистивной плоскопараллельной камеры произошла революция во времяпролетных измерениях. Детектор был надежен, прост в производстве и эксплуатации. В свою очередь, динамичное развитие аналоговой и цифровой электроники в этот период позволило достичь на РПК временных характеристик, сравнимых с счетчиком Пестова. На настоящее время с использованием многоззорной технологии РПК временное разрешение детектора достигло рекордного, и возможно, предельного для газовых детекторов временного разрешения порядка 15 пс.

Возможность достижения таких характеристик сказалась на выборе многоззорной РПК в качестве основного элемента времяпролетной системы MPD.

Во второй главе описывается устройство и принцип работы резистивной плоской камеры и обсуждаются требования, предъявляемые к конструкции, газовой смеси и считывающей электронике. Далее формулируются основные теоретические принципы её работы. Рассматривается процесс формирования и распространения сигнала в МРПК от образования при пролете частицей кластеров ионизации до распространения наведенного на считывающие электроды электрического сигнала по дифференциальной линии стрип-кабель-усилитель. Особое внимание уделяется специфике работы многоззорной РПК. Анализируется теоретический предел временного разрешения МРПК.

Принципиально, резистивная плоская камера представляет собой один или несколько параллельных газовых промежутков определенной ширины, которая задается специальным спейсером, образованных плоскими электродами с объемным сопротивлением порядка $10^{10} - 10^{13}$ Ом·см. Для создания внутри газового промежутка сильного электростатического поля на поверхности внешних стекол, который служат основой для электродов наносится проводящее покрытие, на которое подается необходимое высокое напряжение. Электромагнитный импульс, возникающий в результате газового разряда, индуцируется на электроды, вытравленные на стеклотекстолите. Электроды отделены от высоковольтного слоя изолятором во избежание пробоя. Прочность и плоскостность конструкции детектора обеспечивается благодаря наклеенным на внешние считывающие платы сотовым панелям.

Известно, что временное разрешение РПК зависит от статистических флуктуаций первичной ионизации и газового усиления в зазоре. Естественно, уменьшение ширины зазора должно уменьшать разброс по времени. В узком зазоре вероятность образования кластера ниже, чем в широком. Поэтому для увеличения эффективности увеличивают число газовых промежутков. Таким образом, временное разрешение детектора значительно улучшается без потери эффективности. Детектор, содержащий большое количество газовых зазоров, называют многоззорной РПК. На рисунке 3 схематично изображено устройство МРПК.

Большое число зазоров обычно разделяют на несколько частей (стеков), на которые отдельно подается напряжение. Это делается для уменьшения высокого напряжения, которое необходимо подавать на высоковольтные электроды, а также для хорошего согласования линии и удобства считывания импульса со считывающих электродов.

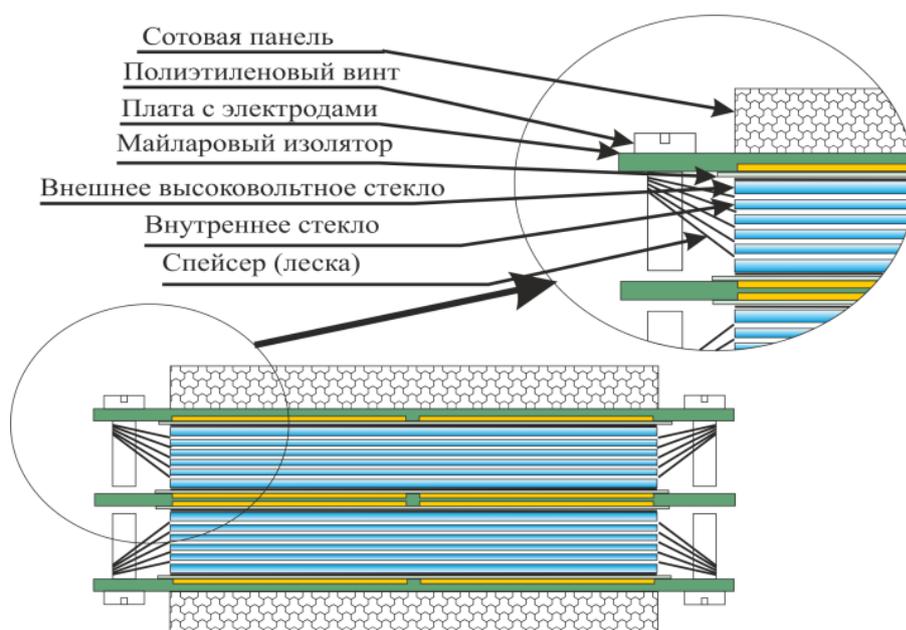


Рис. 3 – Устройство многозазорной резистивной плоской камеры.

Работа РПК базируется на тех же принципах, что и в большинстве газонаполненных детекторах. Ионизирующая частица, проходя через газ, ионизирует его, оставляя так называемые кластеры ионизации. Свободные электроны под воздействием сильного электрического поля в зазоре быстро перемещаются к аноду, выбивая на пути другие электроны из молекул газа и провоцируя развитие лавины. Лавина в данном случае, благодаря эффекту объемного заряда, насыщается, и поэтому, данный режим называется насыщенным лавинным режимом. Движение электронов лавины индуцирует сигнал на внешних считывающих электродах, который распространяется по считывающему электроду, претерпевает некие изменения и поступает на вход усилителя. Насыщенный лавинный режим является основным режимом работы РПК для временных измерений. В некоторых экспериментах для триггерных целей используется стримерный режим, которые легко достигается в широкозазорных РПК. В таких детекторах наведенный импульс на порядок больше лавинного. Временное разрешение около 1 нс. При этом требования к конструкции детектора и к электронике менее строгие, чем для времяпролетных РПК. Недостатком этого режима работы является очень большое мертвое время.

Несмотря на довольно простой принцип действия, временные характеристики и эффективная работа детектора зависит от множества параметров, которые можно оценить аналитически. В связи с тем, что собственное временное разрешение РПК, в основном, определяется статистическим характером развития лавины, можно сделать вывод, что основными параметрами, от которых оно зависит, являются: эффективный коэффициент Таунсенда (зависящий от состава газовой смеси и приложенного напряжения), ширина газового зазора, число зазоров и форма считывающих электродов. Меняя эти параметры можно аналитически оценить предел собственного временного разрешения РПК.

Очевидно, что характеристики детектора зависят не только от статистики газового разряда, но и от процедуры считывания наведенного сигнала. Конфигурация считывающих электродов, влияет как на форму, так и на амплитуду наведенного сигнала. Имеет значение импеданс электродов, который влияет на форму и качество сигнала. И, наконец, многое определяют характеристики накамерной электроники. Данная проблема была детально изучена, и благодаря этому были выявлены технические проблемы стриповой РПК, такие как дисперсия сигнала и появление отражения на концах электродов. В результате удалось максимально оптимизировать все геометрические и электрические параметры линии считывания, что в конечном итоге положительно сказалось на эффективности и временном разрешении детектора.

В третьей главе описываются этапы создания и испытаний прототипов МРПК для времяпролетной системы MPD. Представлены рабочие характеристики разработанных детекторов: эффективность, временное и координатное разрешение, загрузочные способности. Приводятся результаты тестирования детекторов на пучке дейтронов Нуклотрона и анализируются полученные результаты.

