



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ
имени А.И. АЛИХАНОВА

На правах рукописи

Султанов Ришат Ильфатович

**Разработка конструкции времяпролетного детектора
и поиск оптимального сопротивления плавающего
электрода РППК для работы в условиях высокой
загрузки в эксперименте СБМ**

Специальность: 01.04.01 –
Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

2020

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Акиндинов Александр Владимирович

Официальные оппоненты: **Дмитренко Валерий Васильевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор,
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Головатюк Вячеслав Михайлович,
кандидат физико-математических наук,
начальник отдела ЛФВЭ,
Объединенный институт ядерных исследований

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований
Российской академии наук

Защита состоится 17 ноября 2020 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 201.002.01 при НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ по адресу: 117218 Россия, Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 117218 Россия, Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, 25, ученому секретарю диссертационного совета Д 201.002.01.

Автореферат разослан 17 октября 2020 года.

Телефон для справок: +7 (499) 789-66-00.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 201.002.01,
кандидат физ.-мат. наук

Васильев Валерий Васильевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Фазовая диаграмма сильно взаимодействующей материи является одним из главных предметов исследований в современной ядерной физике. В лабораторных условиях очень плотная ядерная материя может быть создана в области реакции столкновения релятивистских тяжелых ионов. Строящийся эксперимент СБМ (Compressed Baryonic Matter - Сжатая барионная материя) в исследовательском центре FAIR (Дармштадт, Германия) будет играть уникальную роль в исследовании фазовой диаграммы квантовой хромодинамики (КХД) в области высокой плотности барионов, поскольку он разрабатывается для работы с беспрецедентной частотой ион-ионных взаимодействий. Одними из ключевых во всей физической программе эксперимента СБМ являются измерения времени пролета частиц, необходимые в процедуре построения события и в идентификации частиц. В передней области эксперимента СБМ предполагаются загрузки, беспрецедентно высокие для времяпролетных детекторов. По результатам компьютерного моделирования, проведенного в рамках представленной диссертации, ожидается, что плотность потока частиц при малых углах вылета будет достигать $150 - 200 \text{ кГц/см}^2$. Для работы в таких жестких условиях создается времяпролетный детектор, основанный на радиационностойких плоскопараллельных резистивных камерах с керамическими электродами. Этот детектор, являющийся частью время-пролетной системы, называется Beam Fragments T0 Counter (BFTC) и будет располагаться в передней области на предельно малых углах, непосредственно около пучковой трубы. При наличии такого детектора становится возможным значительное упрощение алгоритма вычисления стартового времени, в предположении, что частицы летят по прямой траектории со скоростями, близкими к скорости света. Это позволит осуществлять вычисления стартового времени “на лету” и проводить 4D реконструкцию событий по ходу измерений.

Цели и задачи диссертационной работы

В диссертации описана исследовательская работа, проведенная в рамках разработки времяпролетного детектора, предназначенного для установки в передней области эксперимента СБМ. Кроме непосредственной разработки детектора, в работе преследовались методические цели по изучению зависимости характеристик РППК от величины сопротивления резистивного электрода.

Целями настоящей работы являются:

- Определение оптимальной гранулярности детектора для работы в условиях высокой множественности.
- Подбор доступных материалов для изготовления электродов резистивных плоско-параллельных камер (РППК), способных обеспечить стабильную работу камер в жестких радиационных условиях.
- Определение оптимального сопротивления резистивных электродов РППК для выполнения требований по эффективности регистрации и временному разрешению, предъявляемых к детектору ВФТС.

Для достижения поставленных целей требовалось решить следующие задачи:

- провести компьютерное моделирование работы эксперимента СБМ при всех планируемых энергиях пучка и рассчитать плотность потока частиц в передней области;
- Рассчитать вероятность двойных попаданий в ячейку детектора различной гранулярности. Определить оптимальную гранулярность для обеспечения вероятности двойного срабатывания ячеек детектора в пределах допустимых значений;
- провести радиационные испытания материалов, пригодных для изготовления электродов РППК;
- измерить удельное сопротивление экспериментальных образцов плавающих электродов;
- изготовить тестовые камеры, плавающие электроды которых обладают различным удельным сопротивлением в широком диапазоне значений;
- провести пучковые испытания загрузочных возможностей и временных характеристик изготовленных тестовых камер.

Научная новизна

Одним из критериев выбора материала для изготовления резистивного электрода РППК является величина его удельного сопротивления, которая определяет загрузочную способность и примесь стримерных сигналов при работе камеры. На сегодняшний день одним из самых популярных материалов для этой цели является стекло. Однако, его сопротивление является слишком большим для работы в условиях высокой загрузки, кроме того, стекло подвержено ускоренному старению из-за образования плавиковой кислоты при использовании газовой смеси с фторосодержащими газами. Плавающие электроды разрабатываемых РППК предполагается изготавливать из керамики на основе композитов SiC и Si_3N_4 . Это позволяет легко менять удельное сопротивление, варьируя соотношение компонентов при ее спекании. В процессе исследовательской работы были изготовлены и испытаны камеры с удельным сопротивлением плавающих электродов, меняющимся в широком диапазоне от 10^8 до 10^{12} Ом·см. Благодаря отработанной в ходе разработки детектора TOF в эксперименте ALICE конструкции камер, предполагающей канавки в форме Роговского вдоль всех краев электродов, и тщательно подобранному сопротивлению плавающего электрода величиной $\sim 4 \cdot 10^9$ Ом·см, становится возможной работа времяпролетного детектора при загрузках до 160 кГц/см² с эффективностью выше 90 % и временным разрешением около 80 пс.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается полученными экспериментальными данными, систематической повторяемостью измерений на различных экспериментальных площадках, а также соответствием работам других групп.

Практическая значимость

Времяпролетная система установки СБМ должна работать в условиях беспрецедентно высоких загрузок, достигающих в центральной части детектора до 160 кГц/см². Разработанные для эксперимента СБМ радиационностойкие керамические резистивные камеры нового поколения имеют требуемую загрузочную способность и открывают возможность реализации детектора непосредственно около трубы вакуумпровода установки СБМ

под предельно малыми углами. Высокое временное разрешение таких камер (~ 80 пс.) может быть использовано не только для определения массы заряженных частиц, но и для измерения стартового времени T_0 , т.е. времени первичного взаимодействия. При наличии такого детектора становится возможным значительное упрощение алгоритма вычисления стартового времени, предполагая, что частицы летят по прямой траектории со скоростями, близкими к скорости света. Это позволит осуществлять вычисления стартового времени и впервые проводить 4D реконструкцию событий по ходу измерений. Аналогичные задачи стоят перед другими экспериментами на ускорителях RHIC, БАК и НИКА, кроме того, данный тип радиационно-стойких детекторов будет способен работать при больших нагрузках, что позволит использовать его для нужд мониторингования в условиях близости активных зон реакторов.

Основные положения, выносимые на защиту

- Изучены временные и нагрузочные характеристики РППК в широком диапазоне удельного сопротивления резистивных электродов, и впервые экспериментально получена величина минимально возможного сопротивления резистивного электрода для времяпролетных РППК, работающих в лавинном режиме, т.е. по сути определена предельная нагрузка, при которой принципиально возможна работа детекторов данного типа.
- Разработан времяпролетный детектор, способный регистрировать время пролета частиц с разрешением на уровне 80 пс и эффективностью выше 90% при нагрузках до 160 кГц/см^2 (лучший мировой результат для камер данного типа на сегодняшний момент).
- Собраны и испытаны прототипы многоканальных модулей детектора, измерена вероятность перекрестных наводок в детектирующих ячейках модуля, которая составила менее 2%. Это подтверждает возможность реализации данной конструкции модуля в детекторе BFTC.
- Детально измерены амплитудные спектры камер различного сопротивления.

