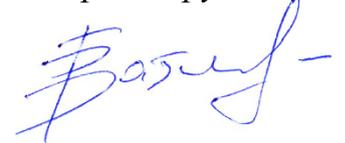


ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
ИМ. В.И.ВЕКСЛЕРА И А.М. БАЛДИНА

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

- Научный руководитель** – **Головатюк Вячеслав Михайлович**,
кандидат физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория физики высоких энергий, Научно-
экспериментальный отдел Многоцелевого детектора,
начальник отдела
- Официальные оппоненты** – **Пантуев Владислав Сергеевич**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт ядерных исследований
Российской академии наук, Отдел экспериментальной
физики, ведущий научный сотрудник
- Гуров Юрий Борисович**,
доктор физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория ядерных проблем, Научно-
экспериментальный отдел ядерной спектроскопии и
радиохимии, начальник сектора

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

Актуальность темы

С 2007 года в ОИЯИ начата программа изучения свойств барионной материи при высоких плотностях и температурах. 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 коллайдере должен стать Многоцелевой детектор (MPD – MultiPurpose Detector).

Диссертация посвящена разработке быстрых детекторов, предназначенных для идентификации частиц по времени пролета в Многоцелевом детекторе на коллайдере NICA, исследованию их характеристик и оптимизации конструкции выбранных детекторов для использования их в составе времяпролетной системы. Диссертация основывается на результатах работ, выполненных автором в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в период с 2009 по 2020 год.

Результаты диссертационной работы будут использованы для создания Многоцелевого детектора с помощью которого будут изучаться свойства экстремально горячей и плотной ядерной материи, что в настоящее время является одной из актуальных задач в физике высоких энергий. Интерес к данной тематике также подтверждается тем, что сразу несколько больших мировых научных центра занимаются созданием подобных установок.

Необходимость создания детектирующей системы современного уровня, удовлетворяющей требованиям эксперимента MPD, является сложной методической задачей. Для создания времяпролетной системы используется многозаярная резистивная плоская камера (МРПК). Актуальность исследований данного типа детекторов на настоящее время подтверждается регулярным проведением специальных научно-методических конференций с публикацией большого числа статей. Особый интерес вызывает методика повышения эффективности работы МРПК с увеличением интенсивности потока проходящих через нее частиц.

Целью диссертационной работы является создание времяпролетной системы идентификации частиц на базе МРПК для эксперимента MPD ускорительного комплекса NICA.

Для осуществления данной цели были решены следующие задачи:

- разработка, исследование рабочих характеристик и оптимизация многозаярной резистивной плоскопараллельной камеры, удовлетворяющей требованиям времяпролетной системы Многоцелевого детектора;
- проектирование эффективной времяпролетной системы идентификации частиц Многоцелевого детектора, на основе разработанной МРПК;
- создание исследовательской инфраструктуры, позволяющей детально изучать характеристики разрабатываемых детекторов.

Научная значимость диссертационной работы

Эксперимент MPD создается для решения физических задач, связанных с изучением свойств сверхплотной барионной материи. Ответы на них имеют большое значение в понимании многих фундаментальных проблем современной физики. Особый интерес вызывают: поиск признаков фазового перехода между адронной материей и кварк-глюонной плазмой (КГП); поиск новых, ранее не наблюдавшихся форм барионной материи; лучшее понимание связанности кварков в нуклонах и эволюция Вселенной (в частности, поиск причины отсутствия в ней антивещества) и изучение основных свойств сильного взаимодействия и КГП-симметрии. Для решения таких амбициозных научных задач создается экспериментальная установка MPD на ускорительном комплексе NICA. Помимо фундаментальной значимости, данная работа имеет большое методическое значение, так как в процессе разработки элементов и подсистем времяпролетной системы были получены результаты, которые будут использованы при создании новых детектирующих устройств.

Новизна диссертационной работы проявляется в следующем:

1. Впервые было получено рекордное временное разрешение 40 пс (включая разрешение считывающей электроники) при эффективности регистрации 99% для МРПК, разработанной в рамках диссертационной работы.
2. Впервые была исследована зависимость эффективности и временного разрешения МРПК, изготовленных из стекла различной толщины, от интенсивности потока проходящих через нее частиц.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка 15-зазорной трехсекционной МРПК активной площадью $\sim 0.2 \text{ м}^2$ с симметричным стриповым дифференциальным считыванием сигналов для использования во времяпролетной системе MPD.
2. Методика улучшения загрузочных способностей МРПК при использовании для его сборки низкорезистивного и тонкого стекла.
3. Методика исследования эффектов прохождения высокочастотного импульса по стриповым считывающим электродам и на границах стрип-кабель-усилитель, которая привела к изменению принципа считывания сигнала с МРПК и улучшила временные характеристики создаваемого детектора.
4. Результаты моделирования в MPDRoot разработанной конструкции времяпролетной системы TOF MPD.
5. Создание методической инфраструктуры для исследования и массового производства детекторов.

Научно-практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработанная новая конструкция трехсекционной МРПК с симметричным стриповым считыванием, которая будет использоваться во времяпролетной системе Многоцелевого детектора, может быть применена для создания или усовершенствования других времяпролетных систем экспериментов с разрешениями лучше 100 пс.
2. Характеристики МРПК из термополированного стекла разной толщины, полученные в зависимости от интенсивности потока частиц, демонстрируют возможность использования такого материала для создания детекторов, работающих при повышенных интенсивностях частиц. Методика улучшения загрузочных характеристик МРПК при помощи низкорезистивного стекла (удельное сопротивление $< 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$) может использоваться как для торцевых частей времяпролетных систем экспериментов на встречных пучках, так и с фиксированной мишенью, в которых ожидаются большие потоки частиц.
3. Созданная новая экспериментальная установка «Тестовый канал MPD», представляет широкие возможности для тестирования различных типов детекторов, которыми будут комплектоваться разрабатываемые и будущие установки на комплексе NICA.

Достоверность результатов данной работы подтверждается тем, что выводы работы основаны на экспериментальных данных, которые хорошо согласуются с проведенными расчетами и результатами других исследований. Кроме того, достоверность подтверждается повторяемостью полученных результатов в процессе массового производства и тестирования.

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).

Результаты работы неоднократно представлялись на общелабораторных и методических семинарах ЛФВЭ. По материалам диссертации опубликовано 15 работ в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. 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 цитируемой литературы из 102 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** представлены цели данной работы, ее актуальность и новизна. Приводится историческая справка о развитии методики времяпролетных измерений и краткий обзор некоторых экспериментов, использующих данную методику. Далее перечислены основные результаты диссертационной работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной. В ней приводятся: цели эксперимента MPD, основные физические задачи и требования к установке, выполнение которых необходимо для решения этих задач. При описании структуры экспериментальной установки особое внимание уделяется времяпролетной системе. Перечислены технические требования, предъявляемые к ней для успешного выполнения физических задач эксперимента MPD.

В этой же главе кратко описан состав и параметры ускорительного комплекса тяжелых ионов NICA и основных экспериментов на нем. В состав ускорительного комплекса NICA входят: линейный ускоритель, который инжектирует ионы с энергиями 3 МэВ/нуклон в бустер – промежуточный ускоритель на энергию до 600 МэВ/нуклон, из которого пучок инжектируется в Нуклотрон – существующий ускоритель, где 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 связаны, в первую очередь, 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: установление вида уравнения состояния сильно взаимодействующей адронной материи при высоких плотностях, восстановление киральной симметрии, определение типа фазового перехода в состояние деконфайнмента, свойства кварк-адронной фазы и наличие (или отсутствие) критической точки на фазовой диаграмме. Помимо этих фундаментальных проблем, планируемые 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 умеренной температурой, но высокой плотностью очень велик. Это подтверждается и тем, что сразу несколько ускорительных комплексов в крупнейших исследовательских центрах мира, в числе которых ускорительный комплекс FAIR в GSI (Германия), ускоритель RHIC (где уменьшается энергия для достижения необходимых параметров) в BNL (США) и обновленный эксперимент NA61/SHINE на ускорителе SPS в (ЦЕРН), планируют проводить исследования в данной области.