В первой версии многоцелевого детектора MPD была предложена времяпролетная система, по структуре сходная с ToF ALICE. Модули времяпролетной системы планировалось составить из длинных прямоугольных МРПК с пэдовым считыванием. Для исследования рабочих характеристик предложенного детектора был собран первый прототип (см. рисунок 4), который представляет собой укороченную версию полномасштабного детектора ($150 \times 75 \text{ мм}^2$). Данный прототип состоит из двух «стеков» по 5 газовых промежутков шириной 230 мкм в каждом, разделенных стеклянными резистивными электродами толщиной 550 мкм. Дифференциальные сигналы считываются с изготовленных на печатной плате прямоугольных электродов размерами $35 \times 16 \text{ мм}^2$ при помощи усилителя-дискриминатора на базе чипа NINO. На таком прототипе МРПК получено временное разрешение 60 пс при эффективности выше 98% (см. рисунок 5).

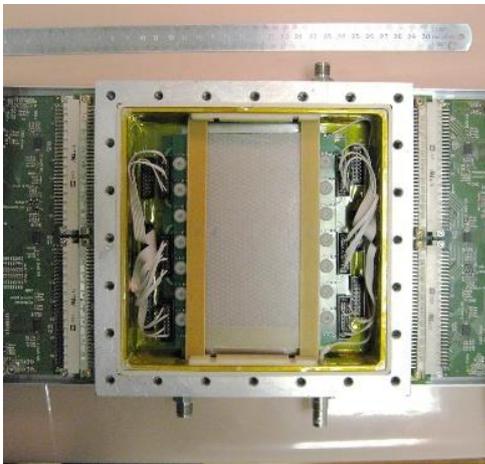


Рис. 4 – МРПК с пэдовым считыванием в газовом боксе с усилителями.

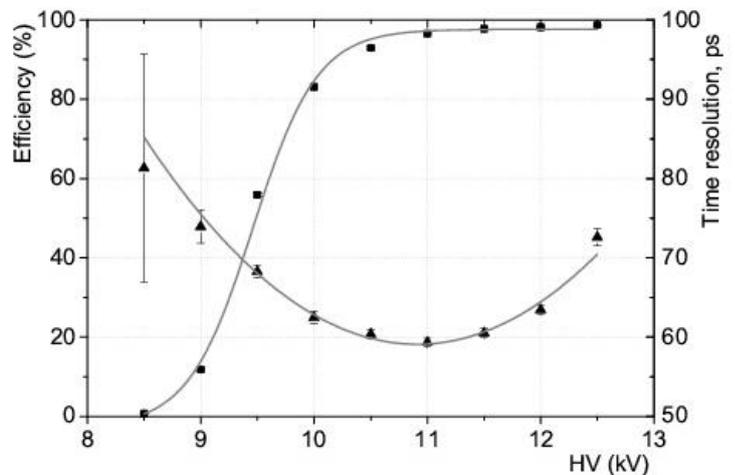


Рис. 5 – Эффективность и временное разрешение прототипа МРПК с пэдовым считыванием.

Для данной конфигурации времяпролетной системы было проведено компьютерное моделирование процессов, происходящих при столкновении ионов золота при энергиях коллайдера NICA. Симуляция показала, что максимальная множественность вторичных частиц, проходящих через времяпролетную систему, не превышает 0.002 частицы/см² или около 1% заполняемости одного канала считывания. При этом количество каналов электроники только для цилиндрической части TOF составляет 31680 каналов. Поэтому было решено оптимизировать конструкцию детектора в сторону уменьшения числа каналов электроники. Наиболее оптимальный вариант – использование в качестве считывающих электродов длинных полос – стрипов. При двустороннем считывании сигналов с такого электрода помимо хорошей временной отсечки можно с достаточно высокой точностью определять и координату пролета частицы вдоль стрипа.

Первый прототип МРПК со стриповым считыванием (см. рисунок 6) был собран в той же конфигурации, что и пэдовый детектор – два стека по 5 зазоров шириной 230 мкм в каждом. Основное отличие состояло в том, что это был полномасштабный детектор для времяпролетной системы многоцелевого детектора MPD. Размер активной области камеры составляет $600 \times 300 \text{ мм}^2$. 24 считывающих электрода в виде полосок длиной 600 мм и шириной 10 мм располагаются на печатных платах внутри и снаружи стеков камеры. Сигналы с обеих концов стрипа посредством плоского кабеля поступают на вход усилителя-дискриминатора и считываются время-цифровым преобразователем.

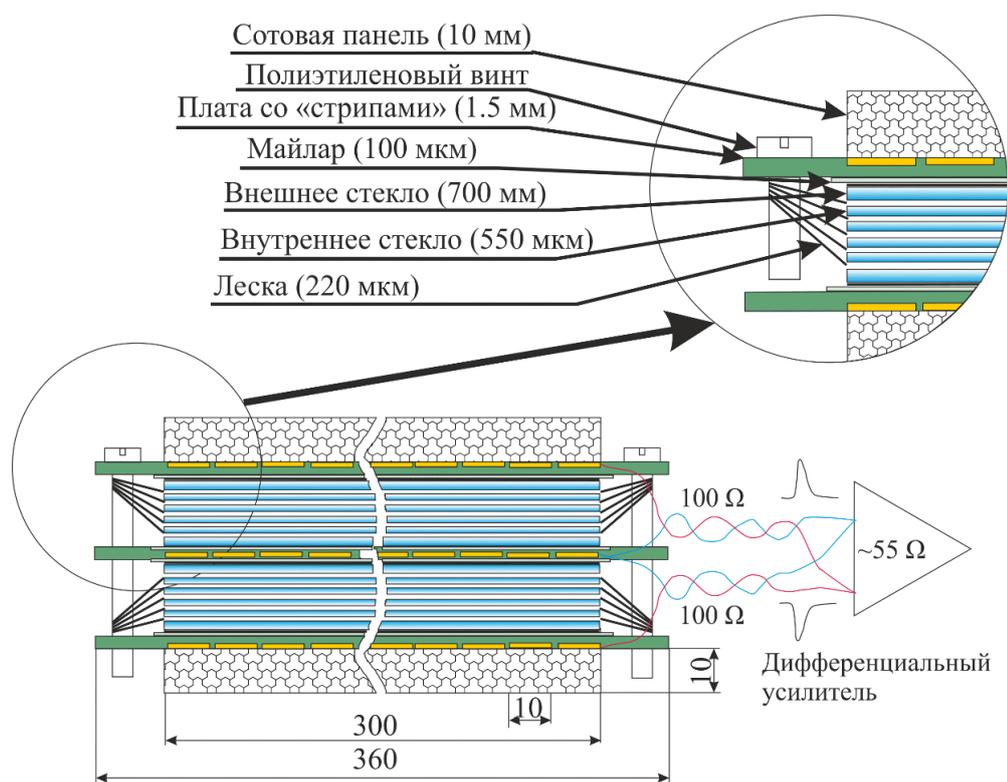


Рис. 6 – Схема устройства двухстековой МРПК со стриповым считыванием.

