



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2004–6

На правах рукописи

Семак Артём Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
РЕЗИСТИВНЫХ ПЛОСКИХ КАМЕР
ПРИ РАБОТЕ В НАСЫЩЕННОМ ЛАВИННОМ РЕЖИМЕ**

01.04.23 – физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2004

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Научные руководители – кандидат физико-математических наук В.В. Аммосов (ИФВЭ, г. Протвино), кандидат физико-математических наук С.В. Сомов (МИФИ, г. Москва).

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук В.И. Крышкин (ИФВЭ, г. Протвино), кандидат физико-математических наук В.М. Головатюк (ОИЯИ, г. Дубна).

Ведущая организация – Институт ядерной физики МГУ (г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2004 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Развитие исследований в области физики высоких энергий требует создания новых, более совершенных и крупномасштабных установок как для коллайдерных экспериментов, так и для экспериментов с фиксированной мишенью. Яркими примерами этого являются проекты экспериментов ATLAS, CMS, ALICE, LHCb на создаваемом в ЦЕРНе (Швейцария) протонном коллайдере с энергией 8 ТэВ. Одной из важных составляющих таких проектов является наличие детекторов с хорошим временным разрешением, позволяющим создавать с их помощью системы триггера первого уровня и системы идентификации частиц по времени пролёта. У таких детекторов должны быть следующие свойства:

- перекрытие больших площадей (до 10000 м²);
- работа в сильных магнитных полях;
- работа при больших нагрузках ($<10^3$ - 10^4 Гц/см²);
- временное разрешение для триггерных целей ≤ 1 -2 нсек;
- временное разрешение для измерения времени пролёта ≤ 100 псек;
- достаточно хорошее (<1 см) координатное разрешение.

Таким образом, постановка экспериментов нового поколения потребовала разработки новых подходов и технологий для создания детектора с высоким временным разрешением. Таким детектором могла бы стать резистивная плоская камера (РПК). При обеспечении устойчивости её работы в лавинном режиме, РПК была бы идеальным временным детектором для нового поколения экспериментов в силу простоты и дешевизны конструкции. Актуальность вышеперечисленных аргументов определила тематику исследований, проведённых в данной диссертационной работе.

Цель диссертационной работы:

1. Исследование процесса развития разряда в РПК с целью оптимизации режима её работы.
2. Исследование временных свойств РПК при работе в насыщенном лавинном режиме с целью их использования во времяпролётных системах при больших нагрузках.

3. Разработка и создание времяпролётных систем на основе РПК для идентификации частиц в экспериментах ALICE и HARP.

Автор защищает:

1. Результаты экспериментального изучения пространственно-временных характеристик развития разряда и механизма возникновения стримерного разряда в РПК.
2. Результаты экспериментального изучения влияния электроотрицательной добавки к газовой смеси на основе тетрафторэтана на множественность срабатывания электродов, ширину рабочего плато напряжений и вероятность возникновения стримерного разряда в РПК.
3. Результаты экспериментального изучения межэлектродных наводок в РПК, возникающих при регистрации частицы, в том числе результаты изучения множественности срабатывания электродов в зависимости от конструкции системы съёма сигналов.
4. Разработку и исследование характеристик многозазорных РПК с временным разрешением 50-60 пс для эксперимента ALICE.
5. Разработку и исследование характеристик тонкого 4-зазорного резистивного плоского счётчика (РПС) с временным разрешением 70-80 пс, в том числе исследование зависимости временного разрешения от конфигурации электрода для съёма сигнала.
6. Разработку и создание многоканальной времяпролётной системы на основе тонких РПС для эксперимента HARP.

Научная новизна и практическая ценность

1. Впервые изучен механизм развития разряда в РПК с помощью одновременной регистрации оптической и электронной информации.
2. Впервые проведено детальное изучение влияния добавки SF₆ к рабочей газовой смеси на характеристики РПК.
3. Впервые получена количественная картина распределения межэлектродных наводок в зависимости от конфигурации системы съёма сигналов.
4. Впервые разработан газовый детектор на основе РПК с временным разрешением около 60 пс.
5. Впервые разработана, создана и успешно работает в реальном эксперименте многоканальная времяпролётная система на основе впервые предложенной конфигурации тонкого РПС. Детально исследованы характеристики такого счётчика, в том числе:
 - зависимость временного разрешения от числа газовых зазоров;
 - зависимость временного разрешения от площади и конфигурации электрода для съёма сигнала.

