

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики  
им. А. И. Алиханова

На правах рукописи

Акиндинов Александр Владимирович

ГАЗОВЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ КАМЕРЫ  
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ МЕТОДОМ ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007г.

УДК 539.12

Работа выполнена в ГНЦ РФ «Институт Теоретической и Экспериментальной Физики» им. А. И. Алиханова

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук Киселев Ю.Т.  
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук Комаров В.И.  
(ОИЯИ, г. Дубна)

кандидат физ.-мат. наук Акимов Д.Ю.  
(ГНЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

Ведущая организация: Институт общей и ядерной физики  
РНЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Защита состоится «09» октября 2007 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д.201.002.06 в конференц-зале ГНЦ РФ ИТЭФ по адресу: г. Москва, ул. Б. Черемушкинская д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНЦ РФ ИТЭФ

Автореферат разослан «07» сентября 2007 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
кандидат физико – математических наук

/ \_\_\_\_\_ / Васильев В.В.

# 1. Общая характеристика работы

## 1.1 Актуальность темы

Исследование ядро-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях направлено на изучение экстремального состояния вещества при высоких температурах и (или) плотностях, на поиск новых форм адронной материи. Для проведения таких исследований необходимы детекторы нового поколения, способные к идентификации большого числа частиц. Важным элементом систем идентификации являются детекторы времени пролета. Разработка и создание детектора, обладающего такими свойствами как:

- высокая гранулярность при большой площади
- способность работать в сильных магнитных полях
- высокая эффективность регистрации
- хорошее временное разрешение

являются актуальной задачей.

## 1.2 Цель диссертационной работы

Диссертация посвящена исследованию свойств газовых Резистивных Плоско- Параллельных Камер (РППК) и возможности их использования для идентификации частиц методом времени пролета. Первой целью работы являлось получение высокого временного разрешения ( $\sigma < 100$  пс.) в камерах с плоско-параллельной геометрией, работающих в режиме насыщенной лавины. Для этого было изучено влияние на временные характеристики конструкции камеры, материала электродов, величины и количества зазоров, состава газовой смеси. Второй целью исследования было повышение грузочной способности и радиационной стойкости РППК путем использования различных низкорезистивных материалов. Третья цель работы – поиск оптимальных способов интеграции РППК в большие модули и измерение характеристик больших времяпролетных систем.

## 1.3 Научная новизна и практическая ценность

До середины 90-х годов не существовало иной технологии времяпролетных измерений для идентификации частиц кроме использования сцинтилляционных счетчиков на основе ФЭУ. Для проведения экспериментов на новых ускорителях, таких как LHC [1], SIS-100/300 (FAIR-проект) [2], RICH, необходима принципиально новая методика, позволяющая создавать идентификационные плоскости площадью не менее  $100 \text{ м}^2$  и работающая в сильном магнитном поле с временным разрешением лучше 100 псек.

Изложенные в диссертации результаты исследований показали, что РППК, работающие в режиме насыщенной лавины, полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к времяпролетным системам нового поколения.

Успешно решены вопросы интеграции детектора в большие системы, найдены способы увеличения загрузочной способности и радиационной стойкости РППК. На основе этой методики создается времяпролетная система установки ALICE [3-6]. Использование аналогичных систем планируется в экспериментах CBM и STAR.

#### **1.4 Положения, выносимые на защиту**

1. Методика и результаты измерений временного разрешения и эффективности РППК для различных типов конструкций камер и газовых смесей.
2. Результаты исследований различных низкорезистивных материалов, направленных на повышение загрузочной способности и радиационной стойкости РППК.
3. Модульный принцип организации больших идентификационных плоскостей и результаты измерений параметров двух различных модулей-прототипов, реализация времяпролетной системы для эксперимента ALICE.

#### **1.5 Личный вклад диссертанта**

Диссертант внес существенный вклад в развитие методики временных измерений Газовыми Плоско-Параллельными Камерами. Он участвовал в организации пучков для тестирования РППК в ИТЭФ и CERN, в сборке различных типов детекторов и модулей прототипов. Диссертантом проведена значительная часть измерений и обработки их результатов, подготовка публикаций и докладов на конференциях.

#### **1.6 Апробация работы и публикации**

Результаты работы докладывались на 5-й, 7-й и 8-й международных конференциях «Resistive Plate Chambers and Related Detectors» (Бари, Италия 28-29 октября 1999г; Клермон-Ферране, Франция 26-27 июля 2003г; Сеуле, Корея 10-12 октября 2005г) и на VIII международной конференции «Instrumentation for Colliding Beam Physics» (Новосибирск, Россия, 28 февраля-6 марта 2002года).

Диссертация основана на результатах работ, опубликованных в период с 2000 по 2007 год в журналах «Nuclear Physics B», «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research», в материалах международных конференций и проектной документации экспериментов ALICE и CBM.

#### **1.7 Объем и структура диссертации**

Работа изложена на 52 страницах; состоит из введения, четырех глав и заключения; включает 38 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 20 наименований.

## 2. Содержание работы

Во **введении** к диссертации изложены основные направления исследований ядро-ядерных взаимодействий на современных и строящихся ускорителях [1]. На примере детектора ALICE показана необходимость эффективной регистрации и надежной идентификации максимального числа вторичных частиц, несущих важную информацию о свойствах и динамике систем, образованных в ион-ионных столкновениях; эволюции их температуры и плотности, о возможном фазовом переходе адронной материи в кварк-глюонную плазму.

Создание новой времяпролетной методики продиктовано требованиями высокого временного разрешения, значительного увеличения площади и гранулярности идентификационных систем, возможностью их использования в сильных магнитных полях. Применение традиционного метода временных измерений на основе сцинтилляторов и фотоумножителей в этих условиях становится невозможным как по техническим, так и финансовым причинам. Времяпролетные модули установки ALICE с общей площадью  $150 \text{ м}^2$ , содержащие 158000 ячеек РППК, позволят с высокой эффективностью регистрировать до 15000 частиц и идентифицировать их в диапазоне импульсов от 0.8 до 2.5 ГэВ/с. [1].

В **первой главе** кратко описаны основные режимы работы газовых камер с плоской геометрией. Рассмотрен механизм образования электронной лавины, ее переход в стример и анализируются факторы, влияющие на эффективность и временное разрешение детектора. Обсуждаются требования, предъявляемые к газовым смесям и механическим характеристикам камер. Показано, что использование резистивных слоев обеспечивает в широком диапазоне напряженности электрического поля режим насыщенной лавины с минимальным процентом стримеров и позволяет создать высокоэффективные камеры с временным разрешением менее 100 псек.

