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

Султанов Ришат Ильфатович

Специальность 01.04.01 —

приборы и методы экспериментальной физики

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., Акиндинов А.В.

диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

BFTC - Времяпролетный детектор в передней области эксперимента CBM



- Размеры: 1.2x1.2 м².

Количество каналов
считывания = 3200, при размере
регистрирующей ячейки 2х2 см².

Требуемые характеристики:

- Временное разрешение < 80 пс
- Эффективность > 95%
- Радиационно-стойкие материалы

- Детектор BFTC представляет собой центральная часть детектора TOF и предназначается для измерения времени пролета частиц в передней области.
- Основной задача определение стартового времени ТО в режиме "online", требуемого в для 4D реконструкции событий.
- Другие задачи:

- Определения плоскости реакции (совместно с передним калориметром PSD).

- Идентификация частиц, оставивших след в трекере STS.

Цели и задачи исследовательской работы

В диссертации описана исследовательская работа, проведенная в рамках разработки времяпролетного детектора, предназначенного для установки в передней области эксперимента CBM.

Цели работы:

- Определение оптимальной гранулярности детектора для работы в условиях высокой счетной загрузки.
- 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 BFTC.

Для достижения поставленных целей необходимо было 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 объемное сопротивление экспериментальных образцов плавающих электродов.
- Изготовить тестовые камеры, плавающие электроды которых обладают различным объемным сопротивлением в широком диапазоне значений.
- Провести пучковые испытания загрузочных возможностей и временных характеристик изготовленных тестовых камер.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Изучены временные и загрузочные 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 загрузка, 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 загрузках до 160 кГц/см² (лучший мировой результат для камер данного типа на сегодняшний день).
- 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 BFTC, полученные на основе расчетов плотности потока частиц на плоскость детектора и вероятности двойных попаданий в регистрирующую ячейку.

Результаты вычисления плотности потока частиц

- Частота ион-ионных взаимодействий 10 МГц
- Использовался генератор событий SHIELD, преимуществом которого является генерация осколков столкнувшихся ядер, что важно для учета радиацинной нагрузке в передней области.
- Использовано 10⁴ событий (Minimum Bias) для каждого значения энергии пучка (2, 4, 6, 10, 25 ГэВ/нуклон) и позиции детектора (6, 8, 10 м от мишени).
- Рассчитаны плотности потока частиц разного сорта на плоскость детектора. Особое внимание уделено учету δ-электронов, множественность которых сильно зависит от количества вещеста перед детектором.
- Учтен обратный поток частиц, рожденных в веществе переднего каллориметра. Калориметр распологается ниже по пучку.

Результаты вычислений использованы в технической документации детектора ТОГ.



Определение оптимальной гранулярности детектора



Вероятность двойных попаданий в ячейку размерами 5×5 см² (сверху) и 2×2 см² (снизу) в центральной области детектора ТОF. Слева: энергия столкновений - 10 AGeV. Справа: энергия столкновений - 25 AGeV.

- Определена загрузка ячеек детектора различного размера при энергиях пучка эксперимента СБМ.
- Определена вероятность двойного попадания частиц в регистрирующую ячейку различного размера.

Оптимальным размером регистрирующей ячейки является размер 2х2 см². При таком размере ячейки выполняется вероятность двойных попаданий не превышает 2% при всех энергиях пучка, что удовлетворяет требованиям эксперимента СБМ.

Повышение загрузочной способности РППК

- Эффективность є пропорциональна- количеству зазоров и величине напряженности поля в зазоре E_{gap} = U/d
- Временное разрешение Tres ~ Egap
- Загрузочная способность зависит от мертвого времени детектора.

Падение напряжения при развитии лавины:

$$\mathbf{E}_{gap} = \mathbf{E}_{ap} - \mathbf{E}_{drop} = \mathbf{E}_{ap} - \mathbf{I} \cdot \mathbf{R} = \mathbf{E}_{ap} - \mathbf{q} \mathbf{\phi} \cdot \boldsymbol{\rho} \mathbf{d}_{el}$$

q – заряд лавины

- ф поток частиц
- *р* удельное сопротивление электродов

d_{el} – толщина электродов

Компромисс:

Больше R – выше E_{ар}, лучше Tres, хуже загрузочная способность

Меньше R – лучше загрузочная способность, хуже Tres



Кроме того, стеклянные электроды не удовлетворяют требованиям радиационной стойкости и старения с пропущенным зарядом.



Керамические РППК

- Число зазоров: 6
- Ширина зазора: 250 мкм
- Конструкция: З набора по 2 зазора
- Внешние электроды: керамика Al₂O₃
- Резистивный электрод: керамика SiC/Si₃N₄

Низкорезистивная керамика Si₃N₄/SiC может быть использована в жестких радиационных условиях, что доказано в испытаниях на нейтронных испытаниях. Удельное сопротивление керамики Si₃N₄/SiC может меняться в широком диапазоне от 10⁷ Ω·см до 10¹² Ω·см и может быть оптимизировано под условия работы детектора BFTC.