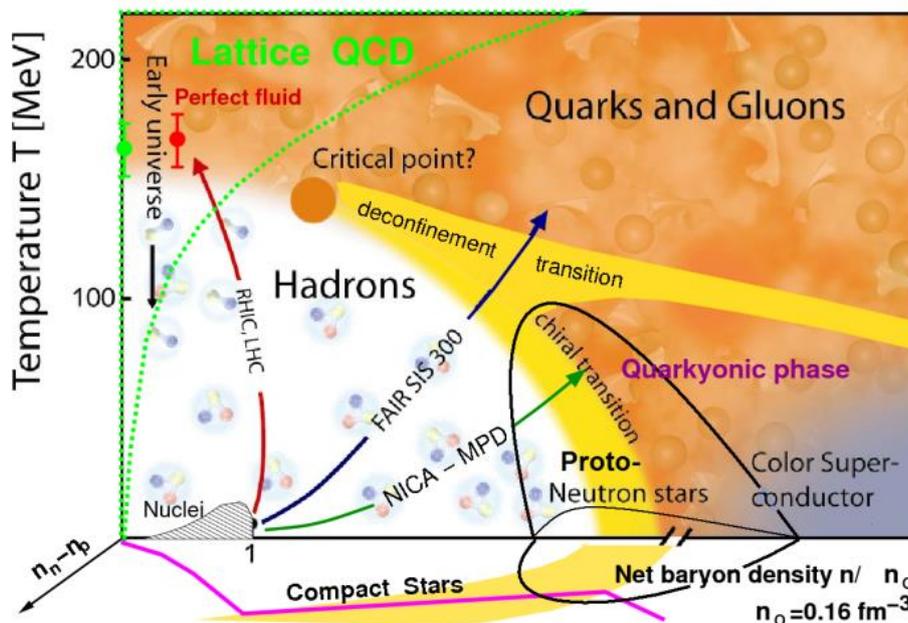


Рисунок 1 – Фазовая диаграмма сильно взаимодействующей адронной материи

Относительно широкий диапазон энергий столкновения ($\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ ГэВ) и разнообразие сталкивающихся ядер ускорительного комплекса NICA позволяет просканировать достаточно большую область фазовой диаграммы. В свою очередь, рекордная светимость коллайдера при ускорении ионов ($L = 10^{27} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$) позволяет набрать высокую статистику даже для очень редких процессов. Помимо ускорения тяжелых ионов, на коллайдере предусмотрена возможность ускорения поляризованных протонов и дейтронов, что значительно расширяет спектр возможных исследований.

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 флуктуациях (от события к событию) множественности, поперечного импульса, отношения числа 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 описанных выше задач, ускорительный комплекс NICA предоставляет возможность проводить и другие фундаментальные и прикладные исследования.

Для решения таких задач, сложных и требующих высокой точности измерения, 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 осевом сечении, с указанием основных размеров). 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 эффективную систему идентификации частиц, основанную на времяпролетных измерениях и калориметрии. Детектор сконструирован в виде цилиндра с торцевыми частями. Детекторные системы располагаются в нем слоями вокруг области столкновения пучков таким образом, что перекрывают область вылета частиц в диапазоне псевдобыстрот $|\eta| \leq 2$.

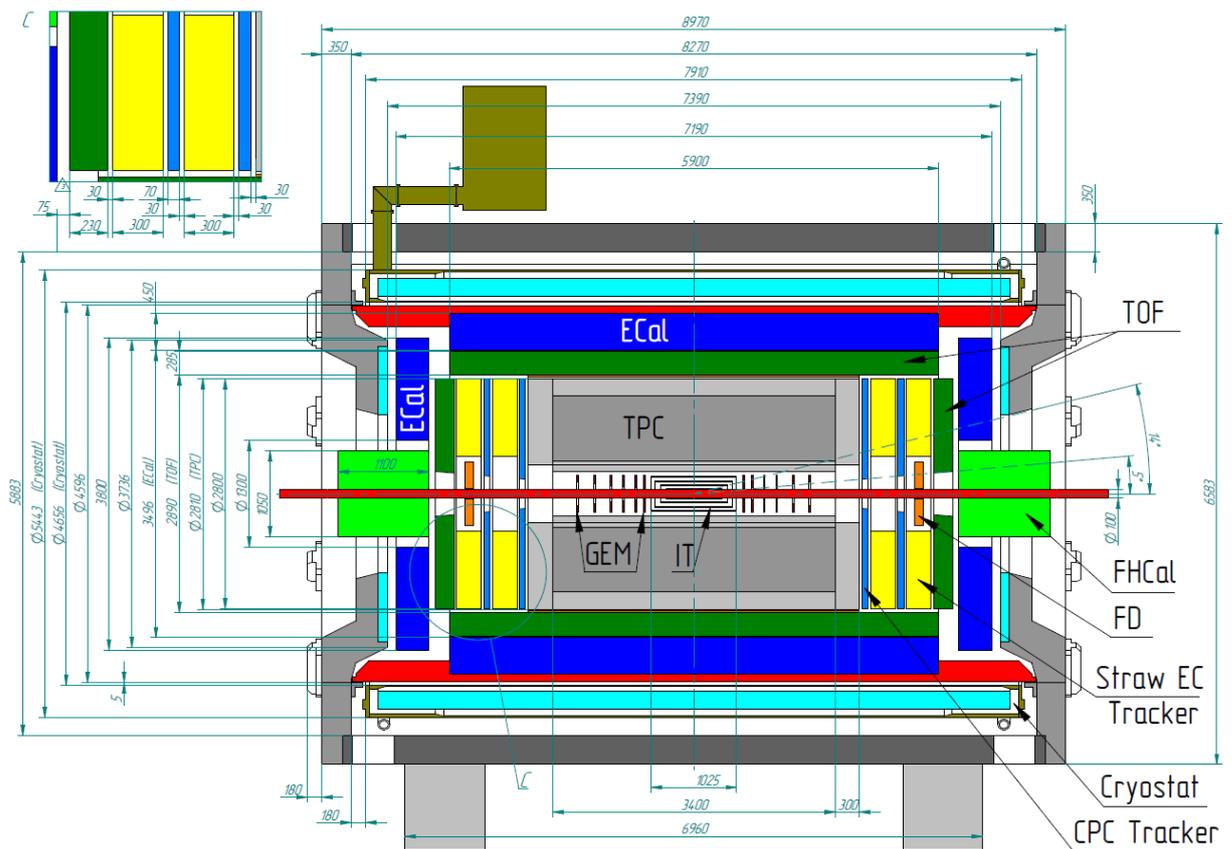


Рисунок 2 – Структура Многоцелевого детектора с основными размерами

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* состоящая из: внутреннего трекера (IT), время-проекционной камеры (TPC) и системы координатных детекторов торцевого трекера (ECT и CPC).
4. *Система триггера* содержит: быстрый передний детектор (FFD), формирующий стартовый сигнал для времяпролетной системы, и передний адронный калориметр (FHCAL).

Исходя из ожидаемого состава и спектров вторичных частиц, можно сформулировать необходимые требования к времяпролетной системе:

- временное разрешение (с учетом разрешения электроники и стартового детектора) лучше 100 пс (для разделения π/K с поперечными импульсами до $p_t < 1.5$ ГэВ/c);
- 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 координатами точки регистрации 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.
- Детекторы, из которых будет собрана времяпролетная система с большой площадью регистрации частиц, должны быть достаточно недорогими и простыми;

Принцип идентификации частиц по времени пролета следует из релятивистского инварианта энергии-импульса. Зная импульс частицы p , и время t , за которое она пролетела расстояние L , можно определить ее массу $m^2 = \frac{p^2}{c^2} \left[\frac{t^2 c^2}{L^2} - 1 \right]$, а соответственно, и тип. Времяпролетные измерения в ядерной и атомной физике начали применяться довольно давно. Изначально

методика использовалась, в основном, 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 100 пс. Разработанный Ю.Н. Пестовым в 70-е годы искровой плоскопараллельный газонаполненный детектор позволял получать временное разрешение до 25 пс, но был крайне сложен в эксплуатации и использовал довольно дорогую на то время быструю электронику. С появлением в 90х годах резистивной плоскопараллельной камеры (РПК), произошла революция во времяпролетных измерениях. Новый 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 характеристиками счетчика 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, а затем формулируются основные теоретические принципы ее работы. В главе рассматривается процесс формирования и распространения сигнала в МРПК по дифференциальной линии стрип-кабель-усилитель.