На рис.1 показана схема ППК с одним газовым зазором, который образован двумя плоскопараллельными электродами, и развитие разряда в ней. После прохождения ионизирующей частицы через газовый зазор вдоль её трека образуются кластеры первичной ионизации. Под воздействием внешнего электрического поля из первичной ионизации начинает развиваться лавинный разряд. Это приводит к возникновению индуцированного заряда на электродах ППК. Количество электронов  $n$  при развитии лавины будет возрастать по

направлению от катода к аноду в результате ударной ионизации, характеризуемой коэффициентом ударной ионизации  $\alpha$  и убывать вследствие захвата электронов с коэффициентом  $\eta$ . Соответственно будут изменяться количества положительных  $p$  и отрицательных  $N$  ионов:

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

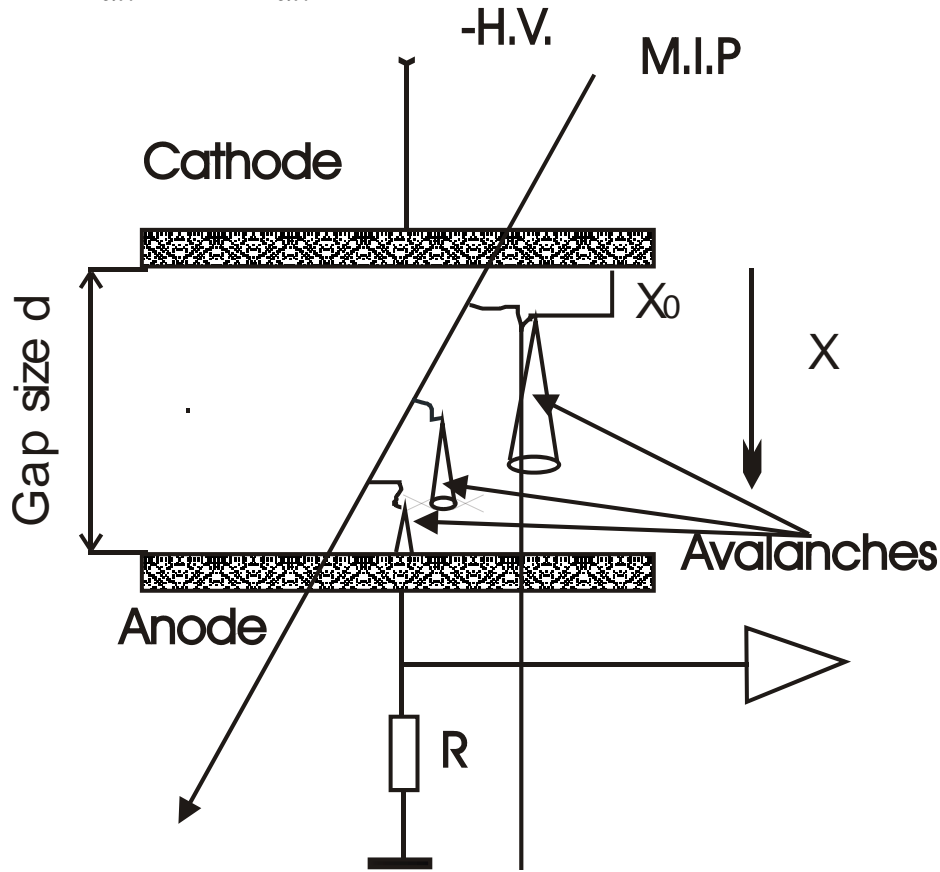


Рис. 1. Схема ППК и развития разряда в ней.

Полное число электронов при прохождении расстояния  $x = v^* t$ , где  $v$  – скорость развития лавины и  $t$  – время развития лавины, будет определяться как:

$$n(x) = e^{(\alpha - \eta)x}, \quad p(x) = \frac{\alpha}{(\alpha - \eta)} (e^{(\alpha - \eta)x} - 1) \quad N = p - n. \quad (2)$$

Индукированная быстрая компонента тока (движением ионов за время развития лавины пренебрегается) и индуцированный заряд за время дрейфа из точки образования кластера  $x_0$  с  $N_0$  электронами первичной ионизации будет выражаться в виде:

$$i^{ind} = -v E_w q e^{(\alpha - \eta)vt} N_0, \quad Q = \int_0^T i^{ind} dt = \frac{q E_w N_0}{(\alpha - \eta)} (e^{(\alpha - \eta)^*(d - x_0)} - 1), \quad T = \frac{d - x_0}{v}. \quad (3)$$

Разброс времен сбора порядка  $(d/v)$ .

Полный сигнал будет определяться суммой от всех кластеров, распределенных в зазоре по вероятности Пуассона со средним числом  $\lambda * d$ , где  $\lambda$  – плотность первичных кластеров. Плотность вероятности распределения заряда  $Q$  для  $j$  кластера, считая от катода, дается формулой:

$$P(Q) \sim B^{-\lambda/(\alpha-\eta)} \left( \frac{\lambda}{(\alpha-\eta)} \right)^j Q^{\frac{\lambda}{(\alpha-\eta)}-1} \quad B = \frac{qN_0 E_w}{(\alpha-\eta)} \quad (4)$$

Для реальных условий высоких напряженностей поля  $(\alpha-\eta) \gg \lambda$  вклад в детектируемый сигнал дает лишь один кластер, ближайший к катоду, поэтому зона детектируемых сигналов не превышает примерно половины зазора. Это обстоятельство значительно улучшает временное разрешение, но создает проблему с эффективностью. Распределение сигналов и временное разрешение в этом случае имеют вид:

$$P(Q) \sim \frac{1}{Q} e^{-\frac{Q}{Q_{thr}}} \quad t(Q) \sim \frac{1}{(\alpha-\eta)v} \ln \frac{Q}{Q_{thr}} \quad \sigma(t) \sim \frac{k}{(\alpha-\eta)v}, \quad (5)$$

где  $k=f(d,\lambda)$ . Дополнительного улучшения характеристик можно добиться, суммируя сигналы с нескольких зазоров. Это полностью решает проблему с эффективностью и улучшает временное разрешение за счет усреднения точки образования первого кластера.

Работы группы ИТЭФ по ППК полностью подтвердили сделанные выше выводы. Для двухзазорной камеры с размером зазора 0.6 мм. было получено разрешение на уровне 200 пс. и эффективность регистрации более 93 % (рис. 2.).

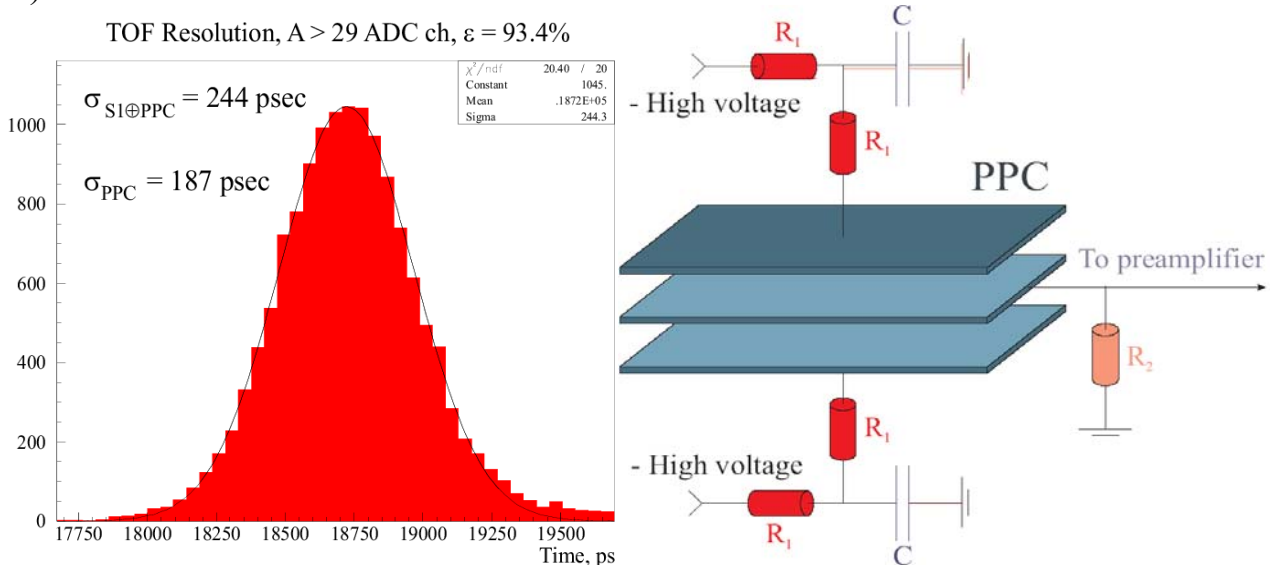


Рис. 2. Временное разрешение и эффективность регистрации для двухзазорной ППК с зазором 0.6 мм.