- С помощью компьютерного моделирования определены оптимальные размеры регистрирующей ячейки детектора BFТС, полученные на основе расчетов плотности потока частиц на плоскость детектора и вероятности двойных попаданий в регистрирующую ячейку.

Апробация работы

Основные результаты, изложенные в работе, опубликованы в 4 статьях, удовлетворяющих требованиям ВАК. Список публикаций автора по теме диссертации приведен в конце автореферата.

Результаты работы представлялись на различных конференциях:

1. R.Sultanov, “Radiation hard ceramic RPC development”, The 2-nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA’16), Moscow, 10-14 October 2016.
2. Р. Султанов, “Разработка резистивных плоскопараллельных камер на основе радиационно-стойкой керамики”, Молодежная конференция ИТЭФ, Москва, 29 ноября 2017г.
3. Р. Султанов, “Разработка резистивных плоскопараллельных камер на основе радиационно-стойкой керамики для время-пролетных систем”, постер, Молодежная конференция ИТЭФ, Москва, 23 октября 2019г.
4. Р. Султанов, “Разработка резистивных плоскопараллельных камер на основе радиационно-стойкой керамики”, 16-я Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, Москва, 2-5 декабря 2019г.

Результаты исследований докладывались на регулярных митингах рабочей группы коллаборации эксперимента СБМ, а также на совещаниях коллаборации.

Работа отмечена следующими дипломами:

1. Дипломы по итогам ежегодного конкурса молодых научных и инженерно-технических работников НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Москва, 2017-2020 г.

2. Диплом за победу в конкурсе научных работ НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ по разделу «Разработка новых экспериментальных методов и создание современных физических приборов и установок».

Личный вклад

Автор принимал активное участие в промерах керамики, использованной в качестве материала для изготовления плавающих электродов экспериментальных РППК, непосредственно участвовал в сборке камер и проведении пучковых испытаний. В составе научной группы в зоне ответственности диссертанта были программная часть системы сбора данных, а также последующая обработка и анализ набранных данных. Лично автором было проведено компьютерное моделирование для расчетов плотности потока частиц в эксперименте СБМ, подготовлены к публикации статьи, описывающие результаты проведенной работы, сделаны доклады на коллаборационных совещаниях и международных конференциях.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав и Заключения. Полный объём диссертации составляет 114 страниц, включая 54 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 80 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** кратко описываются теоретические и практические предпосылки для данной работы, дается краткое описание эксперимента СБМ и его физической программы. Говорится об условиях работы детектора BFТС в эксперименте СБМ, требуемых характеристиках, и, как следствие, актуальности настоящей работы по разработке высокозагрузочного время-пролетного детектора. Ставятся цели и задачи настоящей работы.

В первой Главе обобщенно описываются современные положения феноменологии релятивистской физики столкновений тяжелых ионов. Описываются экспериментальные методы изучения фазовой диаграммы сильновзаимодействующей материи. Дается перечень и описание основных детекторов и системы сбора данных эксперимента СБМ.

В экспериментах по столкновению тяжелых ионов при релятивистских энергиях создаются экстремальные состояния сильновзаимодействующего вещества, что делает возможным их изучение в лабораторных условиях. Эксперименты на Большом адронном коллайдере (БАК) и при максимальных энергиях на Коллайдере релятивистских тяжёлых ионов (RHIC) исследуют фазовую диаграмму КХД в области перехода между состоянием кварк-глюонной плазмы (КГП) и адронного газа при небольших барионных химических потенциалах, где при столкновениях ионов рождается примерно равное число частиц и античастиц. Этот регион фазовой диаграммы близок к условиям ранней Вселенной.

Эксперимент СБМ, проводимый при промежуточных энергиях пучка, способен пролить свет на следующие фундаментальные вопросы [1]:

1. Каково уравнение состояния вещества КХД при высокой плотности барионов и каковы соответствующие степени свободы при этих плотностях? Существует ли фазовый переход вещества от адронного к кварк-глюонному состоянию или область фазового сосуществования? Существуют ли экзотические фазы КХД?
2. Насколько модифицированы свойства адронов в плотном барионном веществе? Можем ли мы найти признаки восстановления киральной симметрии?
3. Как далеко мы можем расширить схему ядер до третьего (странного) измерения, создавая одинарные и двойные странные гиперядра? Существует ли странная материя в виде тяжелых мультистранных объектов?

Большинство экспериментальных наблюдаемых, которые чувствительны к свойствам плотной ядерной материи, чрезвычайно требовательны к статистике. Следовательно, ключевой особенностью успешных экспериментов

является возможность получения высокой частоты событий и скорости счета установки при способности измерения наблюдаемых с высокой точностью. Экспериментальная задача состоит в том, чтобы на пучках высокой светимости объединить быстродействующий детектор широкого аксептанса и высокоскоростную систему считывания данных.

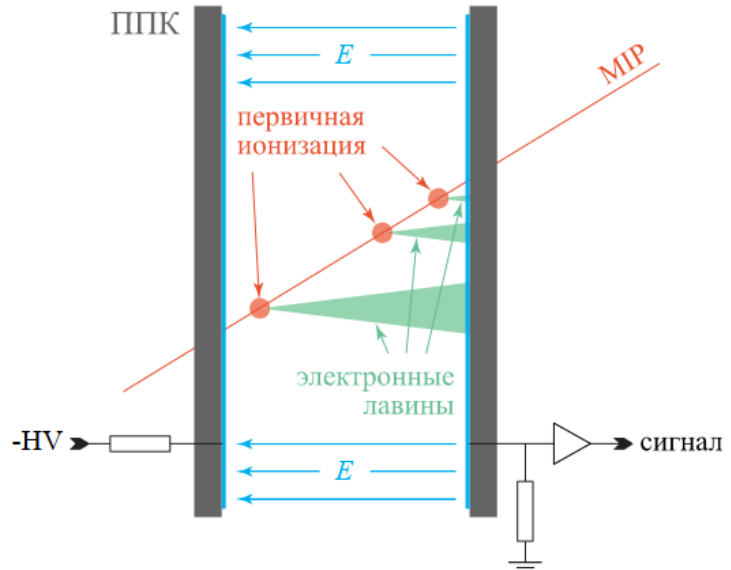
Список задач эксперимента СБМ включает в себя измерение множественности, распределений в фазовом пространстве и потоков протонов, пионов, каонов, гиперонов, адронных резонансов, легких векторных мезонов, чармония, а также их корреляции и флуктуации в событиях столкновения тяжелых ядер. Техническая сложность эксперимента заключается в одновременном изучении адронов и лептонов, и в отборе редких событий при частоте ион-ионных взаимодействий до 10 МГц, в каждом из которых множественность заряженных частиц может достигать 1000. При такой высокой счетной нагрузке измерения не могут быть осуществлены медленными детекторами и требуют применения очень быстрых детекторов и считывающей электроники, изготовленных из радиационно-стойких компонентов. Для отбора редких событий продукты каждой реакции столкновения должны быть восстановлены и отфильтрованы «на лету» на предмет содержания интересующих физических сигнатур. Эта концепция представляет собой смену парадигмы получения данных в экспериментах по физике высоких энергий: эксперимент СБМ будет работать без иерархической триггерной системы. Нестробируемая считывающая электроника, высокоскоростная система обработки и сбора данных, быстрые алгоритмы и, что не менее важно, радиационно-стойкие детекторы являются обязательными предпосылками для успешного проведения эксперимента.