В результате тестирования такой МРПК было выявлено несколько проблем, связанных со считыванием со стриповых электродов. В первую очередь, обнаружилось сильное искажение сигнала из-за отражений на краях стрипа и входа в усилитель. Данная проблема была решена подбором считывающего кабеля с необходимым волновым сопротивлением. Во-вторых, обнаружили дисперсию сигналов, которая отражалась на коррекции время-длительность импульса сигнала (time-over-threshold). Из-за того, что анодный и катодные электроды находятся в разных диэлектрических условиях, скорости распространения сигналов по ним различны (см. рисунок 7). Это вызывает увеличение длительности переднего фронта дифференциального сигнала и его уширение на концах стрипа в зависимости от положения пролета частиц, что влияет на временное разрешение детектора. Для решения данной проблемы необходимо, чтобы линия считывания сигнала была диэлектрически симметричной.

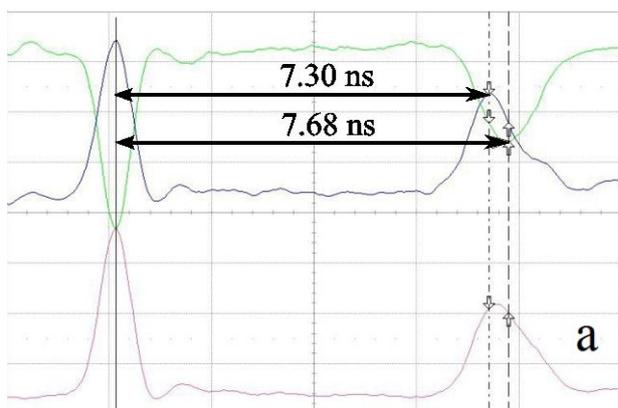


Рис. 7 – Отражение дифференциального сигнала, прошедшего через анодный и катодный стрипы двухстековой МРПК. Сигнал на внешних электродах распространяется быстрее, чем на внутренних.

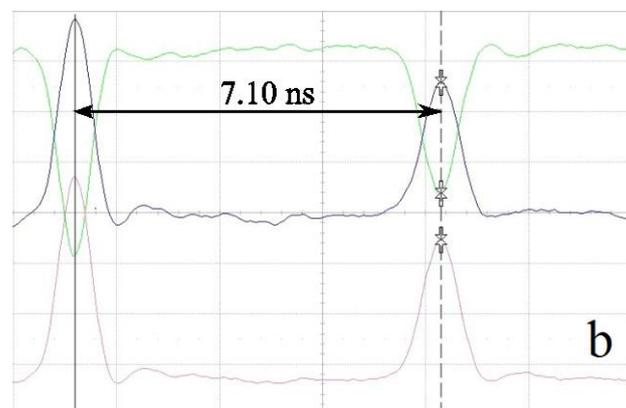


Рис. 8 – Отражение дифференциального сигнала, прошедшего через анодный и катодный стрипы одного стека двухстековой МРПК с спейсером из сотовой панели. Оба плеча сигнала распространяются с одинаковой скоростью.

Самым простым симметричным вариантом конструкции является одностековая МРПК, в которой дифференциальный сигнал считывается с двух внешних печатных плат. Прототип одностековой МРПК с 6 зазорами по 250 мкм был собран и испытан. Благодаря отсутствию дисперсии (см. рисунок 8) и правильному согласованию дифференциальной линии было получено временное разрешение около 70 пс, но эффективность детектора не превышала 95% с использованием стандартной электроники.

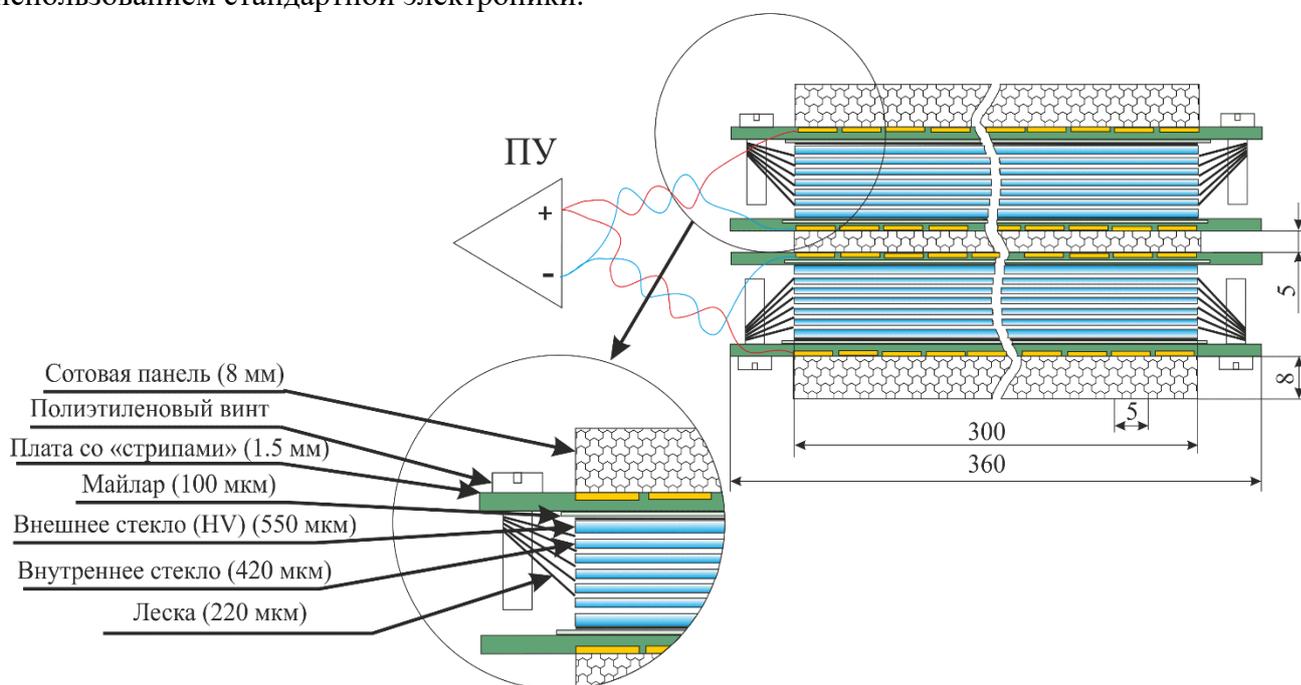


Рис. 9 – Двухстековый прототип МРПК с прокладкой из сотовой панели между стеклами.

Проблема эффективности была решена добавлением второго идентичного стека (см. рисунок 9) к уже существующему, отделенному от него прокладкой в виде сотовой панели толщиной 5 мм. Можно сказать, что сигнал считывался с двух независимых одностековых МРПК. Благодаря этому, среда вокруг электродов была одинаковой и скорости выровнялись. Характеристики такого двухстекового детектора оказались значительно лучше, чем у одностековой МРПК. Его временное разрешение составило 65 пс при эффективности выше 99% (см. рисунок 10).