Дальнейшее улучшение разрешения возможно при дальнейшем увеличении приложенного поля и уменьшении величины зазора, но в этом

случае при величине  $(ad) \sim 20$  происходит переход разряда в искровой режим, приводящий к пробое электроники и появлению полимеризационной пленки на поверхности электродов.

Решением проблемы является использование резистивных электродов с наличием локального RC контура, который не позволяет развиваться искре. Данная камера может работать как в режиме насыщенной лавины, когда поле объемного заряда сравнимо с внешним, так и стримерном. Но для стримерного режима, несмотря на высокое временное разрешение  $\sigma < 30$  псек. (скорость развития лавины на порядок больше лавинного режима), во временном спектре справа появляется длинный «хвост», связанный с разбросом времени лавинно-стримерного перехода. На рис. 3. показан временной спектр детектора Пестова и два импульса, соответствующие разным временам перехода лавинного импульса (малый предимпульс на нижней осциллограмме) в стримерный. Это обстоятельство делает невозможным использование этого режима для разделения двух различных частиц с одинаковыми импульсами и близкими массами, когда количество частиц с большей массой составляет 10-15 % от количества частиц с меньшей массой ( $\pi$  и K мезоны). Руководствуясь этим, с 1998 года все работы по созданию детектора для времяпролетных измерений ведутся только с детекторами в насыщенной лавинной моде, предложенными группой ИТЭФ.

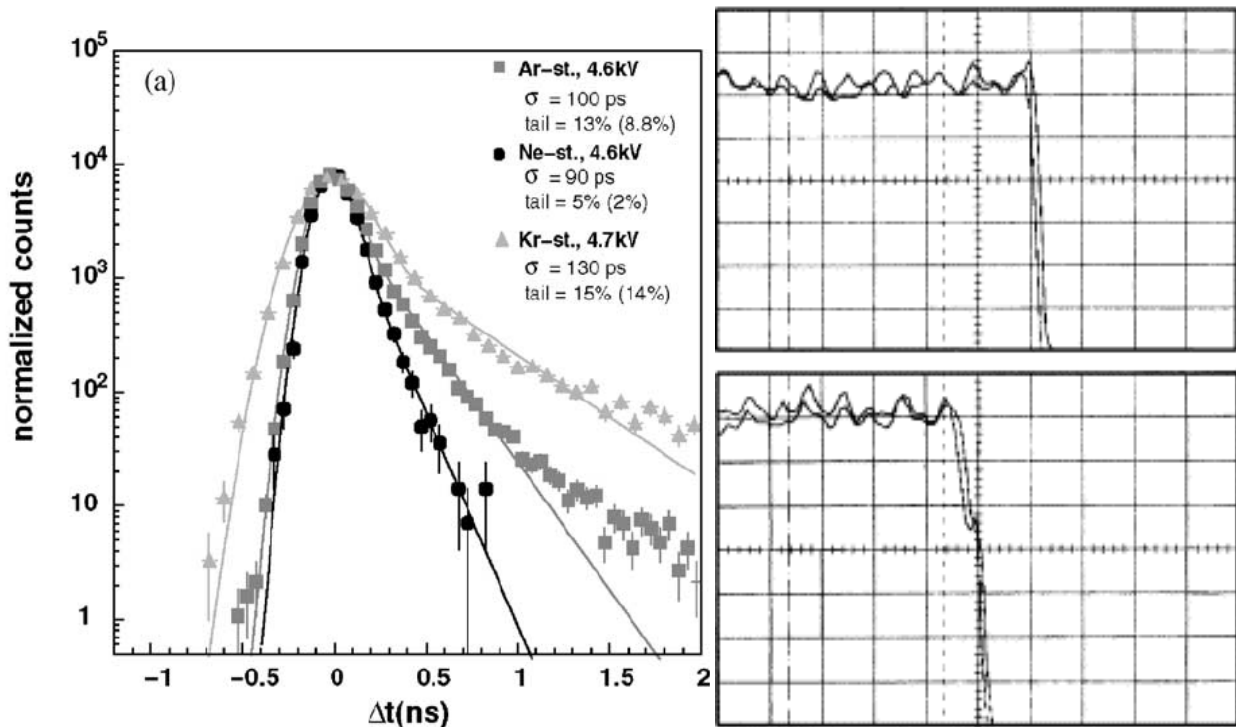


Рис. 3. Временной спектр детектора Пестова и эффект, приводящий к появлению «хвостов» (порог регистрации выставлен по стримерному импульсу).

Неизменность поля в зазоре, обеспечивающая постоянство скорости дрейфа и отсутствие стримеров на локальных неоднородностях, накладывает требования к материалам электродов. При работе в полях более 50 кВ/мм плоскостность и шероховатость поверхности должны быть не хуже 5 микрон для камеры с зазором менее 400 микрон. Данному требованию отвечают только электроды, выполненные на стеклянных и керамических подложках. Это определяет две возможные конструкции камеры, представленные на рис. 4. В первом случае само полупроводящее стекло ( $10^{13}$  Ом\*см) содержит локальный RC контур (RPC, РППК), во втором контур создается напылением резистивного материала SiC (DRPC, ДРПК) [3,7,8].

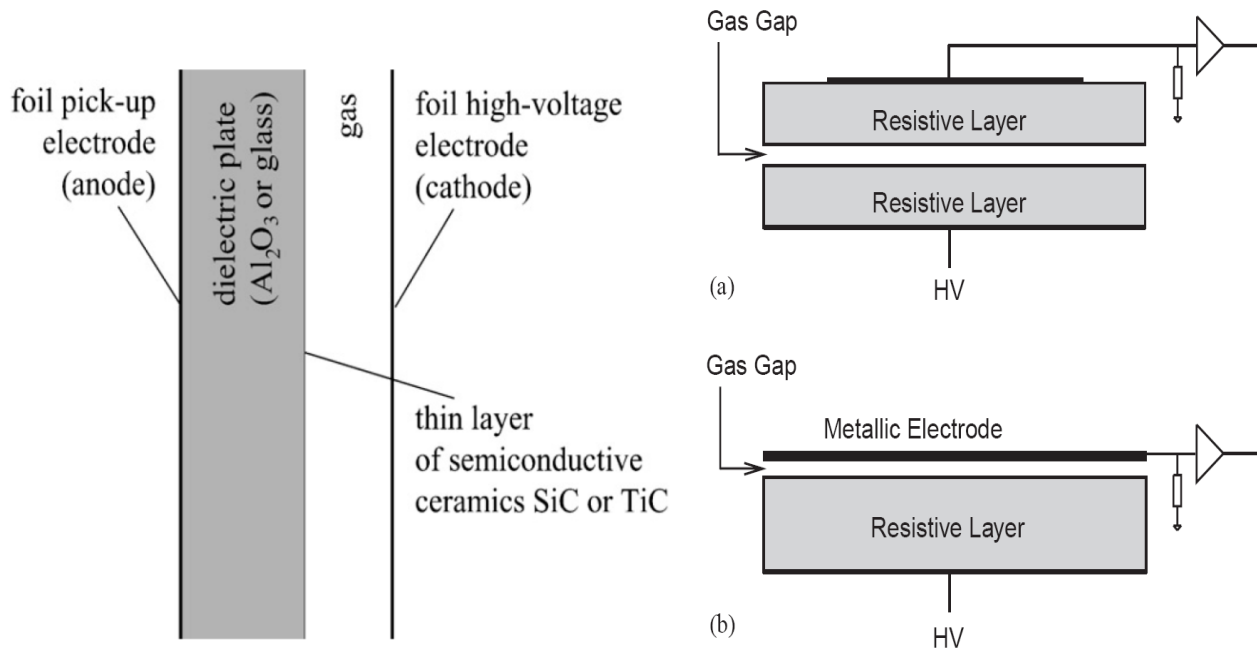


Рис. 4. Два метода создания локального гасящего RC контура: слева ДРПК, справа два варианта РППК с резистивным (а) и металлическим катодами (б).