Вторая Глава посвящена описанию физики работы газовых детекторов. Описаны вольт-амперная характеристика и режимы работы детекторов данного типа, механизм образования лавины, даны определения основных характеристик детектора, таких как эффективность регистрации частиц и временное разрешение. Описаны основные виды конструкции и материалов, используемых для изготовления камер. Рассмотрены факторы, влияющие на загрузочную способность резистивных плоско-параллельных камер, приведены основные методы ее улучшения.

Газоразрядный детектор представляет собой объем, наполненный газом и размещенными в нем электродами. Принцип работы газонаполненных детекторов основан на ионизации и/или возбуждении атомов газа заряженными частицами. Образовавшиеся в результате ионизации электроны и ионы под действием приложенного электрического поля собираются на электродах, сигнал с которых считывается электроникой. Рассматриваемые в работе детекторы работают в режиме ограниченной пропорциональности или «насыщенной лавины». В таком режиме после первичной ионизации газа пролетающей частицей происходит газовое усиление, обусловленное ускорением освобожденных электронов приложенным электрическим полем до энергий, достаточных для ударной ионизации других атомов газа. В результате такого процесса в газовом объеме происходит рост электронной лавины, движущейся в сторону анода. Газовое усиление в таком режиме составляет порядка $10^5 - 10^8$. Сигналом детектора является импульс тока, наведенного на считывающем электроде движением заряда в лавине.

Для временных измерений широкое применение получили газовые детекторы плоскопараллельной геометрии. Такой детектор представляет собой два металлизированных плоских электрода, параллельных друг другу. Поле, созданное в зазоре между электродами поданной на них разностью потенциалов, однородно и одинаково во всех точках рабочего объема. По этой причине газовое усиление (при соответствующих значениях напряженности поля) возникает сразу же после образования свободных зарядов, в отличие от камер радиальной геометрии, и, соответственно, импульс наведенного тока быстро набирает амплитуду, превышающую порог чувствительности считывающей электроники. Это преимущество позволяет производить временные измерения с точностью, не сильно уступающей сцинтилляционным счетчикам. На рис. 1 схематично изображена плоскопараллельная камера (ППК) и лавины, образованные после прохождения частицы через рабочий объем камеры. Необходимым условием роста лавины является достаточно высокое поле, способное за время свободного пробега электронов ускорить их до энергий, превышающих энергию ионизации атомов газа, которая для различных газов составляет от ~ 10 до 35 эВ.

Рис. 1: Схематическое изображение конструкции плоско-параллельной камеры и принципа ее работы.



Число электрон-ионных пар, созданных электроном на единицу длины в результате ударной ионизации, называется первым коэффициентом Таусенда α . Значение коэффициента α определяется сечением ионизации σ_{ion} , или, соответственно, длиной свободного пробега между двумя актами ионизации $\lambda = 1/\alpha$. Кроме этого, существует вероятность того, что электрон будет захвачен атомом газа, образуя отрицательный ион. Этот процесс уменьшает рост лавины и характеризуется коэффициентом прилипания η . Величина $(\alpha - \eta)$ называется эффективным коэффициентом Таусенда. Изменение количества электронов в лавине dn на участке длины dx дается выражением:

$$\frac{dn}{dx} = (\alpha - \eta)n. \quad (1)$$

Таким образом, зависимость числа электронов в лавине от пройденного расстояния $x = vt$, где v и t – соответственно, скорость распространения и время развития лавины, является экспоненциальной:

$$n(x) = e^{(\alpha - \eta)x}. \quad (2)$$

При этом меняется количество положительных p и отрицательных N ионов:

$$\begin{aligned}\frac{dp}{dx} &= \alpha n, & \frac{dN}{dx} &= \eta n, \\ p(x) &= \frac{\alpha}{(\alpha - \eta)} (e^{(\alpha - \eta)x} - 1) N = p - n.\end{aligned}\tag{3}$$

Развитие лавины в очень сильном поле может привести к возникновению так называемого стримера, представляющего собой слабо ионизированный канал между лавиной и электродом. Он может расти как в направлении катода, так и анода. Для того, чтобы лавина переросла в стример, необходимо, чтобы поле пространственного заряда лавины было сравнимым с величиной внешнего поля в зазоре. Такое условие достигается при значениях $\alpha x \approx 20$ [2]. В области развития стримера после его прохождения остается большое количество положительных ионов, что локально понижает напряженность поля и, соответственно, детектирующую способность камеры и временное разрешение. Высокая частота стримерных разрядов значительно понижает загрузочную способность камеры. Кроме того, поскольку для работы с сигналом лавины используется электроника с низким порогом считывания, сигнал стримера дает множественное срабатывание электроники. Для детекторов, работающих в условии высокой счетной загрузки, крайне нежелательно наличие стримеров. Главным методом гашения стримеров является создание резистивного слоя на электроде, локализирующего область развития стримера. Благодаря наличию сопротивления электрода возможна работа при более высоких полях без образования стримеров. Такой метод дал начало новому типу газовых детекторов, называемых резистивными плоскопараллельными камерами (РППК).

Для газовых детекторов загрузочная способность определяется временем релаксации – интервалом времени, необходимым для перезарядки емкости камеры после съема заряда лавины, и, соответственно, частичной разрядки емкости. В течение этого времени поле в зазоре падает, что сказывается на эффективности регистрации. В случае резистивных камер падение напряженности поля происходит локально, в узкой области лавины, в то время как остальная область остается в рабочем режиме. Однако, с увеличением потока частиц на площадь детектора области пониженного поля перекрываются, что приводит к снижению газового усиления и скорости дрейфа

электронов, а, следовательно, уменьшению эффективности регистрации и ухудшению временного разрешения во всем рабочем объеме. Загрузочную способность всего детектора можно описать через среднее падение напряжения на электродах и ток, текущий через камеру при регистрации лавин [3]:

$$U_{gap} = U_{ap} - U_{drop} = U_{ap} - I \cdot R = U_{ap} - \rho \phi \cdot \rho d_{el}, \quad (4)$$

где U_{gap} – напряжение в зазоре, U_{ap} – поданное напряжение, U_{drop} – падение напряжения при протекании тока I через зазор сопротивлением R , q – заряд лавины, ϕ – плотность потока частиц, ρ – удельная сопротивленность электродов, d_{el} – толщина электродов.

Таким образом, для повышения загрузочной способности детектора необходимо понижать заряд лавины и уменьшать сопротивление резистивных электродов. На практике последнее оказывается применимо гораздо легче. Наиболее удобный способ уменьшения сопротивления – это использование низкорезистивных материалов с подходящим удельным сопротивлением. В то же время низкое сопротивление электродов уменьшает гашение разряда и приводит к образованию стримеров от вторичных лавин. Поэтому, увеличение загрузочной способности камеры является компромиссом между ограничением развития лавины (временным разрешением) и эффективностью.

Создание быстродействующего и высокозагрузочного детектора с размером газового зазора 200–300 микрон требует использования материалов, удовлетворяющих повышенным требованиям. Главные требования предъявляются к плоскостности и шероховатости поверхности электродов, поскольку эти параметры определяют равномерность ширины зазора по всей детектирующей площади, а значит, величину поля в зазоре. При ширине зазора около 250 мк допускается варьирование этой величины на 3–5 микрон. Поверхности, удовлетворяющие таким строгим требованиям, возможно изготовить только из полированных керамических материалов и стекла. В современной практике для изготовления резистивных электродов времяпролетных детекторов наиболее широко используется стекло, удельное сопротивление которого колеблется от 10^{10} до 10^{13} Ом·см.