Принципиально, резистивная плоская камера представляет собой один или несколько параллельных заполненных газовой смесью промежутков определенной ширины, которая задается прокладками-спейсерами из изоляционного материала. Газовые промежутки разделяются плоскими резистивными электродами с объемным сопротивлением в диапазоне 10^{10} – 10^{13} Ом·см. Для создания внутри газового промежутка сильного электростатического поля, на внешние поверхности стекол (в многоззорном случае только на крайние в секции стекла), 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 электроды 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 улучшается без потери эффективности. Детектор, содержащий большое количество газовых зазоров, называют многоззорной РПК. Большое число зазоров обычно разделяют на несколько секций (или стеков), на каждый из которых высокое напряжение подается отдельно. Это делается, в первую очередь, для уменьшения разности потенциалов, необходимой для создания рабочего электростатического поля в газовых зазорах. Помимо этого, разделение детектора на секции необходимо для лучшего согласования импеданса линии считывающих электродов с линией кабеля, передающего сигналы на вход усилителя.

Работа РПК базируется на тех же принципах, на которых работают большинство газонаполненных детекторов. Заряженная 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. Рост числа электронов в лавине в данном случае, благодаря эффекту объемного заряда, ограничивается собственным электростатическим полем лавины, и поэтому, данный режим называется насыщенным лавинным режимом. Движение

электронов лавины индуцирует сигнал на внешних считывающих электродах, который распространяется по считывающему электроду и поступает на вход усилителя. Насыщенный лавинный режим является основным режимом работы МРПК для временных измерений.

Несмотря на довольно простой принцип действия, временные характеристики и эффективная работа детектора зависят от множества параметров, которые можно оценить аналитически. В связи с тем, что собственное временное разрешение МРПК, 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, приложенного напряжения и давления рабочего газа), ширина газового зазора, число зазоров и форма считывающих электродов. Меняя эти параметры, можно аналитически оценить предел собственного временного разрешения МРПК.

Очевидно, что характеристики детектора зависят не только от статистики газового разряда, но и от процедуры считывания наведенного сигнала. От размеров и формы считывающих электродов зависит волновое сопротивление линии считывания, которое влияет как на форму, так и на амплитуду наведенного сигнала. Наконец, на характеристики детектора влияет считывающая электроника. Проблема распространения сигналов по линии считывания была детально изучена, и в результате были выявлены технические проблемы МРПК со стриповым считыванием, такие, как дисперсия сигнала и появление отражений на концах считывающих 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 исследованных прототипов детекторов: эффективность, временное и координатное разрешение, загрузочные способности. Приводятся результаты тестирования детекторов на пучке дейтронов Нуклотрона, и анализируются полученные результаты.

В первой версии MPD была предложена конструкция времяпролетной системы, по структуре сходная с системой ToF спектрометра ALICE. Модули времяпролетной системы планировалось составить из длинных прямоугольных МРПК с падовым считыванием. Для исследования рабочих характеристик предложенного детектора, был собран первый прототип (см. рисунок 4), который представляет собой укороченную версию полномасштабного детектора (150 x 75 мм²). Данная МРПК состояла из двух секций по 5 газовых промежутков шириной 230 мкм, разделенных стеклянными резистивными электродами толщиной 550 мкм. Дифференциальные сигналы считываются (с изготовленных на печатной плате прямоугольных электродов размерами 35 x 16 мм²) при помощи усилителя-дискриминатора на базе микросхемы NINO. На таком прототипе МРПК наилучшее временное разрешение составило 60 пс при эффективности регистрации выше 98% (см. рисунок 5).



Рисунок 4 – МРПК с падовым считыванием в газовом боксе с усилителями

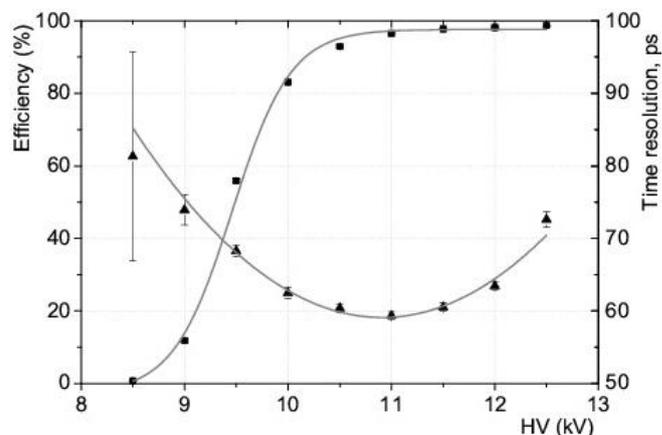


Рисунок 5 – Эффективность и временное разрешение прототипа МРПК с падовым считыванием в зависимости от напряжения

Для конфигурации времяпролетной системы с падовым считыванием было проведено компьютерное моделирование процессов, происходящих при столкновении ионов золота при энергиях коллайдера NICA. Моделирование показало, что максимальная множественность вторичных частиц, проходящих через времяпролетную систему, не превышает 0.002 частицы/см², что соответствует, в среднем, около 1% загрузки одного канала считывания. При этом, количество каналов электроники (только для цилиндрической части TOF) составляет 31680. 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 отметки, можно с достаточно высокой точностью определять и продольную (вдоль стрипа) координату пересечения стрипа частицей. Первый прототип МРПК со стриповым считыванием (см. рисунок 6) был собран в той же конфигурации, что и падовый 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. Размер активной области камеры составлял 600×300 мм². 24 считывающих электрода в виде полосок длиной 600 мм и шириной 10 мм располагались на печатных платах внутри и снаружи двух секций МРПК. Сигналы с обоих концов стрипа посредством плоского кабеля поступали на вход усилителя-дискриминатора и регистрировались время-цифровым преобразователем.

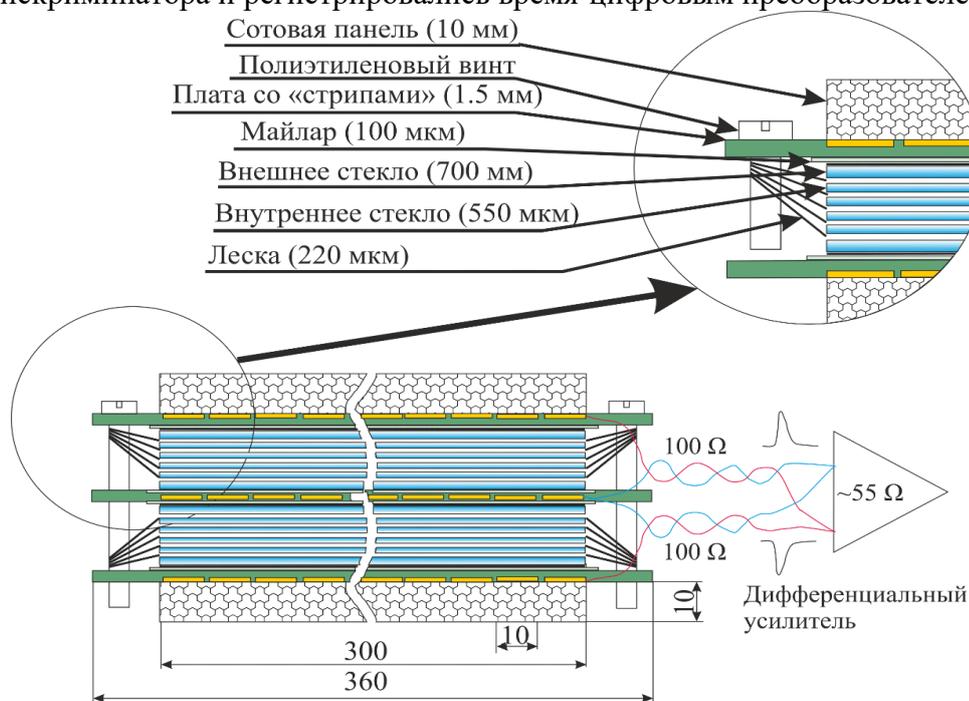


Рисунок 6 – Схема устройства двухстековой МРПК со стриповым считыванием.

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 зависимости временной отметки от длительности импульса (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.