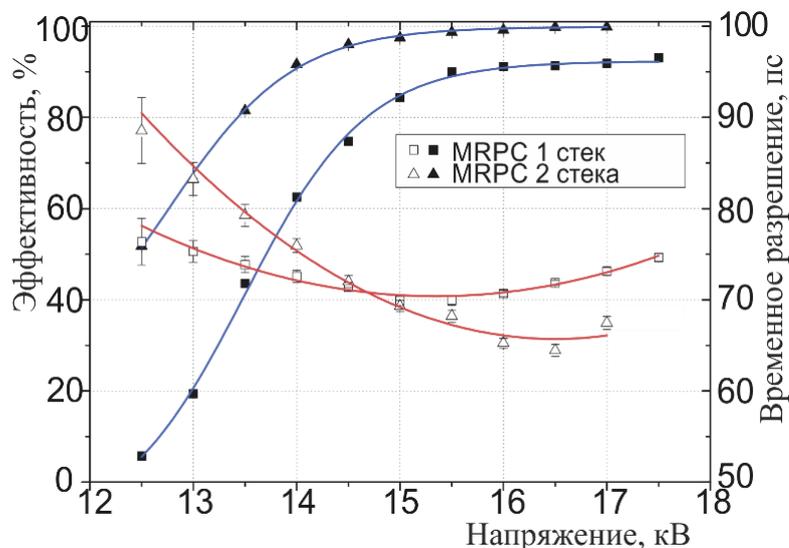


Рис. 10 – Эффективность временного разрешения одностековой и двухстековой МРПК со стриповым считыванием.

Работы по оптимизации стриповой МРПК привели к следующим выводам:

- для улучшения эффективности регистрации детектор должен иметь большое число газовых зазоров (разделенных на несколько стеков для уменьшения необходимого высокого напряжения);
- ширина стрипов и диэлектрики между анодом и катодом должны быть подобраны таким образом, чтобы дифференциальный импеданс линии анодного и катодного стрипа хорошо согласовался с импедансом считывающего кабеля;
- анодный и катодный считывающие электроды должны находиться в одинаковой диэлектрической среде для исключения дисперсии сигнала за счет скорости распространения (т.е. конструкция должна быть симметричной);

Исходя из этого была предложена новая трехстековая конструкция МРПК (см. рисунок 11), удовлетворяющая всем этим выводам.

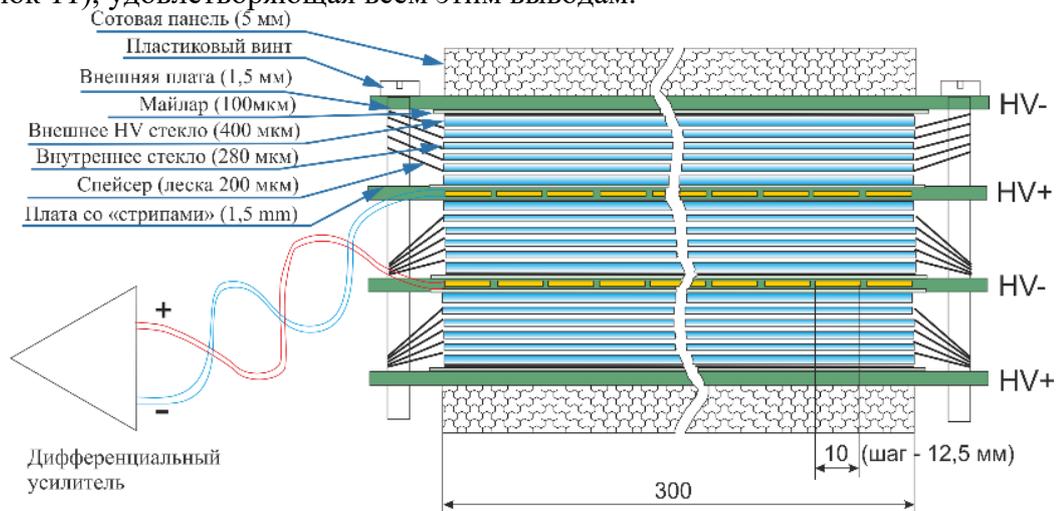


Рис. 11 – Схема устройства трехстековой МРПК.

Прототип размерами 600x300 мм² состоит из трех стеков по 5 зазоров 200 мкм в каждом, которые разделяются стеклом толщиной 280 мкм. 24 продольных стрипа шириной 10 мм располагаются только на внутренних считывающих электродах. Дифференциальный импеданс такой линии составляет 55 Ом, что позволяет считывать сигнал при помощи двойной параллельной витой пары напрямую в усилитель NINO без использования согласующих резисторов. При этом не наблюдается дисперсии (см. рисунок 12) и отражение сигнала минимально.

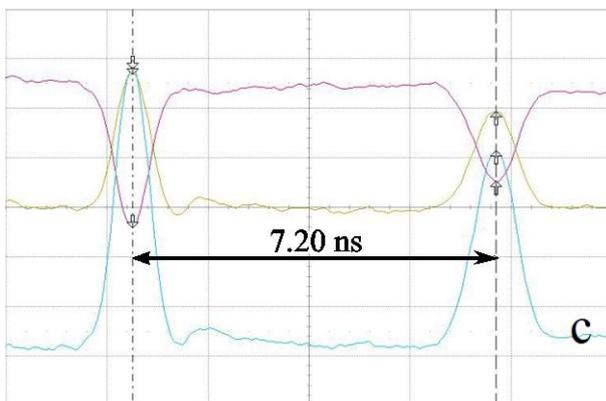


Рис. 12 – Отражение дифференциального сигнала, прошедшего через анодный и катодный стрипы трехстековой МРПК.

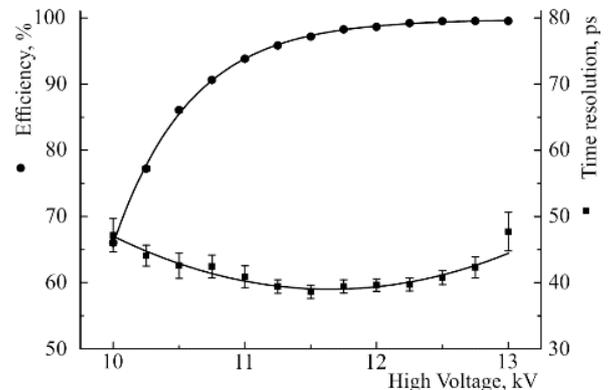


Рис. 13 – Эффективность и временное разрешение прототипа трехстековой МРПК, полученные на дейтронном пучке Нуклотрона.

Данный прототип МРПК испытывался на установке «Тестовый канал МРД» облучением пучком дейтронов с энергией 3.5 ГэВ/нуклон. Основные результаты тестирования представлены на рисунке 13. Результат тестирования показал, что за счет большого числа узких зазоров удалось достигнуть временного разрешения детектора 40 пс при эффективности около 99%. Благодаря прекрасным рабочим характеристикам, данная конструкция МРПК была выбрана в качестве основной для изготовления времяпролетной системы МРД.

Одной из особенностей стриповой МРПК является возможность определения координаты пролета частицы с достаточно хорошей точностью. Координатное разрешение поперек стрипового электрода определяется его шириной и растеканием заряда на соседние каналы. Для исследуемого прототипа с шагом стрипов 12.5 мм координатное разрешение было измерено и составило примерно 5 мм. Координата вдоль стрипа определяется разностью времени прихода сигнала на концы стрипа. При этом координатное разрешение зависит от скорости распространения сигнала по стрипу и временного разрешения детектора. Измерения показывают, что оно так же не превышает 5 мм.

Известно, что РПК с резистивными электродами из обычного стекла имеют один существенный недостаток – низкую загрузочную способность (до 1 кГц/см²) детектора, связанную с падением напряженности поля в зазоре из-за накопления заряда на резистивных электродах с высоким объемным сопротивлением (> 10¹² Ом·см). Поэтому одной из основных методических задач при разработке данного типа детекторов является улучшение их загрузочных характеристик. Эффективная работа МРПК при высоких загрузках достигается, в первую очередь, за счет понижения сопротивления резистивных электродов, что можно получить несколькими способами: использованием материалов электродов с пониженным удельным сопротивлением, нагревом обычного стекла для снижения его сопротивления, а также уменьшением толщины резистивного электрода. Другая возможность улучшения загрузочных характеристик – снижение заряда лавины в зазоре. В этом случае необходимо либо использовать большое число зазоров, либо более чувствительную электронику.