С начала развития использования РППК в конце 80х годов были разработаны и опробованы несколько материалов, такие как кремниевое стекло, бакелит, полупроводящее стекло или керамика. Из перечисленных материалов только керамика удовлетворяет требованию высокой радиационной стойкости, предъявляемое к материалам детектора ВФТС. Минусом керамики является ее высокое удельное сопротивление. Однако, эта проблема может быть решена нанесением на поверхность электродов полупроводящего слоя с электронной проводимостью. Одновременно это позволяет варьировать сопротивление электрода в широком диапазоне – от нескольких кОм до 10^{13} кОм·см. Группой из ИТЭФ были изготовлены и протестированы камеры, где в качестве материала резистивных электродов использовалась керамика на основе SiC (карбид кремния). Эти камеры продемонстрировали хорошие временные характеристики (80 пс при эффективности регистрации 98%) при нагрузках до 5 кГц [4].

Конструктивно камеры могут быть выполнены в одно- или многозазорном варианте. Для создания многозазорной конструкции возможна организация детектора из однозазорных камер, подключенных параллельно ко входу усилителя, либо с использованием “плавающих” электродов. Во втором случае поле в зазорах обеспечивается напряжением на плавающих электродах, установленного электромагнитной индукцией. Примеры таких конструкций показаны на рис. 2. Оба варианта имеют свои достоинства и недостатки. В случае параллельного подключения зазоров суммарная емкость на входе усилителя оказывается большой, что влечет за собой повышенный уровень шумов и джиттера электроники. В случае камеры с “плавающим” электродом емкости зазоров включены последовательно и суммарная емкость оказывается очень низкой. Вместе с этим, снимаемый с такой камеры заряд оказывается существенно меньше. Зависимость величины снимаемого с камеры заряда Q^{tot} от числа зазоров n описывается теоремой Рамо:

$$Q^{tot} = Q^{1gap} n \frac{\epsilon_s^d}{n\epsilon_s^d + (n + 1)}, \quad (5)$$

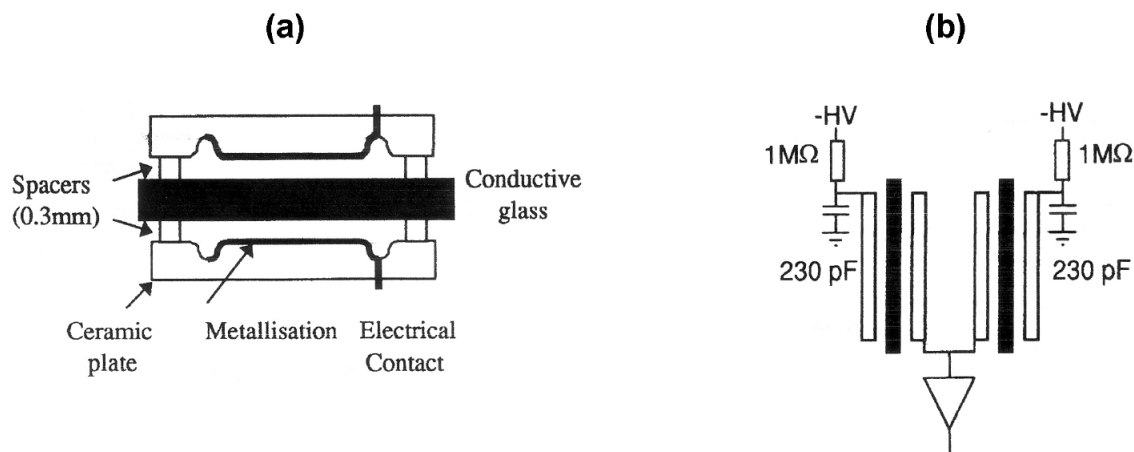


Рис. 2: Камера с “плавающим” резистивным электродом (слева) и вариант четырехзазорной камеры с параллельным считыванием с каждой двух зазоров (справа).

где s – толщина плавающих электродов, ϵ – диэлектрическая проницаемость материала плавающих электродов, Q^{1gap} – заряд, снимаемый с однозазорной камеры. Таким образом, средний снимаемый заряд многозазорной камеры ненамного выше заряда одного зазора и практически не растет с увеличением количества зазоров. Для таких камер требуется считывание с более высоким коэффициентом усиления, что увеличивает вероятность возбуждения электроники.

В третьей Главе дается описание конструкции керамических РППК, свойств использованных конструкционных материалов, процесса сборки тестовых камер. Показаны результаты радиационных испытаний керамических электродов и обнаруженные эффекты старения при наличии изобутана в составе газовой смеси. На основе результатов компьютерного моделирования ожидаемой плотности потока частиц в передней области эксперимента СБМ определен оптимальный размер детектирующей ячейки детектора BFТС.

Исходя из опыта исследовательской работы [5] в рамках разработки детектора TOF для эксперимента ALICE, в качестве материала для сигнальных электродов была выбрана алюмоксидная керамика (Al_2O_3). Для реализации такого решения на керамическую пластину методом напыления

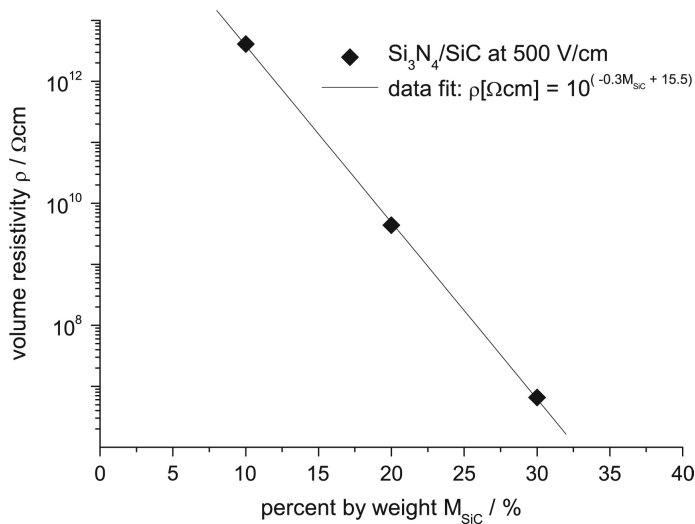


Рис. 3: Зависимость удельного сопротивления керамики Si_3N_4/SiC от процентного содержания полупроводящей примеси SiC [6].

наносится слой меди толщиной 1 микрон, служащий проводящей поверхностью и обладающий хорошей адгезией к керамике. Поверх слоя меди напыляется тонкий слой хрома, который за счет высокой работы выхода уменьшает вероятность эмиссии электронов в газовый зазор. Для изготовления резистивных электродов коллективами из ИТЭФ и Гельмгольц Центра Дрезден-Россендорф (ГЦДР) начато изучение и производство керамических композитов на основе нитрида и карбида кремния Si_3N_4/SiC . В данном составе Si_3N_4 выступает в качестве структурообразующего компонента, а SiC – легирующего. Требуемые свойства материала, в частности, удельное сопротивление, возможно получить меняя соотношение компонентов, либо процесс спекания композитов. Увеличение доли полупроводящей примеси SiC увеличивает проводимость материала, тем самым уменьшая его удельное сопротивление. Зависимость удельного сопротивления образцов от содержания в них примеси SiC показана на рис. 3. Измеренные образцы отличались лишь процентным содержанием примеси SiC , в то время как процесс изготовления не менялся. Видно, что зависимость линейная, что очень удобно для получения материала с заданным удельным сопротивлением.