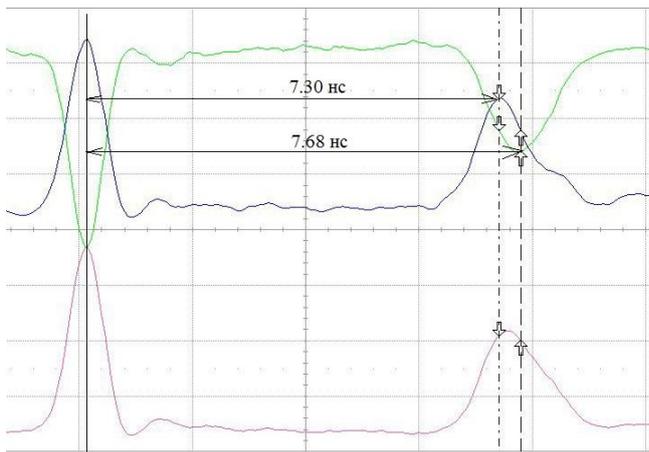


Рисунок 7 – Отражение дифференциального сигнала, прошедшего через анодный и катодный стрипы двухсекционной МРПК. Сигнал на внешних электродах распространяется быстрее, чем на внутренних.

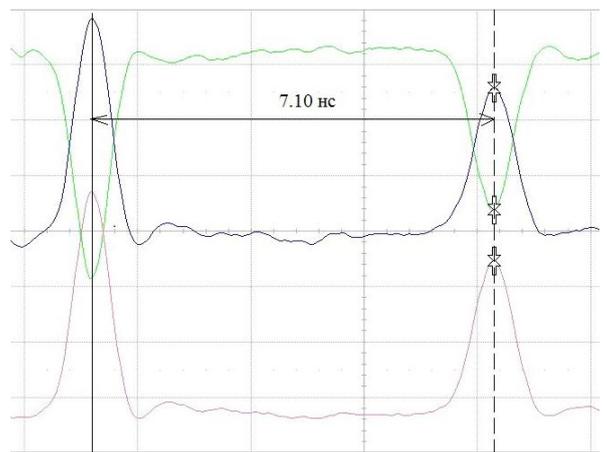


Рисунок 8 – Отражение дифференциального сигнала, прошедшего через анодный и катодный стрипы одной секции двухсекционной МРПК с спейсером из сотовой панели. Оба плеча сигнала распространяются с одинаковой скоростью.

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

Проблема эффективности была решена добавлением второй идентичной секции к уже существующему, отделенному от него прокладкой в виде сотовой панели толщиной 5 мм. Можно сказать, что сигнал считывался с двух независимых односекционных МРПК. Благодаря прокладке из сотовой панели, среда вокруг электродов стала однородной и скорости сигналов, распространяющихся по внешним и внутренним электродам, выровнялись. Характеристики такого двухсекционного детектора оказались лучше, чем у односекционной МРПК. Его временное разрешение составило 65 пс при эффективности выше 99%.

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 был хорошо согласован с импедансом считывающего кабеля;
- анодный и катодный считывающие электроды должны находиться в одинаковой диэлектрической среде для исключения дисперсии сигнала из-за различия скорости его распространения (т.е. конструкция должна быть симметричной);

Исходя из этого, была предложена новая трехсекционная конструкция МРПК (см. рисунок 9), удовлетворяющая всем приведенным выше выводам. Прототип МРПК с габаритными размерами 600x300 мм² состоял из трех секций по 5 газовых зазоров шириной 200 мкм в каждой. Впервые в качестве плавающих резистивных электродов были использованы термополированные стекла толщиной 280 мкм. Считывание сигналов производилось с 24 полосковых электрода (стрипа) шириной 10 мм, которые располагались 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 дисперсии биполярного сигнала не наблюдается (см. рисунок 10) и отражение от концов линии стрипов минимально.

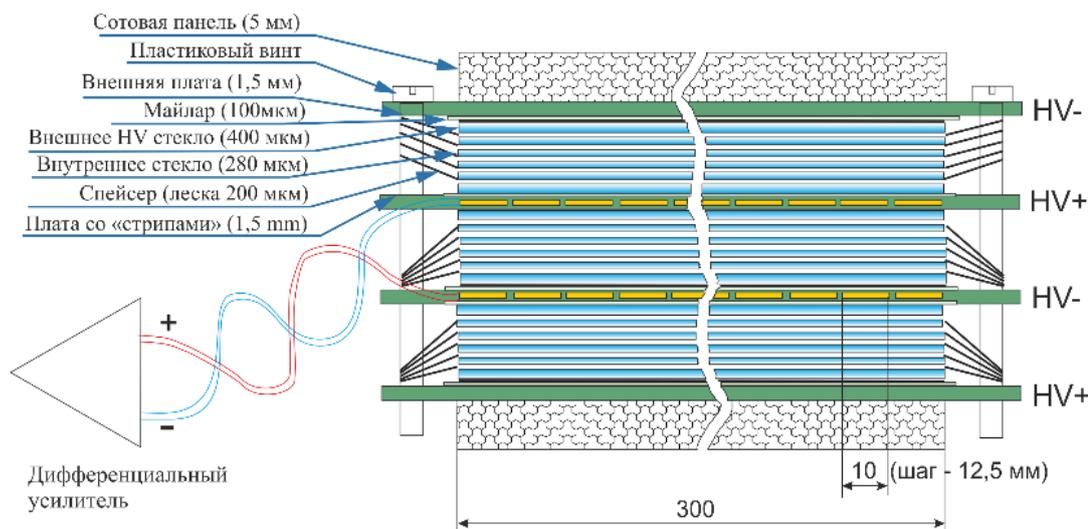


Рисунок 9 – Схема устройства трехсекционной МРПК

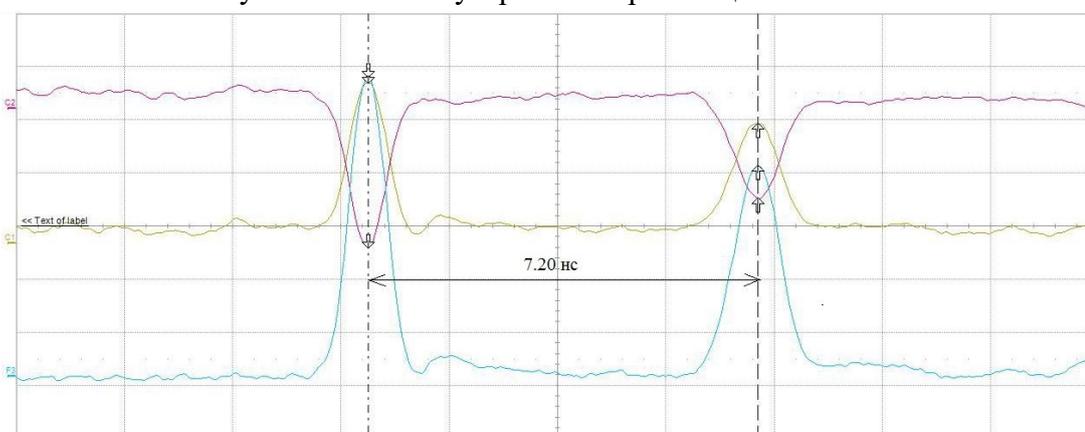


Рисунок 10 – Отражение дифференциального сигнала, прошедшего через анодный и катодный стрипы трехсекционной МРПК

Данный прототип МРПК испытывался на установке «Тестовый канал MPD» на выведенном из Нуклотрона ОИЯИ пучке. Схема эксперимента представлена на рисунке 11. В данном эксперименте использовался стандартный набор детекторов: сцинтилляционные счетчики ($C_1 - C_4$), обеспечивающие формирование триггерного сигнала, многопроводные пропорциональные камеры (МППК₁ и МППК₂) для восстановления треков частиц и быстрые стартовые черенковские детекторы (T_{01} и T_{02}) для определения временного разрешения исследуемых детекторов. Исследуемые детекторы (ИД₁₋₃) облучали пучком дейтронов с энергией 2 ГэВ/нуклон, выведенных из Нуклотрона. Дейтроны при такой энергии можно считать минимально ионизирующими частицами. Максимальная интенсивность выводимого на установку пучка составляла 10^4 - 10^5 частиц/с. Длительность импульса выводимого пучка варьировалась от 1.5 до 2.5 с. Пучок частиц намеренно расфокусировался расположенными перед установкой квадрупольными линзами для облучения большей площади детекторов и обеспечения оптимальной для исследования МРПК интенсивности – 500 частиц/($см^2 \cdot с$).