Нами были испытаны несколько прототипов МРПК предназначенных для работы с интенсивными потоками частиц. Первый детектор был изготовлен из специального стекла с удельным сопротивлением порядка 10¹⁰ Ом·см. Прототип испытывался на пучке дейтронов Нуклотрона. Тестирование показало, что детектор с низкоомным стеклом работает с эффективностью выше 95% при загрузках до 70 кГц/см². При такой загрузке временное разрешение детектора около 80 пс (см. рисунок 14).

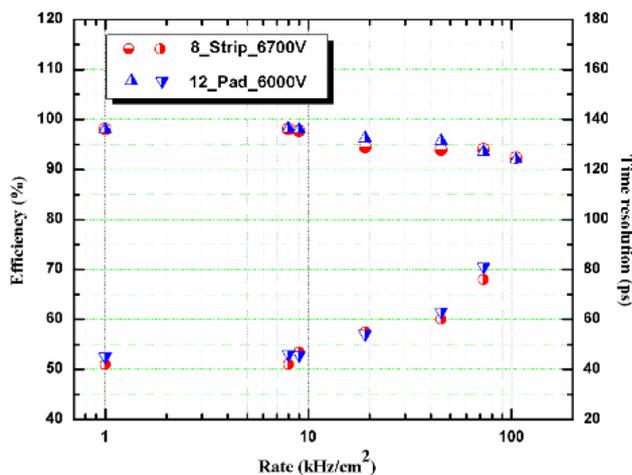


Рис. 14 – Эффективность и временное разрешение МРПК с низкорезистивным стеклом при различных потоках частиц.

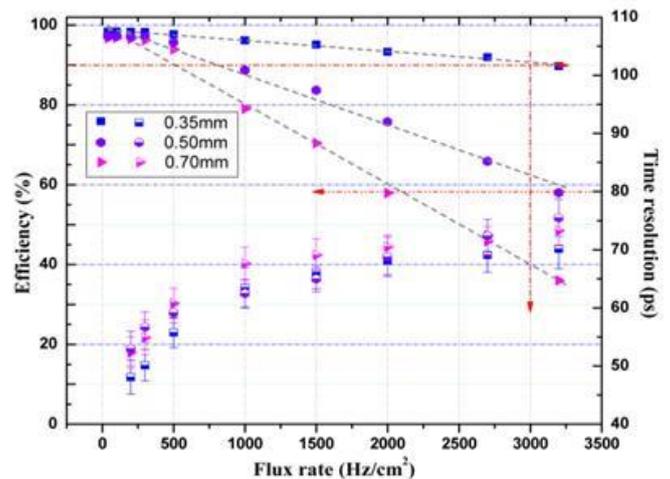


Рис. 15 – Эффективность и временное разрешение МРПК со стеклами разной толщины при различных потоках частиц.

Это говорит о том, что использование низкоомных резистивных электродов является наилучшим способом повышения загрузочных характеристик МРПК. Вместе с детектором с низкорезистивным стеклом на интенсивном пучке тестировались несколько детекторов,

изготовленных из одинакового сорта стекла различной толщины (350, 500 и 700 мкм). В результате было выяснено, что такой способ улучшает загрузочные характеристики незначительно. С самым тонким стеклом толщиной 350 мкм эффективная работа детектора наблюдалась при интенсивностях до 3 кГц/см^2 (см. рисунок 15).

Несмотря на то, что в эксперименте МРД при столкновении ядер золота ожидаются потоки частиц через времяпролетную систему не выше 20 Гц/см^2 , все же, полномасштабный элемент времяпролетной системы был испытан на интенсивном пучке. При этом сравнивались два практически идентичных детектора с единственным отличием в толщине стекла (400 и 280 мкм). Испытания показали, что детектор со стеклом толщиной 280 мкм имеет лучшую эффективность регистрации и временное разрешение при нагрузках до 3 кГц/см^2 , чем детектор с 400-микронным стеклом (см. рисунок 16). Видно, что конструкция МРПК, выбранная в качестве элемента времяпролетной системы МРД работает с эффективностью лучше 90% и временным разрешением не хуже 60 пс при нагрузках до 2 кГц/см^2 .

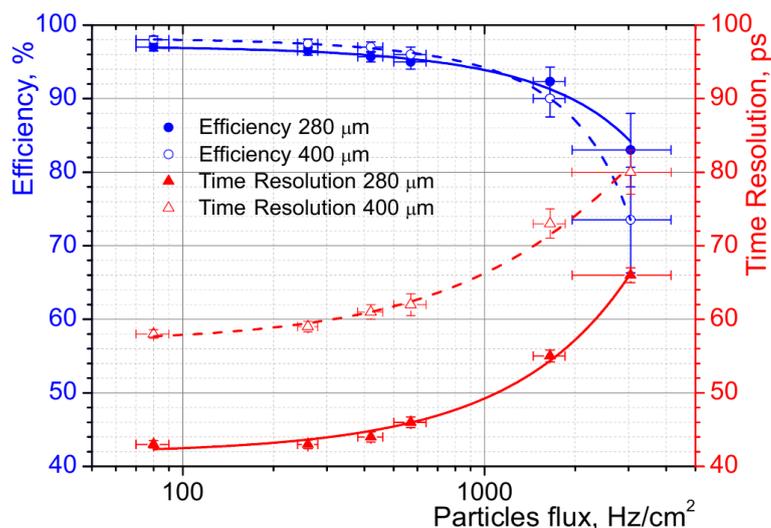


Рис. 16 – Эффективность и временное разрешение прототипа МРПК для TOF МРД с резистивными электродами толщиной 280 и 400 мкм в зависимости от интенсивности пучка.

Четвертая глава посвящена описанию технических параметров времяпролетной системы TOF многоцелевого детектора МРД, разработке вспомогательных подсистем и компьютерному моделированию параметров системы в условиях эксперимента.

Конечной целью проведенной работы является создание системы детекторов, позволяющей с высокой эффективностью идентифицировать заряженные частицы, рождающиеся в соударениях ядер золота в коллайдере NICA в как можно большем фазовом объеме. Для достижения этой цели необходимо не только разработать эффективный и быстрый детектор, но и грамотно спроектировать конструкцию всей времяпролетной системы для успешной интеграции ее в многоцелевой детектор.

Времяпролетная система TOF представляет из себя цилиндр (баррель) (см. рисунок 17), расположенный в яме соленоидального магнита МРД между время-проекционной камерой (ТРС) и электромагнитным калориметром (ЕCal). Детекторы барреля TOF удалены примерно на 1.5 метра от оси пучка. Длина цилиндра TOF составляет 6 метров. Такая геометрия позволяет регистрировать частицы в области псевдобыстрот $|\eta| \leq 1.4$. Полная площадь системы составляет около 52 м^2 .