В качестве регистрирующей ячейки предложена керамическая камера с внешними размерами $24 \times 24 \text{ мм}^2$ и размером рабочей области $20 \times 20 \text{ мм}^2$. Камера состоит из шести зазоров по 250 мкм. Зазоры составлены попарно, каждая пара образована тремя электродами: высоковольтный, резистивный,

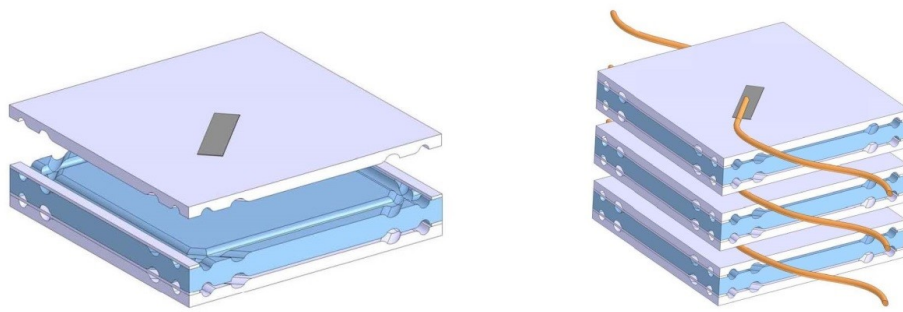


Рис. 4: Модель керамической камеры BFTC. Слева – пара зазоров, справа – 6 зазоров, составленных из трех пар.

сигнальный. Камера состоит из трех таких пар. Ширина зазора обеспечивается керамическими упорами толщиной 250 мкм. Схема камеры изображена на рис. 4.

Конструкция и габариты камеры выбраны основываясь на:

- требовании к максимальной вероятности двойных попаданий в ячейку при предполагаемых загрузках детектора;
- доступных результатах исследований РППК с разной величиной газового зазора;
- оптимизации конструкции для увеличения загрузочной способности камеры, а именно: параллельный съем заряда с каждой двух зазоров, канавки в форме близкой к форме Роговского по периметру всех электродов.

По результатам компьютерного моделирования (рис. 5) плотности потока частиц в эксперименте СБМ и загрузки ячеек детектора различной площади определено, что оптимальным размером ячейки детектора BFTC является $2 \times 2 \text{ см}^2$. Такая площадь обеспечивает вероятность двойных попаданий ниже 2% при всех планируемых энергиях пучка в эксперименте СБМ.

Вопрос влияния количества и ширины зазоров на рабочие характеристики РППК довольно подробно изучен. Оптимальным с точки зрения временного разрешения и ширины плато (до 1 кВ/мм) являются шестизазорные камеры с величинами зазоров 220–260 микрон [5].

В предложенной конструкции керамической РППК пары зазоров подключены параллельно, что дает большую емкость на входе усилителя, но,

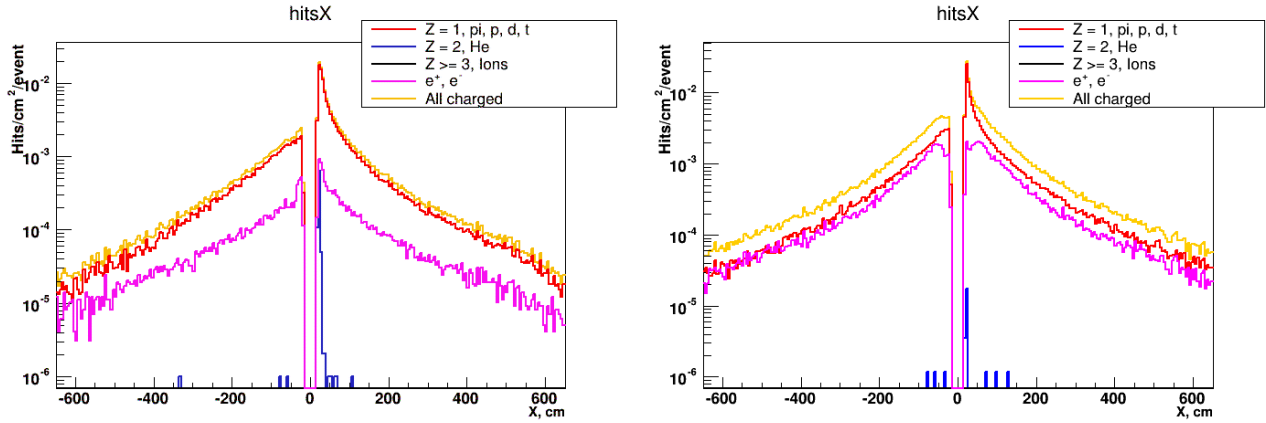
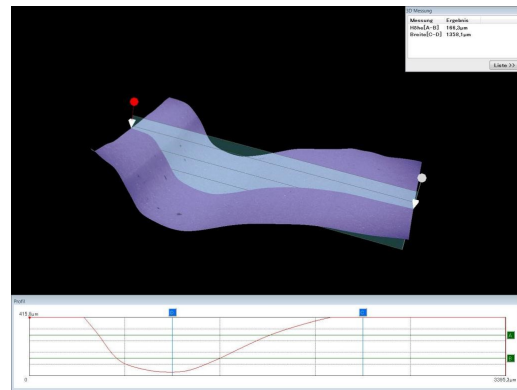


Рис. 5: Плотность потока частиц на плоскость детектора TOF в одном событии генератора SHIELD. Симуляции проводились в нецентральных (minimum bias) столкновениях ионов золота при энергиях 10 ГэВ/нуклон (слева) и 25 ГэВ/нуклон (справа). Показана плотность потока частиц вдоль оси X при $-10 < y < 10$. Цветом показаны распределения частиц с различным зарядом.

одновременно, и большой снимаемый заряд. Однако, поскольку пары зазоров образованы разными электродами, при возникновении лавины в одной из них поле не будет меняться в остальных. Поскольку заряд суммируется со всех зазоров, спектр амплитуд дальше отстоит от пьедестала и выглядит шире по сравнению с камерами меньшей емкости, такими как стриповые многозазорные камеры, где зазоры организованы последовательно. Такое качество амплитудного спектра положительно влияет на загрузочную способность камер.

С целью минимизации краевых пробоев, значительно ухудшающих временные характеристики камеры, на электродах керамической РППК выполнена канавка по всему периметру. Форма канавки приближена к форме эквипотенциальной поверхности Роговского, что обеспечивает плавный спад поля на краях камеры. Для этой же цели металлизированный слой на высоковольтных и сигнальных электродах напыляется до середины канавки. Наличие канавки на резистивных электродах позволяет работать при значении напряженности поля в зазоре на 20% больше до появления значимого процента стримеров. Форма канавки показана на рис. 6. Ее глубина составляет 0.5 мм, а расстояние от ее центра до края электрода составляет 2 мм.

Рис. 6: Изображение канавки в форме Роговского на одном из электродов. Профиль снят на оптическом микроскопе в институте ГЦДР.



В качестве рабочей газовой смеси выбрана двухкомпонентная смесь фреона $C_2H_2F_4$ и фторида серы SF_6 в соотношении 90:10%. Как выяснилось в ходе испытаний, использование смеси с содержанием изобутана приводит к образованию полимерных наростов на поверхности резистивных электродов, изготовленных из карбидной керамики. Такие наросты локально сокращают ширину зазора и приводят к появлению пробоев емкости камеры и росту тока утечки.