Во **второй** главе описываются методика и результаты измерений эффективности регистрации и временного разрешения РППК со стеклянными электродами в зависимости от величины и количества зазоров, состава газовой смеси. По результатам измерений выбран оптимальный детектор с точки зрения величины разрешения, эффективности, точности сборки и стоимости. Измерение характеристик камер проводилось в ИТЭФ на пучке 223 и в ЦЕРН на пучке T10. Пучки были оборудованы стартовыми системами на основе сцинтилляционных детекторов для получения опорного временного сигнала с разрешением 50 псек. в ИТЭФ и 30 псек. в ЦЕРН, триггерными счетчиками и пропорциональными камерами для мониторинга положения пучка и сбора координатной информации. Камера, схематично изображенная на рис. 5, была помещена в алюминиевый бокс с тонкими входными стенками из фольги [4].

Толщина внешних стекол составляла 620 микрон, внутренних 350 микрон. Зазор задавался с помощью отрезков рыболовной лески толщиной от 300 до 200 микрон. Количество зазоров варьировалось от 2 до 3 в каждой половине камеры. По графитовой пленке подавалось симметричное биполярное напряжение общей величиной до 13 кВ [3].

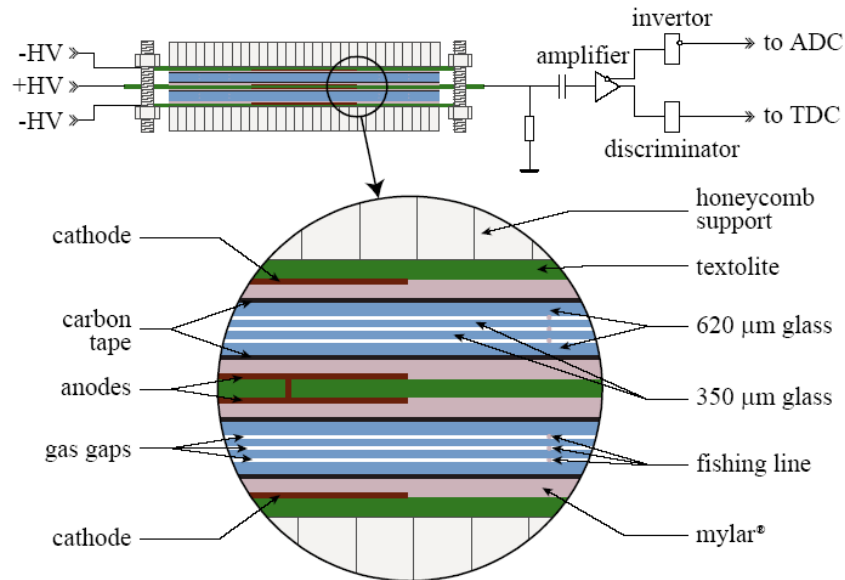


Рис. 5. Конструкция и фотография тестовой РППК.

Сигнал с камеры поступал на быстрый усилитель с временным джиттером менее 15 псек. во всем диапазоне входных зарядов. Усиленный сигнал раздваивался: один сигнал подавался на вход АЦП, другой после дискриминатора с регулируемым порогом - на вход ВЦП. Эффективность регистрации минимально ионизирующих частиц измерялась как отношение количества событий во временном окне 5 нс. к полному числу событий.

Полиномиальная коррекция по зарядовому спектру использовалась для восстановления временного разрешения РППК. Разрешение стартовой системы квадратично вычиталось из полученного разрешения. Камера наполнялась смесью 90% $C_2H_2F_4$  + 5% iso- $C_4H_{10}$  + 5%  $SF_6$ . На рис. 6. приведены эффективность и временное разрешение для всех испытанных вариантов камеры.

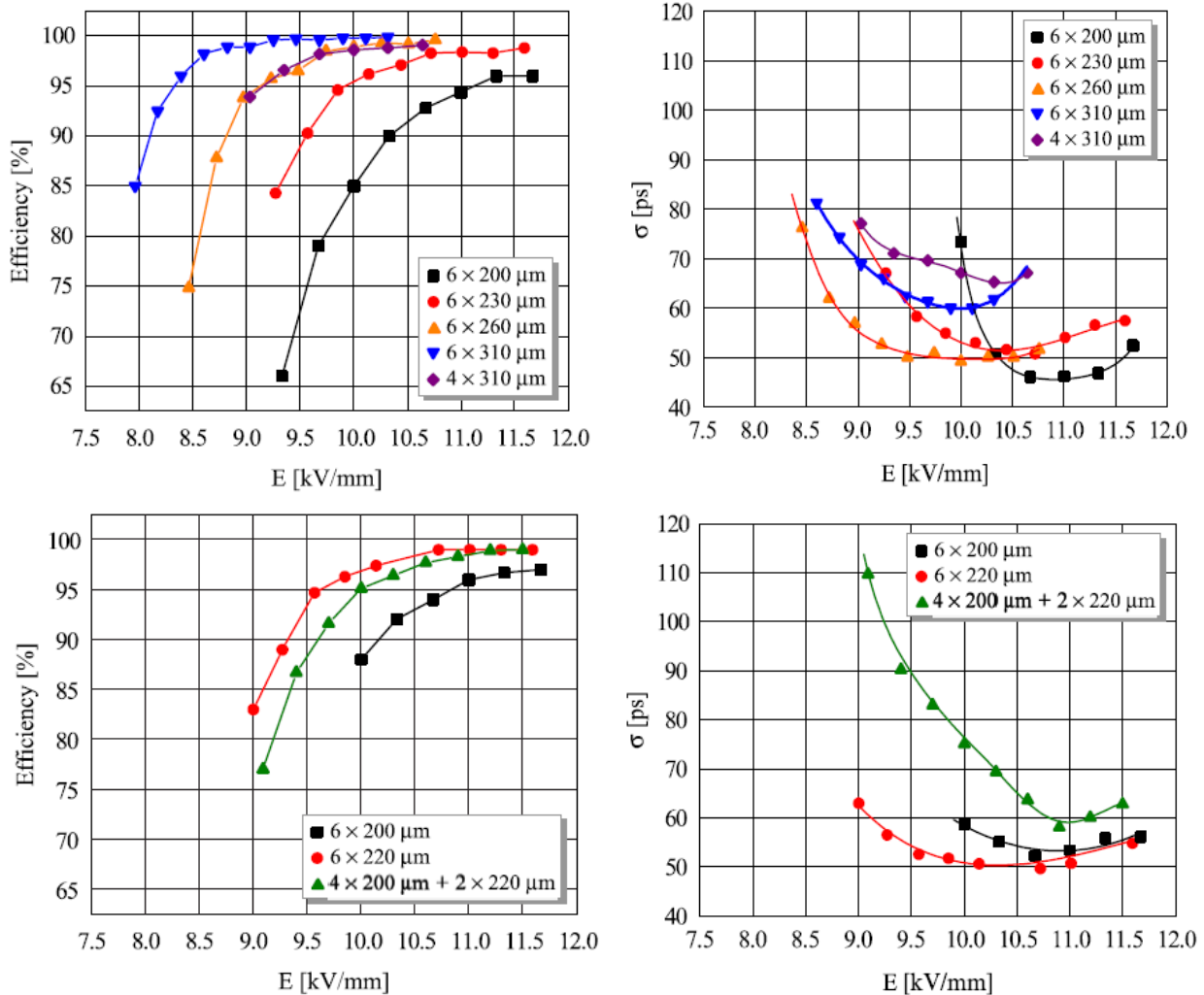


Рис. 6. Временное разрешение и эффективность регистрации для различных типов РППК.