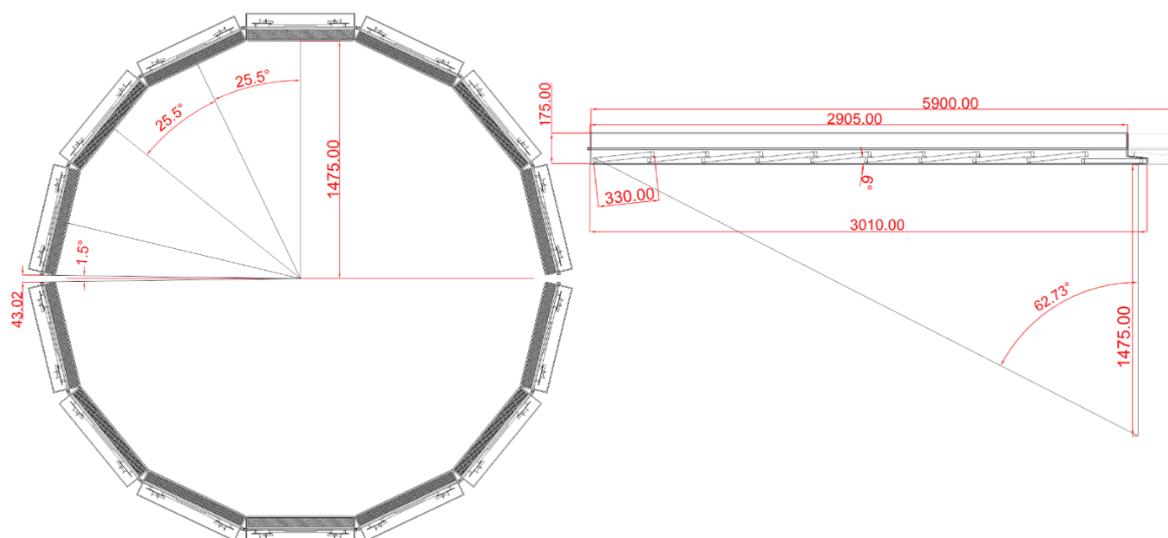


Рис. 17 – Габаритные размеры времяпролетной системы TOF MPD в плоскости XY.

Система TOF является модульной. Это упрощает ее сборку и делает конструкцию более удобной для эксплуатации. Баррель TOF состоит из 14 секторов, каждый из которых собирается из двух независимых модулей. В герметичном газовом объеме каждого модуля находится по 10 МПРК, которые расположены под углом 6 градусов к горизонту для уменьшения угла влета частиц в детекторы и более эффективной регистрации частиц в области пересечения соседних детекторов.

Во втором внешнем объеме модуля (см. рисунок 18) располагается накамерная электроника, сигнальные кабели, кабели питания, медленного контроля, триггерных сигналов и трубки системы воздушного охлаждения электроники. Сигналы на вход усилителей с детекторов подводятся кабелями через интерфейсные платы, вклеенные в центральную опорную плоскость модуля. Дифференциальные цифровые сигналы выводятся с усилителей специальными многожильными кабелями. Кабели проходят через весь модуль к торцам и выводятся из ярма магнита через отверстия к время-цифровым преобразователям, расположенным в крейтах VME на ярме магнита. На внешней крышке модуля предусмотрены каретки, благодаря которым модули легко закатываются внутрь магнита MPD по установленным на силовом каркасе пазам.



Рис. 18 – Расположение усилителей и кабелей в модуле.

Для представленной выше конструкции времяпролетной системы было проведено Монте-Карло моделирование с использованием программной среды MPDROOT. Данный программный комплекс включает в себя: генераторы столкновений ионов (UrQMD, LAQGSM, HIJING и др.), пакет для симуляции процессов прохождения частиц через вещество GEANT4 и другие надстройки, позволяющих подробно описать столкновения ионов, движение продуктов реакций и отклик детекторов на проходящие через них частицы.

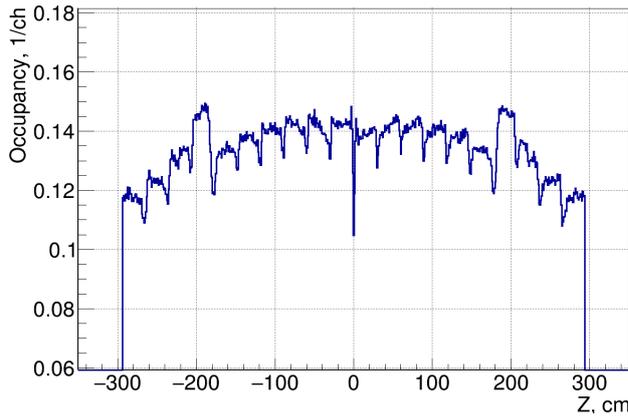


Рис. 19 – Оценка множественности частиц в области барреля TOF для центральных столкновений Au-Au при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 11$ ГэВ.

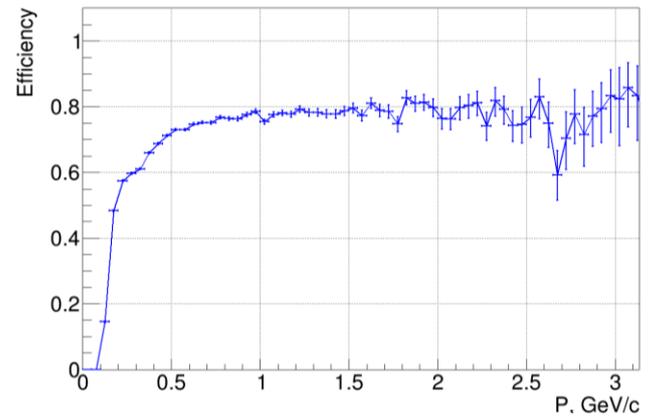


Рис. 20 – Эффективность поиска соответствия хитов TOF и треков частиц в TPC в зависимости от их импульса при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 11$ ГэВ.

В первую очередь, моделирование было направлено на оценку эффективности регистрации и способность разделения заряженных адронов по массам. На рисунке 19 представлено распределение вдоль оси пучка (оси Z) среднего числа частиц на один канал детектора, рождающихся в результате одного центрального столкновения ядер золота с энергией в системе центра масс 11 ГэВ. Видно, что максимальная множественность не превышает 15% на канал детектора, что удовлетворяет требованиям эксперимента. На рисунке 20 представлена эффективность поиска соответствия трека (мэтчинг), восстановленного в TPC, срабатыванию канала в TOF в зависимости от импульса частиц. Практически во всем диапазоне импульсов эффективность порядка 80%.

Основным показателем работы времяпролетной системы является ее способность идентификации адронов. На рисунке 21 показан результат сепарации по массам пионов, каонов и протонов при временном разрешении времяпролетной системы 80 пс. Пионы и каоны с импульсами до 1,2 ГэВ разделяются на 3σ с высокой эффективностью. Для разделения частиц с большими импульсами необходимо использовать информацию об ионизационных потерях dE/dx частиц в TPC (см. рисунок 22). В таком случае эффективность сепарации π и K мезонов с импульсами до 1,5 ГэВ составляет около 90% с примесями не выше 10%.