При изготовлении камер проводился контроль качества поверхности керамических пластин и толщины упоров для обеспечения зазоров одинаковой ширины на всей детектирующей площади. Сопротивление плавающих электродов измерялось на установке, главным компонентом которой является пико-амперметр Keithley 485, способный проводить измерения тока с точностью 0.1 пА при подаче напряжения 1 кВ. Наблюдается зависимость от температуры и влажности внутри камеры, а также от рабочего напряжения – материал обладает варисторным типом сопротивления.

Для определения радиационной стойкости изучаемых керамических материалов две пластины из нитрид-карбидной Si_3N_4/SiC керамики размерами $5 \times 5 \times 0.2$ см³ были отправлены на экспериментальную площадку на ядерном реакторе в Мюнхене (FRM-II). Пластины были подвержены потоку нейтронов величиной 10^{13} эквивалентной дозы на квадратный сантиметр, что соответствует примерно 10 годам работы детектора BFТС в эксперименте СБМ. Энергия нейтронов составляла от 0.1 до 10 МэВ. Для понимания влияния облучения на основные характеристики керамических пластин их удельное сопротивление было измерено до и после облучения. Удельное сопротивление пластин после облучения уменьшилось на 40% относительно

начального значения. Такое изменение не приведет к потере эффективности, как это происходит в случае использования других популярных материалов, сопротивление которых растет.

Четвертая Глава посвящена описанию методов проведения пучковых испытаний керамических РППК и анализу экспериментальных данных. Результаты проведенных измерений подтверждают эффективную работу камер вплоть до загрузок 160 кГц/см^2 . Получена зависимость от сопротивления резистивного электрода таких характеристик камеры, как эффективность и временное разрешение. Представлены измерения вероятности перекрестных наводок в прототипе модуля детектора BFТС.

Как уже отмечалось выше, детектор BFТС должен обеспечивать как высокую скорость счета, так и высокое временное разрешение. Поэтому необходимо найти компромиссное сопротивление плавающих электродов: оно должно быть достаточно низким, чтобы поддерживать эффективность регистрации частиц при высоких нагрузках, и достаточно высоким, чтобы подавлять образование стримеров в газовом зазоре при высоком электрическом поле. Для определения оптимального сопротивления электродов было произведено несколько образцов керамических пластин с удельным сопротивлением от 10^8 до $10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Эти образцы были использованы для сборки камер, испытания которых проводились с помощью 8-ми канального мини-модуля и одиночных газовых объемов. Кроме этого, для проверки альтернативного решения была собрана гибридная камера, плавающие электроды которой изготовлены из экспериментального низкорезистивного стекла. Некоторые из камер показаны на рис. 7.

Изготовленные РППК были испытаны на двух ускорительных площадках: ELBE в ГЦДР и PS в ЦЕРН. На ускорителе ELBE использовался электронный пучок энергией 30 МэВ с возможностью изменения его интенсивности от нескольких Гц/см^2 до 1 МГц/см^2 . Кроме этого, здесь имеется независимая временная привязка от сигнала радиочастоты ускорителя, которая определяет разрешение стартового времени, составляющую 33 – 40 пс. Недостатком этой площадки является высокое рассеяние мягких электронов в материале детектора, что искусственно занижает эффективность регистрации частиц и делает измерения зависимыми от геометрического положения

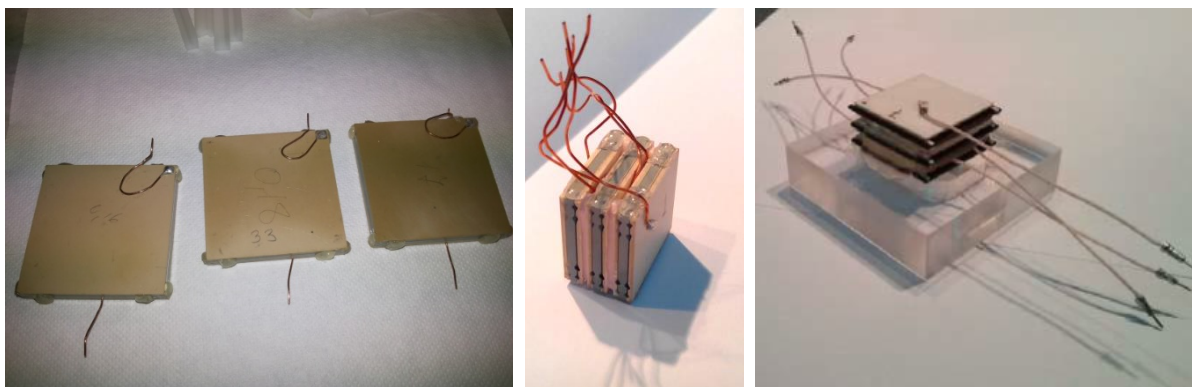
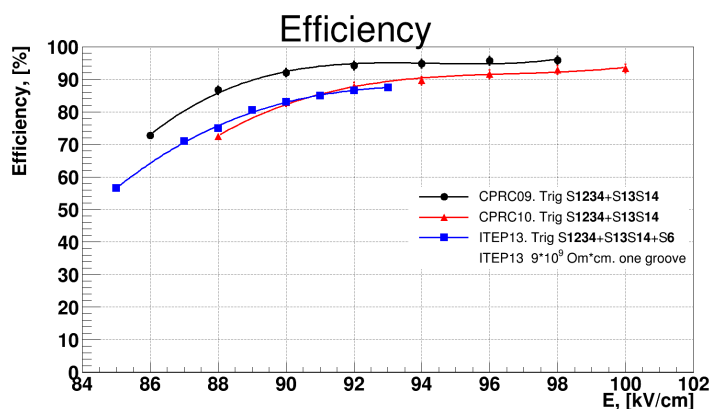


Рис. 7: Слева – три индивидуальные ячейки размером $5 \times 5 \text{ см}^2$. В центре – собранная 6-зазорная камера размером $2 \times 2 \text{ см}^2$. Справа – гибридная камера, изготовленная из керамических и стеклянных электродов.

самого детектора. Чтобы свести к минимуму эти эффекты, были установлены два узких триггерных счетчика, работающих в совпадении, спереди и сзади РППК. В свою очередь, на канале T10 ускорителя PS в ЦЕРН использовался пучок адронов (преимущественно π^-) энергии 5 ГэВ с максимально возможным потоком частиц 20 кГц/см^2 . Все измерения проводились с использованием предусилителя MAXIM 3760. Стартовое время системы, задаваемое сцинтилляционными счетчиками, составляет около 60 пс. Для расчета временного разрешения камер была проведена время-амплитудная корректировка, заключающаяся в устранении зависимости времени прихода сигнала от его амплитуды.

На рис. 8 показаны рабочие кривые камер размерами $5 \times 5 \text{ см}^2$. В камерах CRPC09 и CRPC10 канавки Роговского имеются по периметру всех электродов, включая резистивные. Сравнивая кривые для камер CRPC10 и

Рис. 8: Рабочие кривые камер размером $5 \times 5 \text{ см}^2$. Удельные сопротивления плавающих электродов: CRPC09 – $3.5 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, CRPC10 – $2.3 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, ITEP13 – $9 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.



ITER13, сопротивления которых близки, можно сделать вывод об эффективности канавок Роговского. Благодаря канавкам возможна работа при значительно большей напряженности электрического поля, а именно: предел допустимой доли стримерных сигналов на камере ITER13 достигается при 93 кВ/см и эффективности 88%, в то время как в камере CRPC10 этот порог достигается при напряженности поля 100 кВ/см и эффективности 94%. Камера CRPC10 демонстрирует широкое плато эффективности, что важно для работы в условиях меняющейся загрузки.