Из рис. 6. видно, что оптимальными с точки зрения величины разрешения и ширины плато (до 1 кВ/мм) являются шестизазорные камеры с величинами зазоров 230-260 микрон.

Для выяснения влияния точности сборки на временное разрешение во второй серии измерений были повторно собраны: камера с зазором 200 мкм, с зазором 220 мкм и камера, в каждой половине которой один из зазоров имел величину 220 мкм, а два других имели зазор 200 («гибридная» камера). На рис.

6. представлено временное разрешение для трех вариантов камер. Временное разрешение для камер с зазором 200 и 220 мкм совпало с результатами предыдущих измерений с точностью лучше 10 пс. «Гибридная» камера из-за различных величин  $(\alpha-\eta)$  и  $\nu$  имела худшее разрешение и, что более важно, у нее отсутствовало плато во временном разрешении. Результаты измерения показали, что точность сборки камер должна быть не хуже 10 микрон. Чтобы избежать трудностей, связанных с контролем толщины лески при массовом производстве камер для эксперимента ALICE, было решено увеличить число зазоров в каждой половине камеры до 5.

С целью оптимизации газовой смеси для камер эксперимента ALICE (10 зазоров с величиной 250 микрон) по аналогичной методике были проведены испытания с различными концентрациями отдельных компонентов. На рис. 8. представлены эффективность и временное разрешение РППК в зависимости от концентрации  $C_2H_2F_4$ , iso- $C_4H_{10}$  и  $SF_6$  [9].

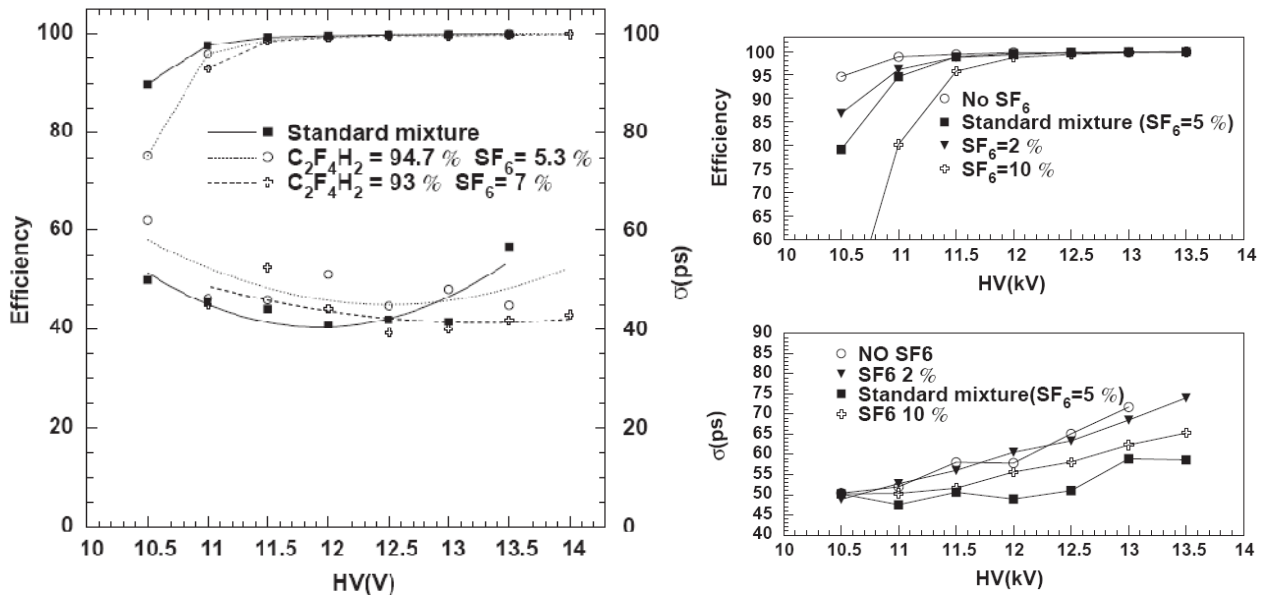


Рис. 8. Временное разрешение и эффективность для различных газовых смесей.

Измерения показали [9], что за счет небольшого увеличения рабочего напряжения можно без ухудшения характеристик камер отказаться от использования горючего iso- $C_4H_{10}$ , что существенно удешевляет газовую систему и крайне важно с точки зрения безопасности.

После выбора газовой смеси камера была облучена дозой эквивалентной 10 годам работы эксперимента ALICE. Тесты после облучения не выявили изменений эффективности регистрации и временного разрешения в пределах систематических ошибок.

В **третьей** главе приведены результаты исследований, направленных на улучшение загрузочной способности и радиационной стойкости РППК. Для

коммерчески выпускаемого стекла с резистивностью  $10^{13}$  Ом\*см. эффективность и разрешение камер быстро ухудшается уже при нагрузках  $1$  кГц/см<sup>2</sup>. Решением является использование ДРППК, где в зависимости от толщины напыления SiC возможно получить резистивность от  $10^3$  до  $10^{12}$  Ом/□. На рис. 9. приведена зависимость величины временного разрешения ДРПК (4 зазора по 300 микрон) с резистивностью  $10^{10}$  Ом/□ от загрузки.

Использование ДРППК (4 зазора по 300 мкм) позволяет разделить  $\pi$  и К мезоны на уровне  $3\sigma$  при временном различии между ними 800 псек. Материалы ДРПК обладают высокой радиационной стойкостью, что является дополнительным аргументом при использовании ее в экспериментах с высокой загрузкой [7].