Для определения собственного временного разрешения МРПК использовались два стартовых детектора (T_{01} и T_{02}), временное разрешение которых определялось одновременно с исследуемыми МРПК. Для определения временного разрешения строились три распределения времен пролета: между стартовыми детекторами $\Delta t = t_{t0_1} - t_{t0_2}$, и между исследуемой МРПК и каждым стартовым детектором $\Delta t = t_{mrpc} - t_{t0_1}$, $\Delta t = t_{mrpc} - t_{t0_2}$. Распределения аппроксимировались функцией Гаусса, из которой брался параметр дисперсии. Наконец, из системы уравнений, содержащей все параметры дисперсии, вычислялись собственные временные разрешения каждого отдельного детектора.

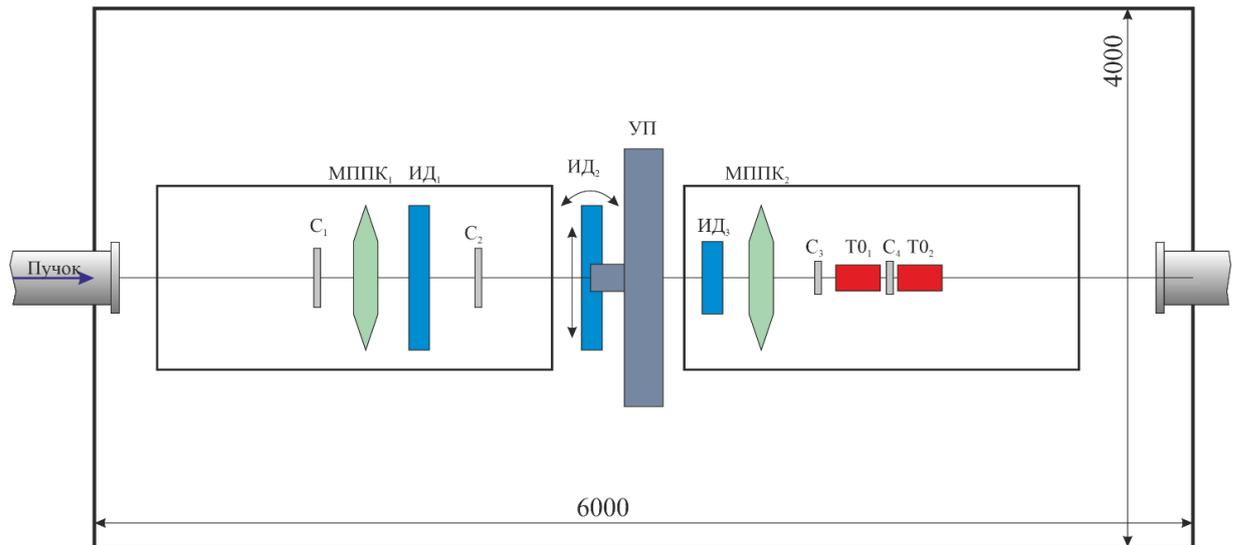


Рисунок 11 – Схема расположения детекторов на установке «Тестовый канал MRPD» (C_1 - C_4 – сцинтилляционные счетчики, МППК $_{1-3}$ – пропорциональные камеры, ИД $_{1-3}$ – исследуемые детекторы, Т $_{0,1,2}$ – стартовые быстрые детекторы, УП – устройство позиционирования)

Пример распределения между МРПК и стартовым счетчиком с временным разрешением, близким к рекордному, представлено на рисунке 12. Вычитая квадратично из параметра дисперсии распределения собственное разрешение стартового счетчика Т $_0$, которое в данном случае составило 48 пс, определяется собственное разрешение МРПК. В данном случае временное разрешение после коррекции времени над порогом составляют $\sqrt{63^2 - 48^2} \cong 41$ пс. На рисунке 13 показана зависимость временного разрешения и эффективности регистрации частиц для исследуемого прототипа при нескольких порогах усилителя-дискриминатора на базе микросхемы NINO. Видно, что с увеличением порога плато эффективности, близкое к 100%, сдвигается к большим напряжениям, но при этом улучшается временное разрешение. Во время эксперимента была возможность перемещать исследуемый детектор для сканирования всей его поверхности пучком частиц и возможность поворачивать детектор относительно пучка в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При таких манипуляциях было показано, что временное разрешение детектора находится в пределах 50 пс по всей его поверхности и не меняется при прохождении частиц через него под углами от 0 до 70°.

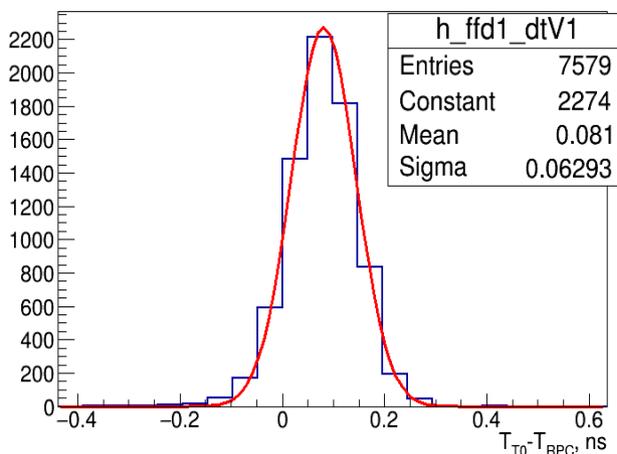


Рисунок 12 – Распределение времени пролета дейтронов с энергией 2 ГэВ/нуклон между исследуемой МРПК и стартовым счетчиком после применения коррекции времени над порогом для высокого напряжения 12 кВ.

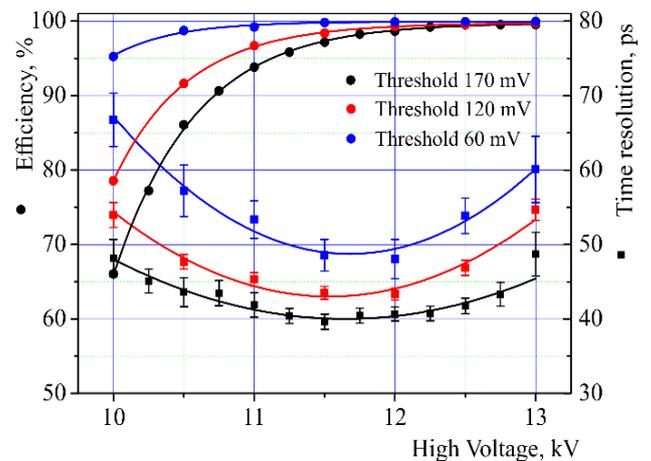


Рисунок 13 – Зависимости эффективности (●) и временного разрешения (■) исследуемой МРПК от подаваемого на нее высокого напряжения при трех разных порогах дискриминации NINO.

Одной из особенностей стриповой МРПК является возможность определения координаты пролета частицы с высокой 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 5 мм. Координата вдоль стрипа определяется по разности времени прихода сигнала на концы стрипа. Координатное разрешение, при этом, зависит от скорости распространения сигнала по стрипу и от временного разрешения детектора. Измерения показали, что оно не превышает 5 мм. Такое значение координатного разрешения представленной МРПК дает возможность с высокой эффективностью согласовывать восстановленные в ТРС треки частиц с их координатами пролета в детекторах времяпролетной системы.

По результатам исследования предложенной трехсекционной многозачерной резистивной плоской камеры с симметричным стриповым считыванием сигналов, данная конструкция МРПК была выбрана в качестве основной для изготовления времяпролетной системы МРД.

Известно, что РПК с резистивными электродами из обычного стекла имеют один существенный недостаток – низкую загрузочную способность (до 1 кГц/см²), 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 нагрузках 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.

В представленной работе 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 нагрузках до 70 кГц/см². При такой нагрузке временное разрешение детектора составляет около 80 пс (см. рисунок 14).