Зависимости эффективности и временного разрешения от напряженности поля показаны на рис. 9 [A1]. Камеру с сопротивлением $5 \cdot 10^8$ Ом·см (mCRPC2) невозможно вывести на плато из-за большой доли стримерных сигналов и повышения тока в камере, не связанного с пучком. Камеры с сопротивлением больше $3 \cdot 10^9$ Ом·см демонстрируют широкое плато эффективности. Ошибки, указанные на рисунке, являются статистическими. Систематическая ошибка, в первую очередь связанная с позиционированием счетчиков, составляет 2.5%. Видно, что лучшее временное разрешение камеры демонстрируют в первой половине рабочего плато. При величине поля, близкой к максимальной, проявляется влияние стримерных разрядов, неизбежно ухудшающих временное разрешение камеры. На рис. 9 также показан

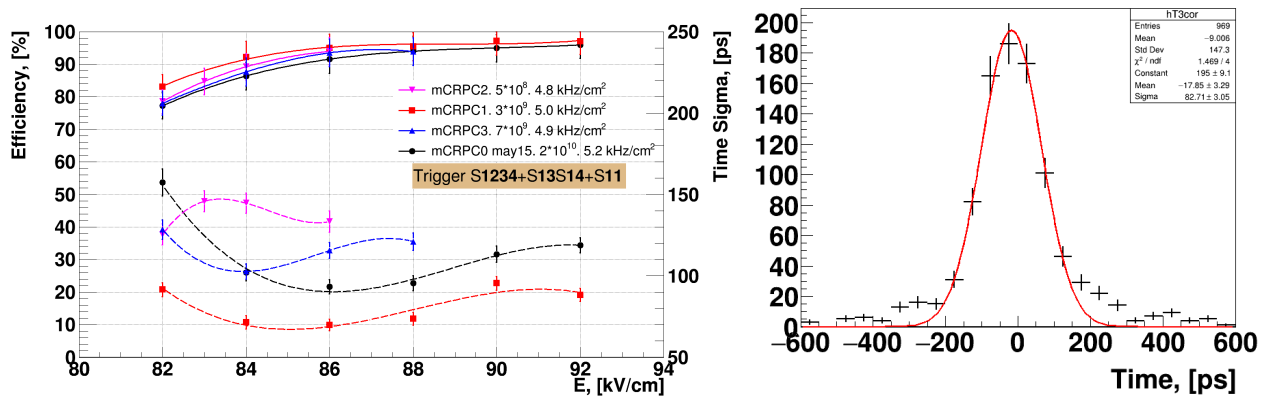


Рис. 9: Слева: зависимость эффективности (сплошные линии) и временного разрешения (пунктирные линии) от напряженности поля для камер размерами 2×2 см². Справа: временной спектр после время-амплитудной коррекции для камеры mCRPC1 при величине напряженности поля 88 кВ/см, загрузки – около 5 кГц/см²; временное разрешение составляет 72 пс.

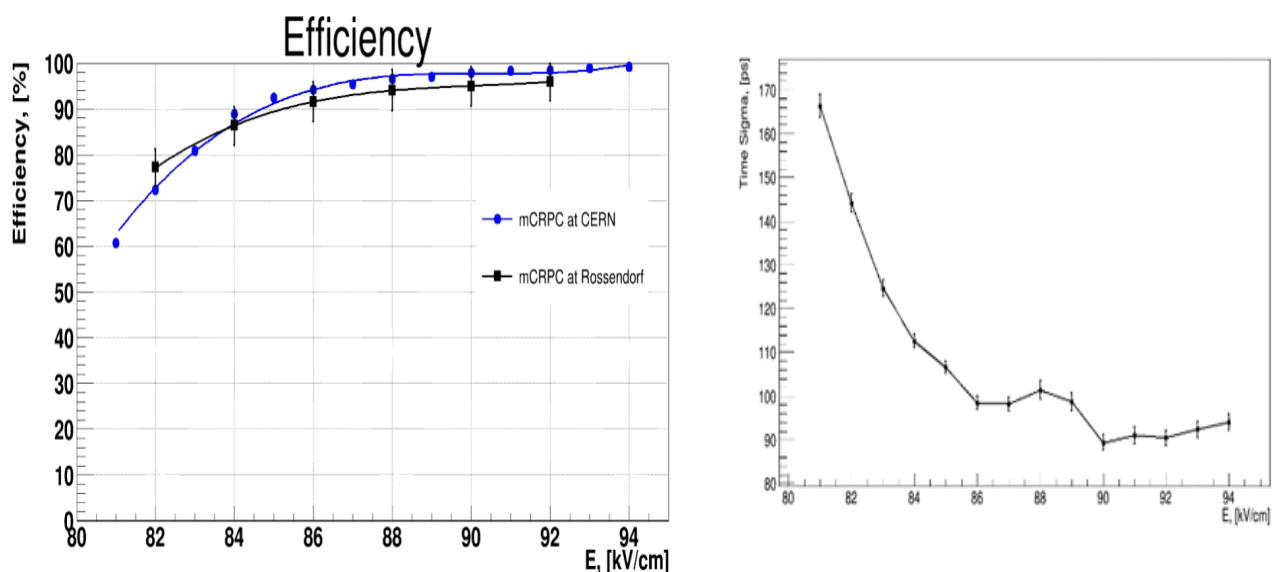


Рис. 10: Результаты измерений для камеры mCRPC0 ($2 \cdot 10^{10}$ Ом·см), полученных на адронном пучке при низкой загрузке, порядка 5 кГц/см². Слева: рабочая кривая (также, для сравнения показан результат для электронного пучка), справа: зависимость временного разрешения от напряженности поля.

временной пик после время-амплитудной коррекции для камеры mCRPC1. Временное разрешение камеры составляет около 80 пс на протяжении всего рабочего плато. Аналогичный результат получен на адронном пучке, где подробно снималась рабочая кривая камеры mCRPC0. Результаты данного измерения [A2] показаны на рис. 10.

Результаты измерений [A3] загрузочной способности показаны на рисунке 11. Рабочим напряжением для всех камер выбрано значение 4.4 кВ, что соответствует значению напряженности поля в зазоре 88 кВ/см. Рабочая точка выбрана в начале плато эффективности для обеспечения «мягкого» режима работы камеры, при котором металлизированные поверхности не пострадают в случае протекания большого тока при высокой загрузке. Видно, что эффективность камер с большим сопротивлением при увеличении загрузки падает быстрее. Камеры с удельным сопротивлением электродов более $6.6 \cdot 10^9$ Ом·см при загрузке около 150 кГц/см² работают с эффективностью менее 85%, что не удовлетворяет требованиям, предъявляемым