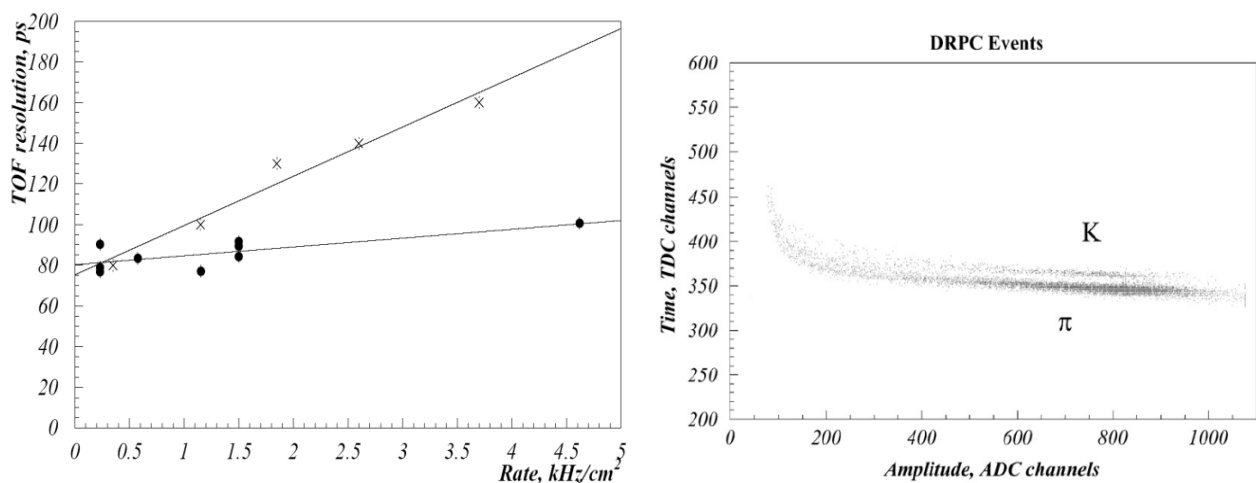


Рис. 9. Временное разрешение в зависимости от загрузки для камер со стеклянными электродами ( $2 \cdot 10^{13}$  Ом\*см.) и ДРППК ( $10^{10}$  Ом/□) и разделение  $\pi$  и К мезонов ДРПК при загрузке  $5$  кГц/см<sup>2</sup>.

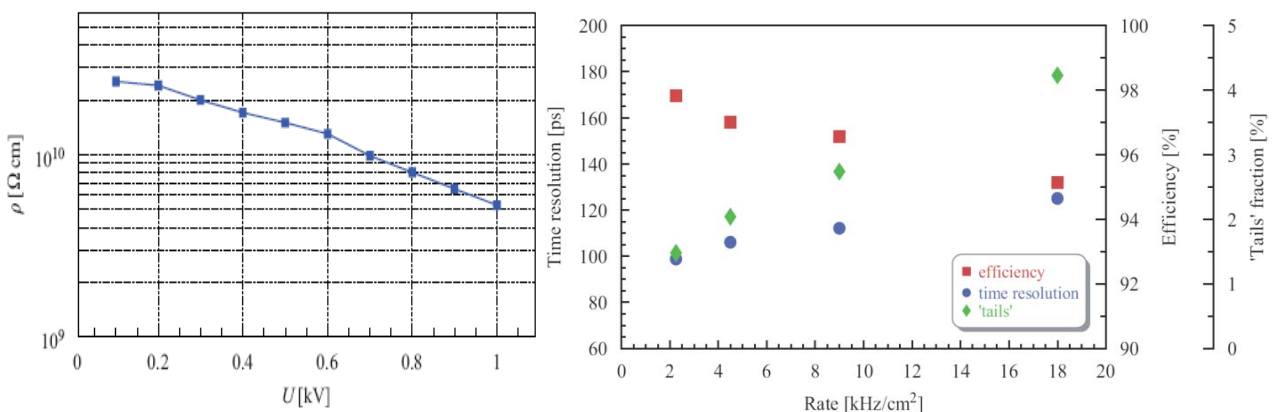


Рис. 10. Зависимость сопротивления низкорезистивного фосфатного стекла от поданного на электрод напряжения и эффективность регистрации, временное разрешение и процент событий вне гауссова пика в зависимости от загрузки.

В качестве альтернативного подхода была также испытана аналогичная камера на экспериментальном фосфатном стекле с низкой резистивностью. Камера дала худшие результаты ( $\sigma > 100$  псек.) при высоком уровне собственных шумов (рис. 10.) [10].

В отличие от коллайдерных экспериментов, в экспериментах с фиксированной мишенью загрузки возрастают на несколько порядков. Поэтому ДРПК и камеры на основе низкорезистивного стекла на сегодняшний день являются наиболее реальными кандидатами для использования в центральной части времяпролетной системы детектора CBM.

В четвертой главе описываются результаты измерений характеристик модулей на основе РППК, и приводится общий вид времяпролетной системы, построенной для эксперимента ALICE.

Были проведены исследования двух типов организации системы: в виде отдельных ячеек и в виде сплошных стекол со считывающими падами. Первый 32 - канальный модуль (рис 11) был собран в виде двухслойной шахматной структуры из отдельных РППК (4 зазора по 300 мкм) [8]. Интеграция не привела к существенному ухудшению характеристик по сравнению с одиночными камерами (90 псек. в модуле и 75-80 псек. для одиночной камеры). Временное разрешение и вероятность появления перекрестных наводок (cross-talks) приведены на рис. 11.

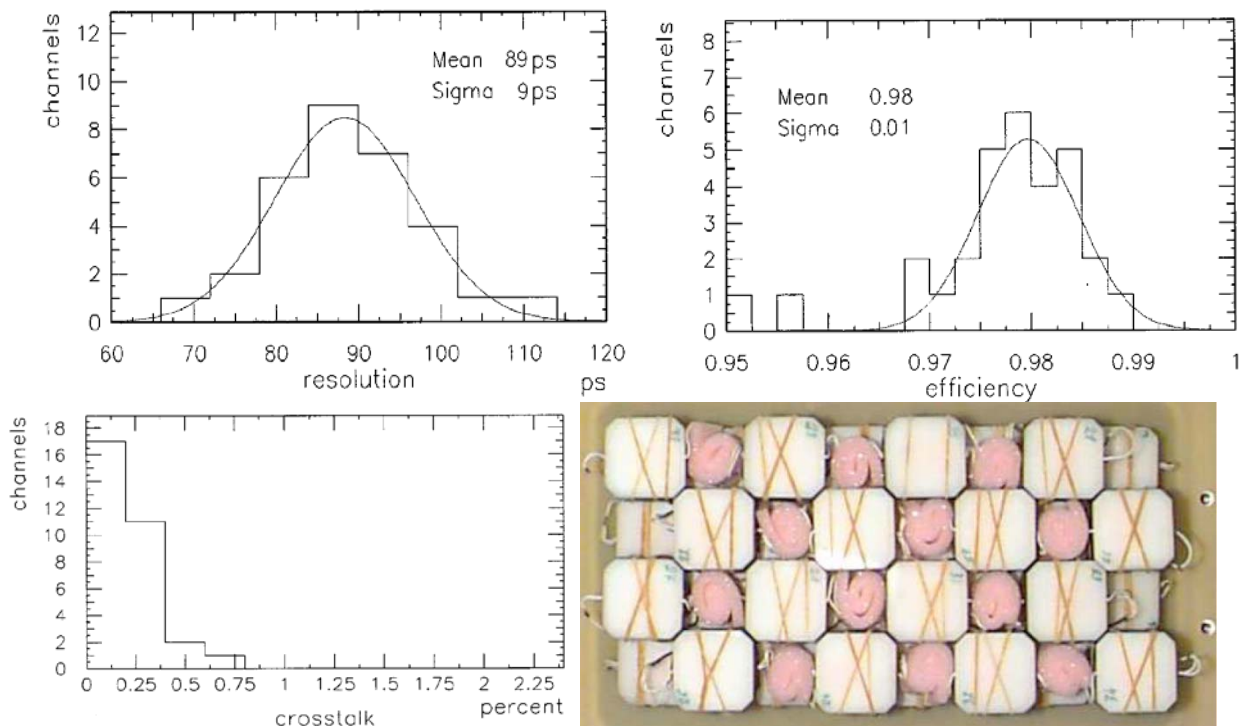


Рис. 11. Временное разрешение, эффективность, перекрестные наводки и фотография расположения камер в первом слое 32-канального модуля РППК

Значение наводок не превысило 1%. Это значение крайне важно при проводке трекров в системе, работающей в режиме срабатывания большого числа каналов в каждом событии. Данный вариант интеграции камер предложен для центральной части времяпролетной системы детектора СВМ.