Повышение напряженности поля



Все электроды обладают канавкой в форме Роговского по периметру (внутренние электроды Si₃N₄/SiC — с двух сторон) для минимизации пробоев на краях.

Напряженность электрического поля на краях плоских пластин может быть сильно выше, чем в центре камеры. Эта проблема была изучена и решена Роговским в 20х годах прошлого века. Канавки в форме Роговского обеспечивают плавный спад поля на краях пластин, повторяя форму эквипотенциальной поверхности.

Эффекты старения

Газовое старение

Рабочей смесью выбрана смесь фреона C₂H₂F₄ и газа SF₆ в пропорциях 90%/10% или 95%/5%. Использование изобутана исключено в силу обнаруженного эффекта образования наростов (whiskers) на поверхности электродов.



Радиационное старение

Два образца низкорезистивной керамики подверглись неионизированному облучению в дозах 10¹³ n_{eq}/см² на нейтронном пучке в MEDAPP, (FRM II, Мюнхен). Удельное сопротивление образцов измерялось до и после облучения. Наблюдалось 40% уменьшение удельного сопротивления. Такое изменение не имеет влияние на конечное временное разрешение детектора. В случае керамики Al₂O₃ облучение до потоков величиной 10¹⁵n_{eq}/см² возможно без последующих изменений характеристик детектора.

Тестовый модуль

Сборка камер в оправке





Механически собранный модуль





Для пучковых испытаний керамических РППК были изготовлены одноканальный и восьмиканальный модули. Восьмиканальный модуль представляет собой газовый объем, в котором восемь ячеек расположены в ряд в шахматном порядке, так, что рабочая область составляет 2х16 см² без мертвых зон в перпендикулярном направлении.



Тестовый модуль

Название	Удельное сопротивление	Площадь рабочей поверхности
камеры	резистивного электрода	
mCRPC0	2.0·10 ¹⁰ Ω·cm	2x2 cm ²
mCRPC1	$3 \cdot 10^9 \Omega \cdot cm$	2x2 cm ²
mRPC2	5·10 ⁸ Ω·cm	2x2 cm ²
mCRPC3	7 · 10 ⁹ Ω·cm	2x2 cm ²
1	$1.4 \cdot 10^9 \Omega \cdot cm$	2x2 cm ²
2	$3.8 \cdot 10^9 \Omega \cdot cm$	2x2 cm ²
3	$3.8 \cdot 10^9 \Omega \cdot cm$	2x2 cm ²
4	$4.2 \cdot 10^9 \Omega \cdot cm$	2x2 cm ²
5	$4.2 \cdot 10^9 \Omega \cdot cm$	2x2 cm ²
6	6.6 · 10 ⁹ Ω·cm	2x2 cm ²
7	8.2 · 10 ⁹ Ω·cm	2x2 cm ²
8	$9.4 \cdot 10^9 \Omega \cdot cm$	2x2 cm ²
CRPC09	3.5x10 ⁹ Ω·cm	5х5 см ²
CRPC10	2.3x10 ¹⁰ Ω·cm	5х5 см ²
ITEP2	9·10 ⁹ Ω·cm	5х5 см ²
ITEP8	3·10 ⁸ Ω·cm	5х5 см ²

Был протестирован широкий диапазон удельного сопротивления плавающих электродов (10⁸- 10¹² Ω·см) для определения оптимального значения для условий работы детектора BFTC.

Измерения сопротивления электродов проводились в ИТЭФ и в Гельмгольц-Центре Дрезден-Россендорф (Германия).



Для проверки альтернативных вариантов собрана камера с резистивным электродов, изготовленным из низкорезистивного стекла.

Испытательные площадки

ELBE — линейный электронный ускоритель в Гельмгольц Центре Дрезден-Россендорф (HZDR, Германия)

Пучок: электроны 30 MeV один электрон в банче

+ Возможно менять поток частиц в широком диапазоне: от нескольких Гц/см² до 1 МГц/см².

+ Независимая временная привязка банчей.

- Рассеяние электронов в материалах установки.

CERN – Пучок пионов 5 ГэВ

+ почти нет перерассеивания адронов

- низкий поток частиц, несколько кГц/см²



Экспериментальная установка на ускорителе ELBE.

Gas: 90% freon + 10% SF6. Electronics: MAX3760 preamplifier + CAEN TDC. Start system resolution about 35 ps.

Результаты: Счетная характеристика

Электроды, оставшиеся после ALICE TOF R&D. 5x5 см² Испытания с плоскими плавающими электродами (без канавки): камеры невозможно вывести в рабочий режим из-за большого количества разрядов на краях камеры, плато отсутствует.