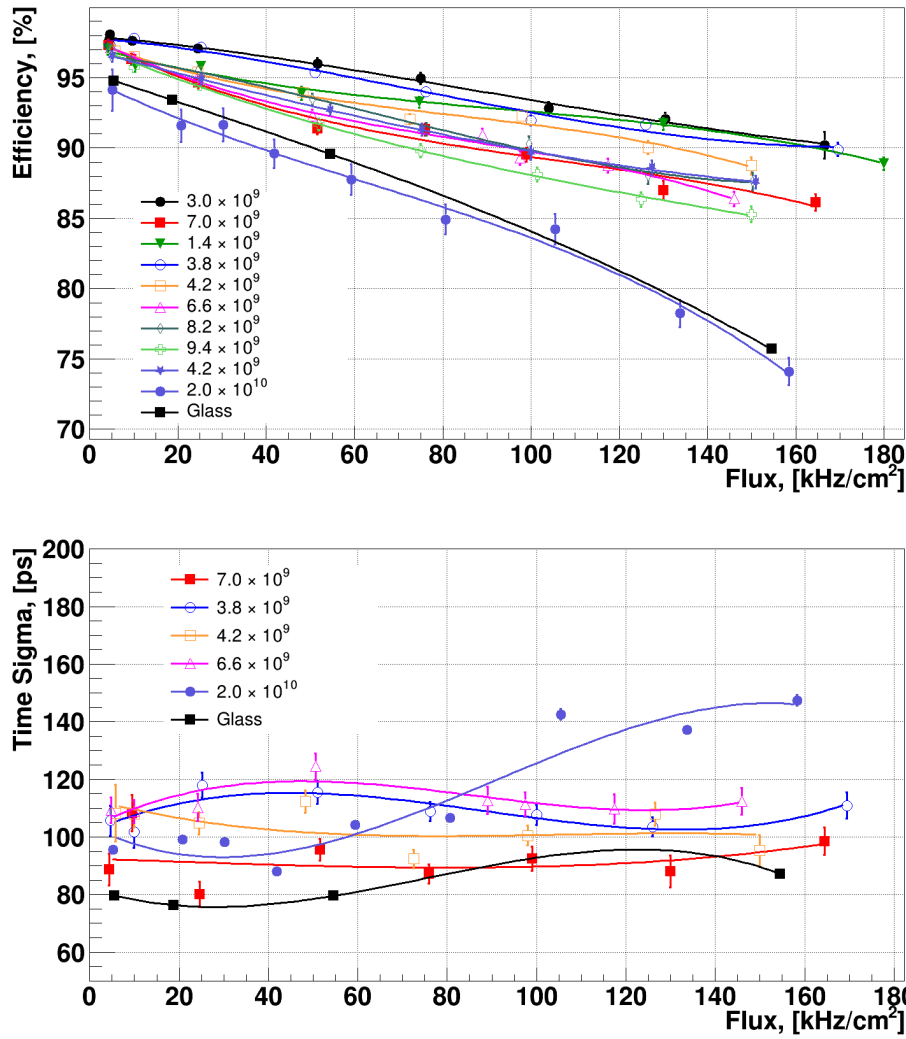


Рис. 11: Зависимость эффективности (сверху) и временного разрешения (снизу) от плотности потока частиц. Измерения проводились при напряженности электрического поля в зазоре 88 кВ/см.

детектору BFТС. Камеры с удельным сопротивлением электродов равным $1.4 \cdot 10^9$ и $3.0 \cdot 10^9$ Ом·см при загрузке более 100 кГц/см² работали при темновом токе 0.5 – 1.0 мкА с большим количеством стримерных сигналов, что также не подходит для работы в режимах эксперимента СБМ. Камеры с удельным сопротивлением электродов, лежащим в диапазоне $(4 - 6) \cdot 10^9$ Ом·см, показывают стабильную работу с эффективностью выше 90% и нулевым током утечки вплоть до загрузок 160 кГц/см². Кривая, соответствующая гибридной камере, хорошо совпадает с кривой камеры mCRPC0, обладающей удельным сопротивлением плавающего электрода

$2 \cdot 10^{10}$ Ом·см. Для камер, плавающие электроды которых обладают удельным сопротивлением более $9 \cdot 10^9$ Ом·см, временное разрешение растет с загрузкой. Также растет разрешение камер с наименьшими сопротивлениями электродов ($1.4 \cdot 10^9$ и $3.0 \cdot 10^9$ Ом·см), что является следствием высокой доли стримерных сигналов и растущего тока утечки. Разрешение камер с сопротивлением электродов в интервале $(4 - 8) \cdot 10^9$ Ом·см меняется незначительно и остается в пределах 80 – 100 пс вплоть до значений плотности потока частиц 160 кГц/см².

Для проверки оптимальности конструкции прототипа модуля детектора BFТС была измерена вероятность наводок на соседние каналы при наличии сигнала в одной из ячеек. При данном измерении одна из камер выставлялась в центр пучка, в то время как сигналы считывались с нее и всех остальных каналов. Загрузка составляла около 5 кГц/см². Измерения показывают [А4], что вероятность наводок на соседние каналы составляет не более 1 – 2%.

Главным **Выводом** проведенных измерений является то, что оптимальное сопротивление плавающих электродов для камер детектора BFТС – $5 \cdot 10^9$ Ом·см с допустимой погрешностью около 20%, а размер регистрирующей ячейки – 2×2 см². При такой конфигурации камеры работают стабильно с эффективностью выше 90% вплоть до загрузок 160 кГц/см². Временное разрешение камер в измеренном диапазоне загрузок меняется незначительно. Камеры с другой конфигурацией не способны работать в столь широком диапазоне загрузок без ухудшения временного разрешения или эффективности регистрации.

Тщательная процедура контроля качества поверхности электродов, их удельного сопротивления и ширины зазоров обеспечивает стабильную работу камер с очень схожими амплитудными спектрами. Идентичность регистрирующих ячеек является необходимым условием для создания полномасштабного модуля падовой конструкции и позволяет минимизировать число каналов высокого напряжения, что является существенной экономией финансовых средств при эксплуатации детектора.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Akindinov, A., ... , Sultanov, R. и др. — Radiation-hard ceramic Resistive Plate Chambers for forward TOF and T0 systems. — *Nucl. Instrum. Meth. A* **845**, 203—205. — doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.076 — (2017).
- A2. Akindinov, A., ... , Sultanov, R. и др. — Radiation hard ceramic RPC development. — *Journal of Physics: Conference Series A* **798**, 012136. — (2017).
- A3. Султанов, Р. — Разработка резистивных плоскопараллельных камер на основе радиационно-стойкой керамики. — *Ядерная физика и инжиниринг* **8**, 460—465. — (Сент. 2017).
- A4. Sultanov, R. и др. — A timing RPC with low resistive ceramic electrodes. — *Journal of Instrumentation* **14**, C09007—C09007. — doi:10.1088/1748-0221/14/09/c09007. — (Сент. 2019).

Список литературы

- 1. The CBM Physics Book: Compressed Baryonic Matter in Laboratory Experiments. — *Springer Series: Lecture Notes in Physics* **814** (ред. Friman, B. и др.) — doi:[10.1007/978-3-642-13293-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-13293-3). — (2011).
- 2. Лозанский, Э. & Фирсов, О. — *Теория искры* — (1975).
- 3. González-Díaz, D. и др. — An analytical description of rate effects in timing RPCs. — *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* **158**. Proceedings of the 8th International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors, 111—117. — doi:[10.1016/j.nuclphysbps.2006.07.026](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2006.07.026). — (2006).
- 4. Akindinov, A. и др. — Dielectric resistive plate chamber: The first step in new high-resolution TOF technology. — *Nucl. Instrum. Meth. A* **494**, 474—479. — doi:[10.1016/S0168-9002\(02\)01534-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01534-6). — (2002).
- 5. Akindinov, A. и др. — *Preprint ITEP* **16-04**.
- 6. Naumann, L. и др. — Ceramics high rate timing RPC. — *Nucl. Instrum. Meth. A* **628**, 138—141. — doi:[10.1016/j.nima.2010.06.302](https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.302). — (2011).