Второй вариант интегрированного модуля представлен на рис. 12. Он представляет собой камеры на сплошных стеклянных электродах размером 70 на 1200 мм, аналогичные испытанным ранее (на рис 5). Для создания зазора через каждые 2.5 см. проложена рыболовная леска толщиной 250 мкм. Дифференциальное считывание осуществляется с анодных и катодных падов размером 2.5 x 3.5 см<sup>2</sup>. Для предотвращения краевых пробоев внешние стекла имеют размер 80 мм [4].

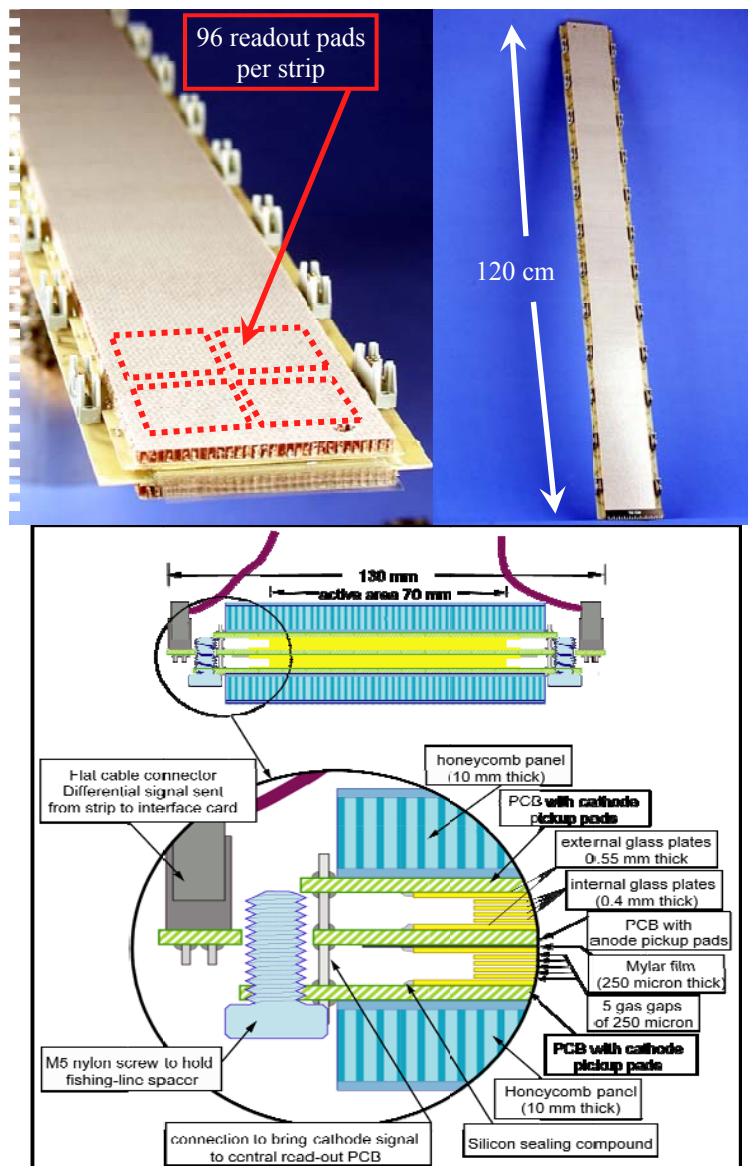


Рис. 12. Конструкция и общий вид расположения падов во втором модуле на РППК.

По сравнению с предыдущей, данная конструкция имеет значительно больший процент перекрестных наводок из-за разделения заряда между падами, но более проста в сборке. На рис 13. приведены данные по временному разрешению в зависимости от поданного напряжения (30 падов модуля) и временное разрешение для 152 падов модуля ( $U=12.5$  кВ) [11]. На рис 14. приведены поведения временного разрешения, эффективности регистрации и перекрестных наводок в области между падами [9].

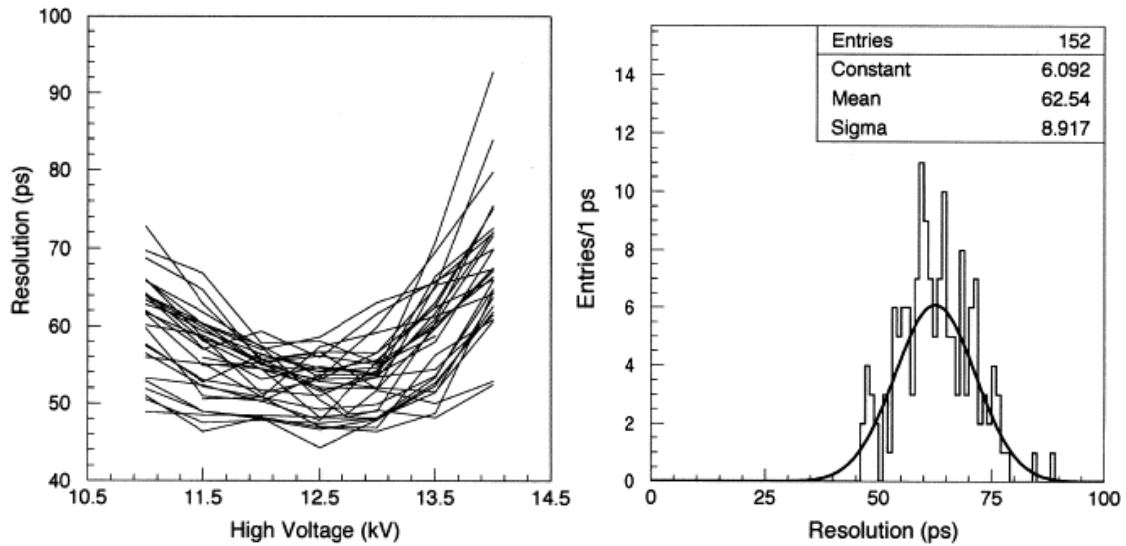


Рис. 13. Зависимость временного разрешения от напряжения для 30 падов модуля и типичное временное разрешение для 152 падов модуля при напряжении  $U=12.5$  кВ.

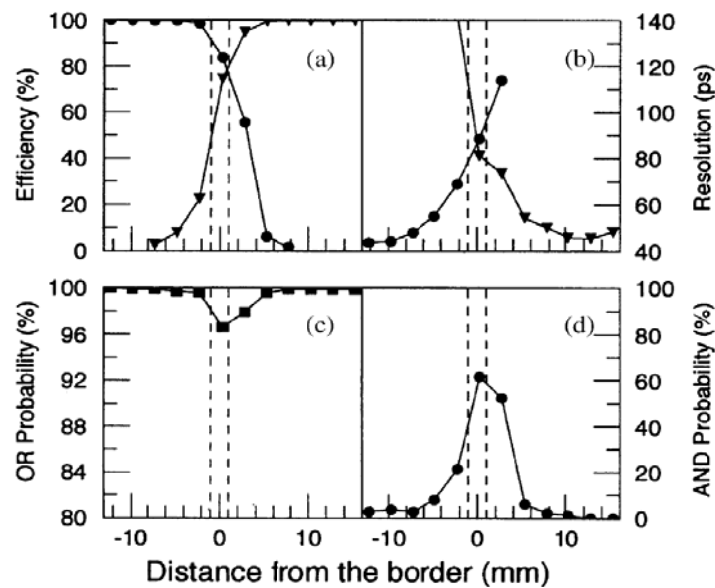


Рис. 14. Зависимости эффективности (a), разрешения (b), вероятности сигнала «ИЛИ» (c) и перекрестных наводок при сканировании области между падами.