Новые электроды размером 2x2 cm². Все электроды имеют канавку Роговского.

Эффективность на уровне ~96-98% на протяжении широкого плато. Для камеры 5·10⁸ Ом·см плато вновь отсутствует из-за резкого роста числа стримеров с ростом поля.

Результаты: Счетная характеристика

Результаты измерений на ускорителе в ЦЕРН систематически выше благодяра гораздо меньшему перерассеянию пионов с энергией 3 ГэВ, по сравнению с мягкими электронами с энергии 30 МэВ. Наблюдалась геометрическая зависимость эффективности порядка 1-2% от положения камеры на пучке и материала триггерных счетчиков, что является систематической ошибкой измерений.

Результаты гибридной камеры со стеклянным плавающим электродом хорошо совпадают с результатами керамической камеры с сопротивлением порядка 2·10¹⁰Ω·см.



15

Результаты: Загрузочная кривая



В камерах с удельным сопротивлением величиной **1.4** и **3 · 10⁹ Ω · см** наблюдался слишком высокий при высокой загрузке (> 150 кГц/см²): 0.5 – 1 µА и стримеры даже при низкой загрузке. Таким образом, гашение в этих камерах не достаточное. В остальных камерах ток ниже предела измерения (10 нА) даже при высокой загрузке.

Результаты гибридной камеры со стеклянным плавающим электродом хорошо совпадают с результатами керамической камеры с сопротивлением порядка 2·10¹⁰ Ω·с<u>м.</u>

Результаты: Временное разрешение



Временное разрешение на уровне **70-120 пс.** Результаты сильно зависят от условий измерений (пробный DAQ на FPGA, флуктуации интенсивности пучка, значительный уровень дрожания электроники). Требуется повторное измерение с конечной электроникой!

Результаты: Амплитудный спектр камер

Амплитудные спектры камер при загрузке около 5 кГц/см² и рабочем напряжении 4.4 кВ (88 кВ/см).



Средняя амплитуда в камере с наименьшим сопротивлением выше, чем в других камерах. Это является следствием наличия стримеров в камере с низким сопротивлением электродов даже при низкой загрузке. Спектры в остальных камерах различаются не значительно, что говорит о высоком качестве сборки камер.

Прототип многоканальной системы (мини-модуль)

Функции внутренней платы:

- основа для механического крепления камер в газовом объеме модуля;
- разведение линий подачи высокого напряжения и сигнальных линий;
- формирование сигнала камер для дальнейшей подачи его в усилитель PADI.







Предусилитель

~5 нс импульс (дифференцированный для предотвращения наложений при больших загрузках). Передний фронт ~ 1.1 ns + 100 Ω дифференциальный драйвер для совмещения с входом усилителя PADI.

Прототип многоканальной системы (мини-модуль)



Оценка уровня перекрестных наводок: менее 1.2% для всех камер в мини-модуле

Заключение

Основные результаты исследовательской работы можно сформулировать следующим образом:

- изучены временные и загрузочные характеристики РППК в широком диапазоне объемного сопротивления плавающих электродов и впервые экспериментально получена величина минимально возможного сопротивления резистивного электрода (~4·10⁹ Ом·см), т.е. по сути определена предельная загрузка, при которой принципиально возможна работа данного типа детекторов;
- разработан времяпролетный детектор, способный регистрировать время пролета частиц с разрешением на уровне 80 пс и эффективностью выше 90% при счетных загрузках до 160 кГц/см² (лучший мировой результат для камер данного типа на сегодняшний момент);
- собраны и испытаны прототипы многоканальных модулей детектора
- детально измерены амплитудные спектры камер различного сопротивления
- с помощью компьютерного моделирования определены оптимальные размеры регистрирующей ячейки детектора BFTC в эксперименте CБМ, рассчитаны плотность потока частиц на плоскость детектора и вероятность двойных попаданий в регистрирующую ячейку.

Апробация работы и публикации

Материалы, изложенные в работе, опубликованы в 4 статьях, которые удовлетворяют требованиям ВАК:

- 1. A. Akindinov, ..., R. Sultanov, «Radiation-hard ceramic Resistive Plate Chambers for forward TOF and TO systems», Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2017, 845, 203-205
- 2. A. Akindinov, ..., R. Sultanov, «Radiation hard ceramic RPC development», Journal of Physics: Conference Series, 2017, 798, 012136
- 3. R. Sultanov et. al., «A timing RPC with low resistive ceramic electrodes», Journal of Instrumentation, 2019, Volume 14, C09007
- 4. Р. Султанов, «Разработка резистивных плоскопараллельных камер на основе радиационно-стойкой керамики», Ядерная физика и инжиниринг, том 8, № 3 (2017), 460-465

Результаты работы представлялись на различных конференциях:

- 1. R.Sultanov, "Radiation hard ceamic 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.
- 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.

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».