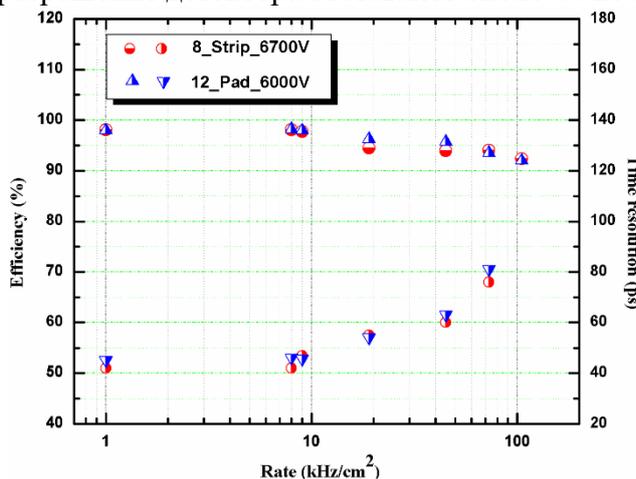


Рисунок 14 – Эффективность и временное разрешение МРПК с низкорезистивным стеклом при различных потоках частиц

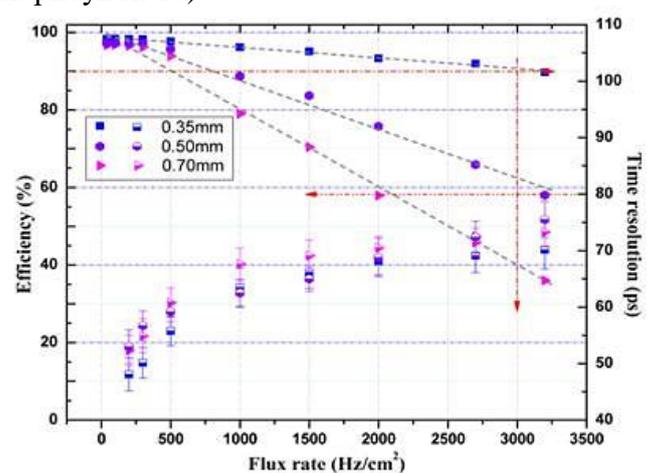


Рисунок 15 – Эффективность и временное разрешение МРПК со стеклами разной толщины в зависимости от потока частиц

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 с удельным сопротивлением $4 \cdot 10^{10}$ Ом·см различной

толщины (350, 500 и 700 мкм). В результате было выяснено, что такой способ незначительно улучшает загрузочные характеристики. 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 MPD при столкновении ядер золота ожидаются потоки частиц через времяпролетную систему не выше 20 Гц/см^2 , полномасштабный прототип МРПК, предложенный в качестве основного элемента времяпролетной системы TOF MPD, все же, был испытан на интенсивном пучке. Сравнивались два детектора идентичной конструкции с отличием только в толщине резистивных электродов (400 и 280 мкм). При этом измеренное удельное сопротивление у стекол толщиной 400 и 280 мкм отличалось и составляло $4.2 \cdot 10^{12}$ и $7.5 \cdot 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, соответственно. Испытания показали, что детектор со стеклом толщиной 280 мкм, имеет лучшую эффективность регистрации и временное разрешение при загрузках до 3 кГц/см^2 , чем детектор с 400-микронным стеклом (см. рисунок 16) даже с учетом различного удельного сопротивления стекол. Видно, что конструкция МРПК, выбранная в качестве элемента времяпролетной системы MPD, работает с эффективностью лучше 90% и временным разрешением не хуже 60 пс при загрузках до 2 кГц/см^2 .

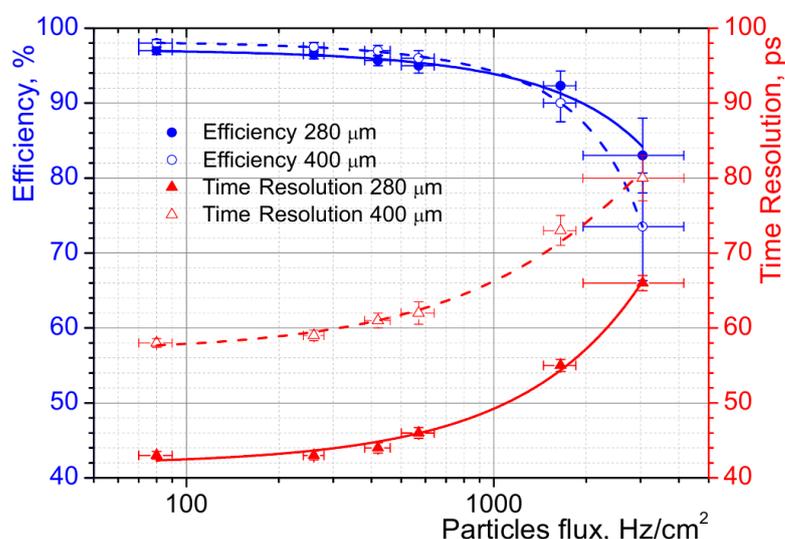


Рисунок 16 – Эффективность и временное разрешение прототипа МРПК для TOF MPD с резистивными электродами толщиной 280 и 400 мкм в зависимости от интенсивности пучка

Четвертая глава описывает технические параметры времяпролетной системы TOF Многоцелевого детектора, разработку сервисных подсистем и компьютерное моделирование 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 максимально достижимом фазовом объеме. Для реализации этой цели необходимо было не только разработать эффективный и быстрый детектор, но и спроектировать оптимальную, для успешной ее интеграции в Многоцелевой детектор, конструкцию всей времяпролетной системы.

Времяпролетная система TOF представляет из себя цилиндр (баррель) (см. рисунок 17), расположенный в ярме соленоидального магнита MPD между время-проекционной камерой (TRC) и электромагнитным калориметром (ECal). Детекторы 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 .

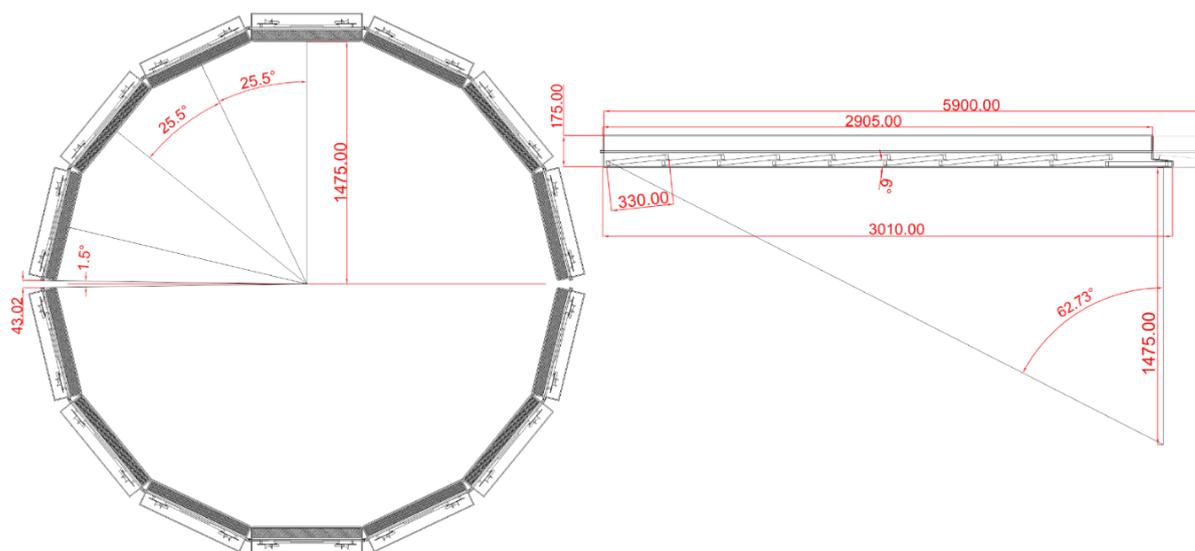


Рисунок 17 – Габаритные размеры времяпролетной системы TOF MPD в плоскости XY

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. Модули разделяются на два объема. В первом, герметичном газовом объеме каждого модуля находится по 10 МПРК, которые расположены под углом 6 градусов к оси пучка 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 яра магнита через отверстия к времяцифровым преобразователям, расположенным в крейтах VME на яре магнита. На внешней крышке модуля предусмотрены каретки, благодаря которым модули легко закатываются внутрь магнита MPD по установленным на силовом каркасе пазам.



Рисунок 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 в установке и отклик детекторов на проходящие через них частицы.