Полученная эффективность регистрации более 95 процентов, временное разрешение  $\sim 60\text{-}70$  псек. и перекрестные наводки на уровне 16% признаны удовлетворяющими для времяпролетной системы детектора ALICE [4-6]. В настоящее время собрано все 1680 модулей и идет тестирование и установка системы в детектор (рис 15) [11].

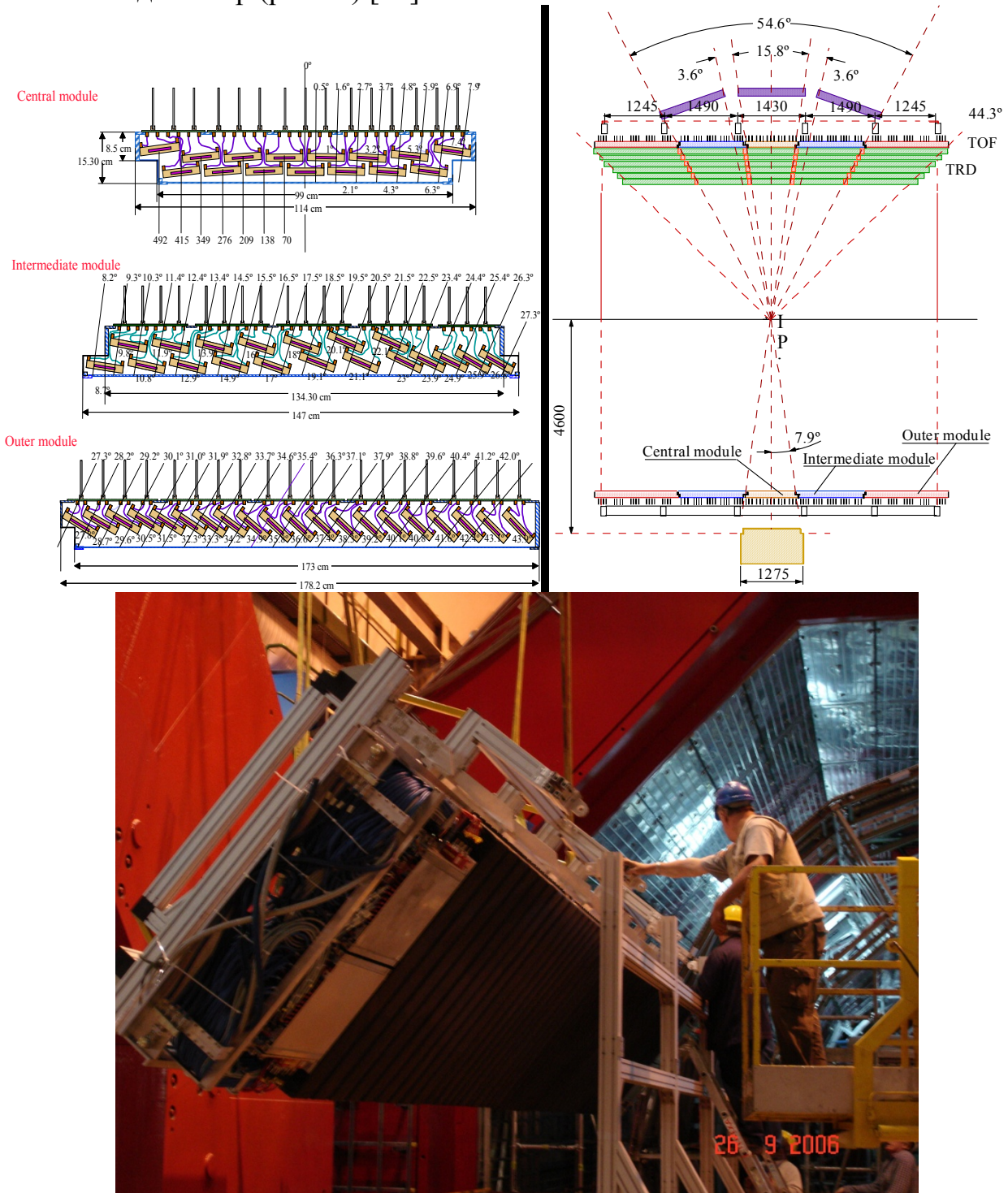


Рис. 15. Общий вид расположения модулей в супермодуле детектора ALICE и установка супермодуля в магнит L3.

**В заключении** кратко изложены основные результаты работы:

1. Проведена работа по оптимизации конструкции камеры, числа зазоров и газовой смеси. Результаты измерений дали возможность выбрать конструкцию с наилучшими параметрами: 6-10 зазоров с размером 230-260 микрон, газовая смесь 93%  $C_2H_2F_4$  + 7 %  $SF_6$ . Данные камеры имеют эффективность регистрации более 98% и временное разрешение на уровне 50 пс.
2. Для улучшения загрузочной способности РППК была разработана камера на основе керамических электродов с напылённым низкорезистивным слоем SiC. Данная камера позволяет получать временное разрешение лучше 100 пс. при загрузках выше 5 кГц/см<sup>2</sup>.
3. Изучены системные аспекты интеграции РППК в большие времяпролетные системы. Разработаны и испытаны два типа организации модулей: в виде отдельных ячеек и на основе сплошных стекол. Оба типа модулей имеют высокое временное разрешение (меньше 100 псек.). Первый тип имеет низкий уровень перекрестных наводок (меньше 1%), а второй при более высоком уровне (до 16%) более прост при сборке. На основе второго варианта построена времяпролетная система детектора ALICE, находящаяся в стадии установки и запуска.

Тенденцией в современной экспериментальной физике является замещение технологией РППК традиционной методики времяпролетных измерений с использованием ФЭУ. На основе РППК созданы времяпролетные системы детекторов ALICE и HARP и планируется создание аналогичных систем в детекторах STAR и CBM.

## **Список публикаций.**

1. ALICE Collaboration, Technical Proposal, CERN/LHCC 95–71.
2. Letter of Intent for the **CBM** Experiment, The CBM collaboration Darmstadt, January 2004
3. ALICE Collaboration, Time-of-flight system, ALICE TDR 8, CERN/LHCC 2000–12;
4. ALICE Collaboration, Time-of-flight system, Addendum to ALICE TDR 8, CERN/LHCC 2002–16.
5. A. Akindinov, S. Alessandrini , A. Alici, et al., Nuclear Physics B 158 (2006) 78–82
6. A. Akindinov, S. Alessandrini , A. Alici, et al., Nuclear Physics B 158 (2006) 60–65
7. A. Akindinov, V. Golovine, A. Martemianov, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 494 (2002) 474-479

8. A. Akindinov, P. Fonte, F. Formenti, *et al.*, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 48, NO. 5, pp. 1658-1663, 2001
9. A. Akindinov, A. Alici , F. Anselmo, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 533 (2004) 93-97.
10. A. Akindinov, V. Ammosov, V. Gapienko, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 572 (2007) 676-681
11. A. Akindinov, A. Alici , F. Anselmo, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 532 (2004) 611-621.