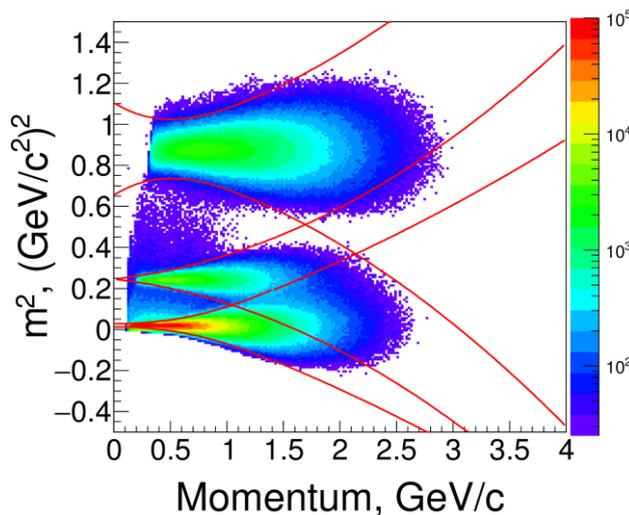


Рис. 21. Разделение π , K , p времяпролетной системой с разрешением 100 пс. Красные линии – границы 3σ .

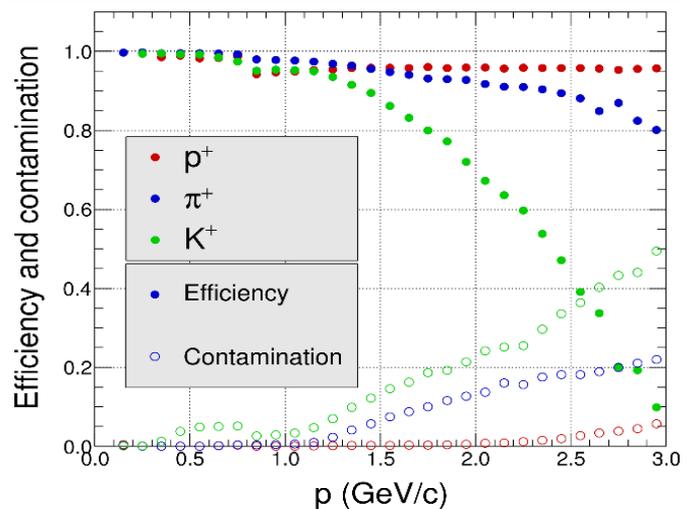


Рис. 22. Эффективность и процент примесей при сепарации адронов комбинированно по времени пролета и ионизационным потерям dE/dx .

Пятая глава посвящена созданию инфраструктуры для исследования резистивных плоских камер с использованием естественного ионизирующего излучения (космических частиц) и пучков ускоренных частиц Нуклотрона, а также инфраструктуры массового производства детекторов для времяпролетной системы многоцелевого детектора.

Самыми распространенными способами тестирования детекторов являются: использование лабораторных радиоактивных источников, испытания на космических частицах и облучение пучками ускоренных частиц. Для всех этих способов необходимо, помимо пучков частиц, создание определенной инфраструктуры. В частности, для испытания МРПК нужны: система газоснабжения, система высоковольтного и низковольтного питания, система генерации триггерного сигнала, система медленного контроля и, наконец, система сбора данных.

Для исследования многозачерных резистивных плоских камер для эксперимента MPD было создано три экспериментальные установки. Первая установка (см. рисунок 23) предназначена для исследования прототипов детекторов на космических частицах. Для крепления исследуемых и триггерных детекторов используется опорная рама из алюминиевого профиля. Четырехканальная газовая система позволяет продувать детекторы с высокой точностью соотношения компонентов газовой смеси. Установка включает в себя: систему триггера на основе сцинтилляционных детекторов различных размеров, высоковольтные и низковольтные источники питания и систему медленного контроля. Для сбора данных используется система в стандарте VME и цифровой осциллограф с полосой пропускания до 4 ГГц с возможностью записи форм импульсов и гистограммирования.

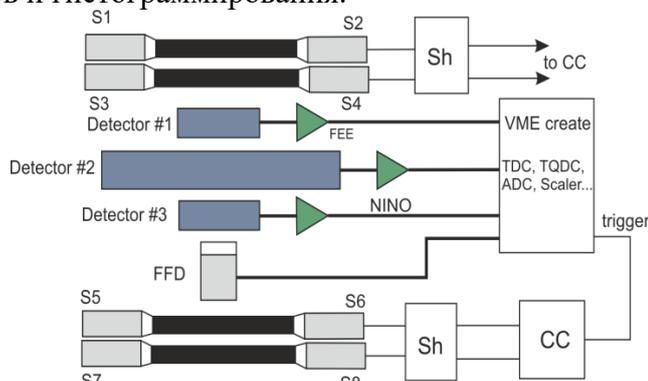


Рис. 23 – Схема испытания детекторов на космике.

Такая установка позволяет исследовать большинство характеристик детекторов с высокой точностью. Основными недостатками испытаний детекторов при облучении космическими частицами являются маленькая скорость набора данных, связанная с низкой интенсивностью регистрируемого излучения. Такие условия приемлемы для предварительных испытаний прототипов МРПК. Для более качественного исследования детекторов необходимо их облучение на пучках частиц из ускорителя. Тестирование детекторов на ускорителе имеет множество преимуществ над испытаниями на космических частицах. Прежде всего, пучки частиц имеют фиксированные параметры, такие как энергия, интенсивность, длительность облучения, которые можно изменить в любой момент. Это позволяет за короткий срок провести серию испытаний различных характеристик. С другой стороны, изучение характеристик детекторов на пучке является не простой задачей, в связи с радиационным фоном и большим потоком данных. На такой установке должны быть максимально использованы возможности дистанционного управления и мониторинга.

Специально для тестирования детекторов для эксперимента MPD в лаборатории физики высоких энергий на выведенном пучке 4В Нуклотрона была создана и введена в эксплуатацию новая экспериментальная установка «Тестовый канал MPD». На Нуклотроне есть возможность выводить пучки частиц от протонов до ядер ксенона с энергией от 0,5 до 6 ГэВ/н. Протоны и дейтроны в таком диапазоне энергий являются минимально ионизирующими частицами. Интенсивность пучка в районе установки варьируется в пределах $10^2 - 10^6$ частиц на квадратный сантиметр. Длительность сброса от 0,5 до 10 секунд. Такие параметры выведенных пучков позволяют эффективно исследовать все параметры детекторов.



Рис. 24 – Общий вид установки «Тестовый канал MPD» на пучке во время 51 сеанса Нуклотрона.

Экспериментальная установка «Тестовый канал MPD» состоит из двух основных зон: зона облучения детекторов и зона расположения персонала. Последняя отделена от пучковой зоны биологической защитой в виде бетонных стен толщиной 1 м. Все детекторы и оборудование в зоне облучения располагаются внутри изолированного помещения, внутри которого поддерживается постоянная температура, и металлические стенки которого частично экранируют установку от внешних наводок.

В пучковой зоне (см. рисунок 24) устанавливается оборудование, большая часть которого во время эксперимента управляется дистанционно. Две платформы из алюминиевого профиля с направляющими используются для фиксации и выравнивания детекторов на пучке. Три сцинтилляционных счетчика размерами 10×10 см² используются для выработки триггерного сигнала, а также являются мониторами интенсивности пучка (см. рисунок 25). Для определения профиля пучка (см. рисунок 26) и определения трека частицы используются три многопроволочные пропорциональные камеры (МППК) с координатным разрешением < 1 мм. Для временных измерений в качестве стартового детектора используется быстрый черенковский детектор на основе микроканального ФЭУ с собственным временным разрешением ~ 40 пс.