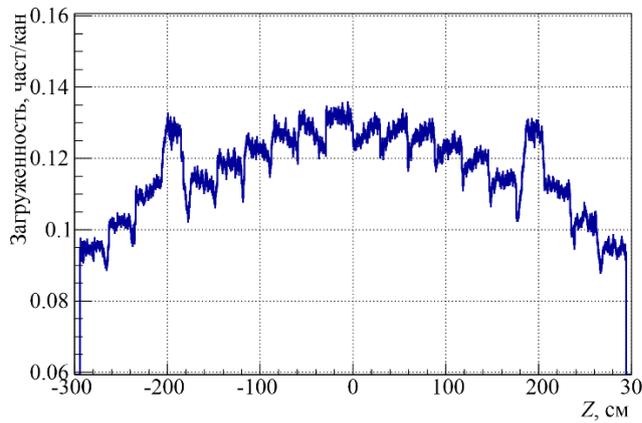


Рисунок 19 – Множественность частиц в области TOF для центральных столкновений Au-Au при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 11$ ГэВ

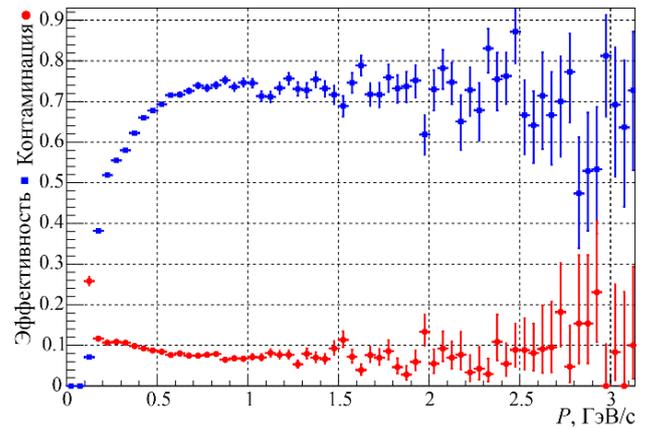


Рисунок 20 – Эффективность согласования хитов TOF и треков частиц в ТРС и примесь неправильных соответствий в зависимости от импульса при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 11$ ГэВ

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 полной энергией 11 ГэВ (в системе центра масс). Видно, что максимальная множественность частиц не превышает 14% на канал детектора, что удовлетворяет требованиям эксперимента. На рисунке 20 представлены эффективность поиска соответствия трека, восстановленного в ТРС, сработавшему каналу в TOF, и примесь неправильно найденных соответствий в зависимости от импульса частиц. Средняя эффективность составляет 60%, так как большинство частиц имеет импульсы меньше 1 ГэВ/с. Средняя примесь неверно сопоставленных треков около 10%.

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 с высокой эффективностью. Для разделения частиц с большими импульсами, необходимо дополнительно использовать для идентификации информацию об ионизационных потерях dE/dx частиц в ТРС (см. рисунок 22). В таком случае эффективность разделения π - и K -мезонов в диапазоне импульсов от 0 до 1.5 ГэВ выше 90% с примесями неправильно идентифицированных частиц не более 10%.

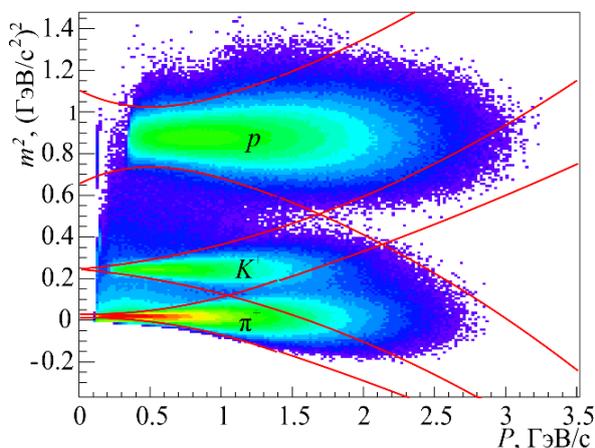


Рисунок 21 – Разделение π -, K - мезонов и протонов системой TOF с разрешением 100 пс (красные линии – границы 3σ)

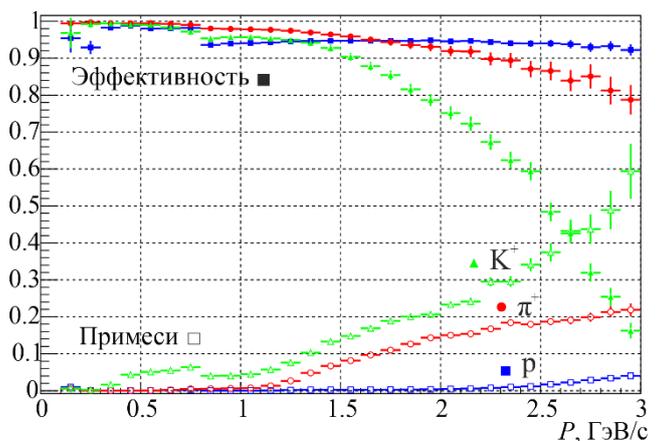


Рисунок 22 – Эффективность идентификации и процент примесей при разделении адронов комбинированно по времени пролета и ионизационным потерям dE/dx

Пятая глава посвящена описанию созданной инфраструктуры для исследования резистивных плоских камер с использованием естественного ионизирующего излучения (космических частиц) и пучков ускоренных частиц Нуклотрона, а также инфраструктуры для 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 наличия самих 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 МРД, были созданы 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 рабочей газовой смесью и обеспечивает высокую точность поддержания требуемого соотношения между компонентами 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.



Рисунок 23 – Установка для испытания прототипов детекторов на космическом излучении

Такая установка позволяет с высокой точностью исследовать большинство характеристик детекторов. Основным недостатком испытаний детекторов при облучении космическими частицами является невысокая скорость набора данных, из-за низкой интенсивности регистрируемого излучения. Но для предварительных испытаний прототипов МРПК это несущественно.

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 контролировать и менять в зависимости от требований эксперимента. 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 ОИЯИ 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 импульса излучения может варьироваться от 0.5 до 10 секунд. Такие параметры выведенных пучков позволяют эффективно исследовать детекторы.

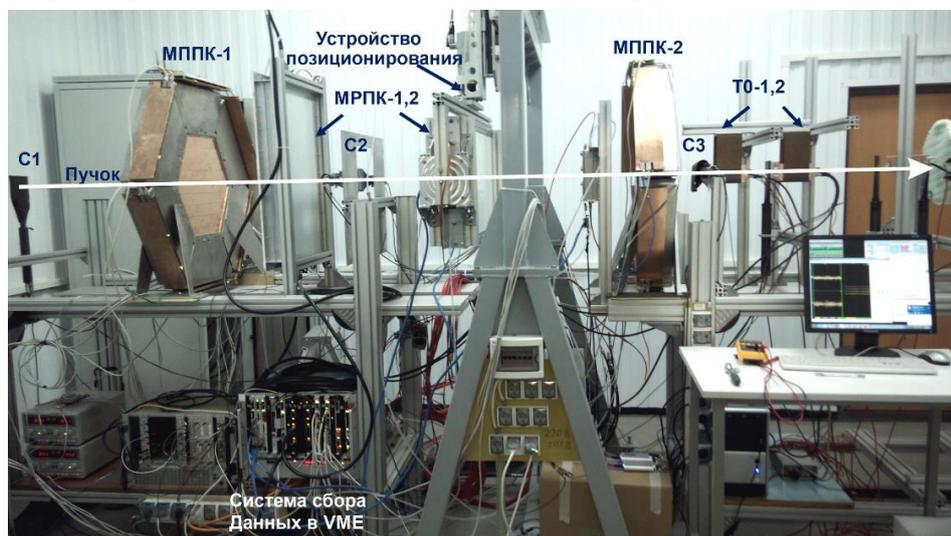


Рисунок 24 – Вид установки «Тестовый канал MPD» на пучке во время 51 сеанса Нуклотрона

Экспериментальная установка «Тестовый канал MPD» состоит из двух основных зон: зоны облучения детекторов и зоны 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.

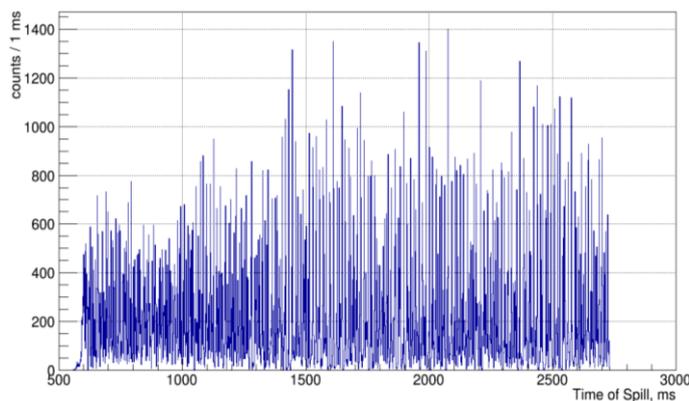


Рисунок 25 – Изменение интенсивности выведенного пучка дейтронов за время одного импульса ускорителя

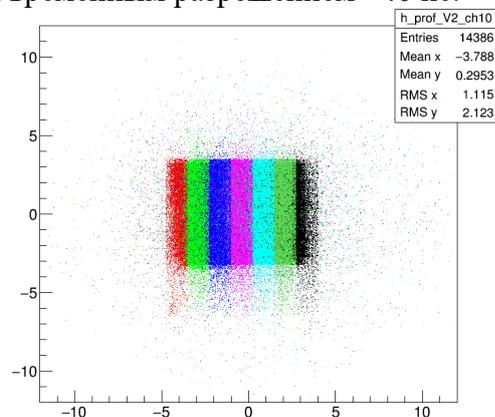


Рисунок 26 – Профили стрипов МРПК, полученные при помощи МППК

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 мониторируется 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.

В конце пятой главы описывается участок массового производства детекторов, созданный в рамках данной работы. 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 подробно описана процедура сборки МРПК для времяпролетной системы МРД со всеми этапами тестирования собираемых детекторов.

В заключении формулируются основные результаты работы:

1. Рекордное временное разрешение 40 пс при эффективности регистрации 99% получено при испытаниях новой трехсекционной МРПК активной площадью $\sim 0.2 \text{ м}^2$ со считывающими электродами в виде длинных полосок-стрипов на пучке дейтронов Нуклотрона. Результат получен благодаря 15-зазорной конструкции МРПК и дифференциальному считыванию сигналов с диэлектрически симметричной линии считывающих электродов. Измеренное временное разрешение детектора, предназначенного для времяпролетной системы TOF МРД, в среднем, составляет 50 пс (включая временное разрешение электроники) на всей активной поверхности, что в два раза превосходит требования Многоцелевого детектора.
2. Разработана методика улучшения загрузочных способностей МРПК с использованием для его сборки низкорезистивного ($\sim 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$) и тонкого стекла. Показано, что эффективность детектора с низкорезистивными стеклами не падает ниже 90% при интенсивности $7 \cdot 10^4$ частиц/(с $\cdot\text{см}^2$). При уменьшении толщины обычного термополированного стекла с удельным сопротивлением $4 \cdot 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ с 700 до 350 мкм, интенсивность, при которой эффективность детектора остается выше 90%, увеличивается с 1000 частиц/(с $\cdot\text{см}^2$) до 3000 частиц/(с $\cdot\text{см}^2$).
3. Разработана методика исследования эффектов прохождения высокочастотного импульса по неравномерной линии прохождения высокочастотных импульсов, которая способствовала изменению принципа считывания сигнала с электродов МРПК и улучшила временные характеристики детектора.
4. Промоделированы характеристики разработанной в рамках диссертационной работы конструкции цилиндрической части времяпролетной системы TOF МРД с использованием программного пакета MPDRoot для столкновений ионов золота с энергиями, предусмотренными техническими характеристиками коллайдера NICA. Геометрическая эффективность времяпролетной системы составила 94%, выбранная гранулярность каналов обеспечивает максимальную загруженность на канал считывания не более 14%, а координатное разрешение детекторов системы позволяет сопоставлять восстановленные треки частиц с измеренной координатой в TOF с эффективностью около 60%, что полностью отвечает требованиям эксперимента МРД.
5. Создана методическая инфраструктура для исследования детекторов для эксперимента МРД. Установка «Тестовый канал МРД» выведенном пучке Нуклотрона позволяет испытывать большинство типов детекторов на пучках как минимально ионизирующих частиц, так и тяжелых ионов высоких энергий.
6. Организовано массовое производство детекторов и модулей TOF МРД на базе ЛФВЭ ОИЯИ.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR / K.U. Abraamyan et al., // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2011. – Vol.628. – P.99–102; doi: [10.1016/j.nima.2010.06.293](https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.293).
2. Бабкин В.А., Волгин С.В., Воскобойник В.И., Головатюк В.М., Лобастов С.П., Времяпролетная система многоцелевого детектора MPD // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. – Т.75. – №.9. – с. 1352-1354; doi: [10.3103/S1062873811040046](https://doi.org/10.3103/S1062873811040046).
3. A real-size MRPC developed for CBM-TOF / Zhu, W., Wang, Y., Feng, S. et al. // Sci. China Technol. Sci. – 2013. – Vol.56. – P.2821–2826; doi: [10.1007/s11431-013-5353-8](https://doi.org/10.1007/s11431-013-5353-8).
4. Study on the rate capability of MRPCs assembled with thin glass / W. Zhu et al. // Proceedings of the 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC). – 2013. – P. 6829460; doi: [10.1109/NSSMIC.2013.6829460](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2013.6829460).
5. A thin float glass MRPC for the outer region of CBM-TOF wall / Zhu Weiping, et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2014. – Vol.735. – P.277–282; doi: [10.1016/j.nima.2013.09.044](https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.09.044).
6. Strip readout MRPC for the TOF System of the MPD/NICA Experiment. / V.A. Babkin et al. // Proceedings of Science. – 2014. – Vol.213 (Proceedings of TIPP-2014). – P.289; doi: [10.22323/1.213.0289](https://doi.org/10.22323/1.213.0289).
7. Fast detectors for the MPD/NICA time-of-flight system / V. Babkin, et al. // Bulgarian Chemical Communications. – 2015. – Vol.47 (Special Issue-B), P.215–221.
8. Beam tests of Cherenkov detector modules with picosecond time resolution for start and L0 trigger detectors of MPD and BM@N experiments / V.I. Yurevich et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2015. – Vol.12. – P.778–785; doi: [10.1134/S1547477115060102](https://doi.org/10.1134/S1547477115060102).
9. Triple-stack Multigap Resistive Plate Chamber with Strip Readout / V. Babkin et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2016. – Vol.824. – P.490–492; doi: [10.1016/j.nima.2015.11.060](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.11.060).
10. Development of the MRPC for the TOF system of the MultiPurpose Detector / V.A. Babkin et al. // J. Instrum. – 2016. – Vol.11. – P. C06007; doi: [10.1088/1748-0221/11/06/C06007](https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/06/C06007).
11. Status of the front-end electronics for the time-of-flight measurements at the MPD experiment / M.G. Buryakov et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2016. – Vol.13. – No.5. – P.532–534; doi: [10.1134/S1547477116050058](https://doi.org/10.1134/S1547477116050058).
12. Gas System for MPD Time-of-Flight Detector / D. Dabrowski et al. // Acta Phys. Pol. B (Proc. Supp.). – 2016. – Vol.9. – No.2. – P.203 – 206; doi: [10.5506/APhysPolBSupp.9.203](https://doi.org/10.5506/APhysPolBSupp.9.203).
13. Установка для испытания детекторов на пучках нуклотрона «Тестовый канал MPD» / В.А. Бабкин и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – №.3, С. 5–11; doi: [10.7868/S0032816217030016](https://doi.org/10.7868/S0032816217030016)
14. Control and readout electronics of the time-of-flight system of the MPD / Dmitriev A.V. et al. // Proc. of the 26th International Symposium on Nuclear Electronics and Computing (NEC 2017). CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol.2023. – P.129–134; URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2023/129-134-paper-20.pdf>.
15. Time-of-Flight particles identification in the MultiPurpose Detector at NICA / V.A. Babkin et al. // Proceedings of Science. – 2019. – Vol.364 (Proceedings of EPS-HEP2019). – P. 209; doi: [10.22323/1.364.02099](https://doi.org/10.22323/1.364.02099).