Информация со всех детекторов считывается в 72-канальные время-цифровые преобразователи в стандарте VME. Накопленные данные сохраняются в файловом хранилище и в любой момент могут быть использованы для дальнейшей обработки. Большая часть систем и датчиков установки управляется и контролируется дистанционно через централизованную систему медленного контроля на основе программного пакета TANGO.

Газовая система установки разделена на два независимых контура. Первый контур предназначен для смешивания инертных газов, которые используются в пропорциональных камерах. Во втором контуре готовится смесь на основе фреонов, необходимая для работы резистивных плоскопараллельных камер МРПК.

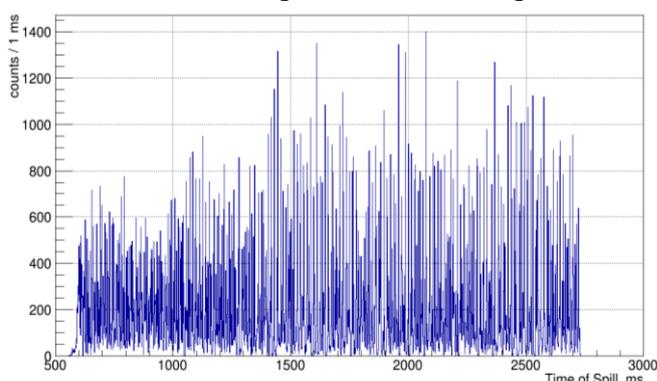


Рис. 25 – Изменение интенсивности пучка дейтронов за время облучения детекторов.

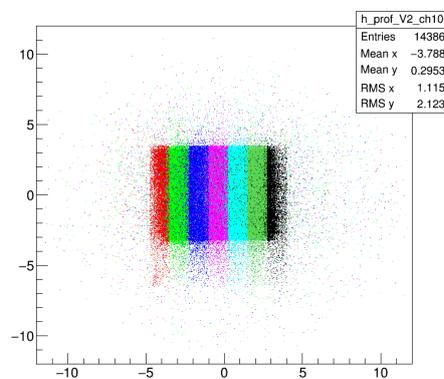


Рис. 26 – Профили стрипов МРПК, полученные при помощи МППК.

В конце пятой главы описывается созданный в рамках данной работы участок массового производства детекторов. Массовое производство включает в себя весь цикл производства детекторов от подготовки материалов и компонентов для сборки МРПК до финального тестирования времяпролетного модуля. Помимо описания участка производства, в тексте диссертации приводится подробная процедура сборки МРПК для времяпролетной системы многоцелевого детектора MPD со всеми этапами тестирования собираемых детекторов.

В заключении формулируются основные результаты работы:

1. В процессе разработки детекторов для времяпролетной системы многоцелевого детектора MPD было изучено влияние конструктивных особенностей многоззорной резистивной плоской камеры на форму и характеристики выходного дифференциального сигнала.
2. На основе этого исследования была предложена оригинальная трехстековая симметричная МРПК, конструкция которой минимально влияет на искажение первичного сигнала и улучшает рабочие свойства детектора.
3. Впервые на выведенных пучках Нуклотрона была создана специализированная установка для тестирования детекторов «Тестовый канал MPD». Установка позволяет исследовать рабочие характеристики детекторов частиц с высокой точностью и в короткие сроки.
4. Использование новой конструкции 15-ззорного детектора позволило впервые получить временного разрешения лучше 40 пс.
5. Впервые были проведены исследования загрузочных характеристик МРПК методом уменьшения толщины резистивных электродов, а также, с использованием специального полупроводникового стекла. Было замечено улучшение загрузочных характеристик с уменьшением толщины стекла. Детектор со стеклом толщиной 280 мкм работает с эффективностью выше 90% при загрузках до 2 кГц/см². Детекторы на основе полупроводникового стекла эффективно работают до загрузок $5 \cdot 10^4$ частиц/см².
6. Основная цель данной работы состояла в создании надежной и эффективной системы идентификации частиц по времени пролета для многоцелевого детектора MPD. Такая времяпролетная система была разработана. Конструктивные особенности системы продуманы так, что ее сборка, установка и обслуживание удобны и просты при высокой надежности всех элементов. Компьютерное моделирование системы показало высокую эффективность как регистрации частиц, так и их идентификации.
7. Благодаря успешным испытаниям прототипов МРПК и завершению работ по проектированию времяпролетной системы TOF MPD, было принято решение организовать массовое производство детекторов базе ЛФВЭ. При создании участка массового производства было предусмотрено создание всех необходимых помещений, устройств и инструментов для подготовки материалов, изготовления детекторов, проверки их технических характеристик и сборки модулей для времяпролетной системы.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. Kh.U. Abraamyan, (...), V.A. Babkin, et al., The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **A628**(1) (2011), p. 99.
2. V.A. Babkin, S.V. Volgin, V.A. Voskobochnik, V.M. Golovatyuk, and S.P. Lobastov, Time-of-Flight System for the MultiPurpose Detector (MPD) // Bulletin of the RAS: Physics, **75**(9) (2011), p. 1277.
3. WeiPing Zhu, (...), V. Babkin, V. Golovatyuk, M. Rumiantcev, A real-size MRPC developed for CBM-TOF // Science China Technological Sciences, **56**(11) (2013), p. 2821.
4. W. Zhu, (...), V. Babkin, et al., Study on the rate capability of MRPCs assembled with thin glass // 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC), Seoul, 2013, 6829460.
5. Zhu Weiping, (...), V. Babkin, et al., A thin float glass MRPC for the outer region of CBM-TOF wall // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **A735** (2014), p. 277.
6. V.A. Babkin, et al., Strip MRPC for the MPD/NICA Time-of-Flight System // Proceedings of TIPP-2014, PoS(TIPP2014)289.
7. V. Babkin, et al., Fast detectors for the MPD/NICA time-of-flight system // Bulgarian Chemical Communications, **47**(Special Issue-B) (2015), p. 215.
8. V.I. Yurevich, (...), V.A. Babkin, et al., Beam Tests of Cherenkov Detector Modules with Picosecond Time Resolution for Start and L0 Trigger Detectors of MPD and BM@N Experiments // Phys. Part. Nuclei Lett. **12** (2015), p. 778.
9. V. Babkin, et al., Triple-stack Multigap Resistive Plate Chamber with Strip Readout // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **A824** (2016) p. 490.
10. V.A. Babkin, et al., Development of the MRPC for the TOF system of the MultiPurpose Detector // J. Instrum **11** (2016) C06007.
11. V.A. Babkin, et al., Status of the front-end electronics for the time-of-flight measurements at the MPD experiment // Phys. Part. Nuclei Lett., **13**(5) (2016), p. 532.
12. D. Dabrowski, (...), V. Babkin, et al., Gas System for MPD Time-of-Flight Detector // Acta Physica Polonica B (Proceedings Supplement), **9**(2) (2016), p.203.
13. V.A. Babkin, et al., The MPD test beam setup for testing detectors with the Nuclotron beams // Instrum. Exp. Tech. **60**(3) (2017), p. 307.
14. A.V. Dmitriev, (...) V.A. Babkin, et al., Control and readout electronics of the time-of-flight system of the MPD // CEUR Workshop Proceedings, **2023** (2017), p.129.
15. Babkin, V.A. et al., Time-of-Flight particles identification in the MultiPurpose Detector at NICA // PoS(EPS-HEP2019)209.