Апробация работы и публикации

Результаты работы докладывались на 5-й и 6-й Международных конференциях «Resistive Plate Chambers and Related Detectors» (Бари, Италия, 28-29 окт. 1999 г.; Коимбра, Португалия, 26-27 нояб. 2001 г.), а также на VIII Международной конференции «Instrumentation for Colliding Beam Physics» (Новосибирск, Россия, 28 февр.- 6 марта 2002 г.).

В основу диссертации легли публикации 2000–2002 гг. в журналах «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research» [1–4], препринтах ИФВЭ [5–9] и в материалах международной конференции [10].

Структура диссертации

Диссертация изложена на 170 страницах, состоит из введения, пяти глав и заключения. Каждая глава заканчивается кратким резюме. Основные выводы диссертации приведены в заключении. Диссертация содержит 82 рисунка, 5 таблиц и список цитируемой литературы из 101 наименования.

Представленная работа была выполнена в лаборатории нейтринных взаимодействий Отдела нейтринной физики Института физики высоких энергий (ИФВЭ) на ускорителе У-70 в ИФВЭ, а также в World Laboratory (Lausanne, Switzerland) на ускорителе PS в ЦЕРН (CERN). Часть работы выполнена при поддержке гранта РФФИ № 98-02-17153.

Содержание работы

Во введении отмечено, что резистивная плоская камера (РПК) является новым детектором, который находит широкое применение в экспериментах на ускорителях и космических лучах. Большой интерес к РПК связан с её хорошим временным разрешением, которое достигает 1-2 нс. Особая ветвь РПК, которая бурно развивается в последние несколько лет, связана с использованием многозазорных РПК во времяпролетных детекторах, где требуется временное разрешение около 100 пс при высокой эффективности регистрации.

В первой главе описываются основные типы газовых детекторов и режимы их работы, сформулированы принципы работы резистивной плоской камеры и описана её конструкция.

На **рис. 1** показана схема РПК с одним газовым зазором, который образован двумя плоскопараллельными резистивными электродами. Объемное сопротивление этих электродов (ρ_v) может меняться в пределах от 10^{10} до 10^{12} Ом·см. В качестве резистивных электродов обычно используется пластик – бакелит или стекло. Высоковольтная разность потенциалов прикладывается к РПК через проводящее покрытие на внешних сторонах электродов. Газовый зазор шириной 2 мм обеспечивается за счёт склейки электродов через специальные прокладки

(спейсера), а герметичность – за счёт сплошной рамки по периметру камеры. Характерный размер у такого детектора – несколько квадратных метров.

После прохождения ионизирующей частицы через газовый зазор вдоль её трека остаются кластеры первичной ионизации. Под воздействием внешнего электрического поля из первичной ионизации начинает развиваться лавинный разряд. Это приводит к возникновению индуцированного заряда на сигнальных электродах РПК, которые делаются в виде длинных металлических полос и называются стрипами (часто эти электроды делаются в виде небольших прямоугольных пластин – их называют падами). Заряд индуцированного сигнала примерно на порядок меньше того, который образуется в газовом зазоре.

При достаточном усилении лавинный разряд переходит в стримерный. Разряд в РПК всегда ограничен и локализован. Благодаря высокому сопротивлению электродов, в области разряда происходит накопление зарядов на внутренней поверхности резистивных электродов. Это приводит к уменьшению в этой локальной области электрического поля и как следствие прекращению разряда. Восстановление поля происходит после разряда поверхностей через внутреннее сопротивление электродов. Характерное время восстановления $\tau_0 = \rho_v \cdot \varepsilon$ составляет $10^{-3} \div 10^{-1}$ сек, где ρ_v – объемное сопротивление электродов и ε – их диэлектрическая проницаемость.

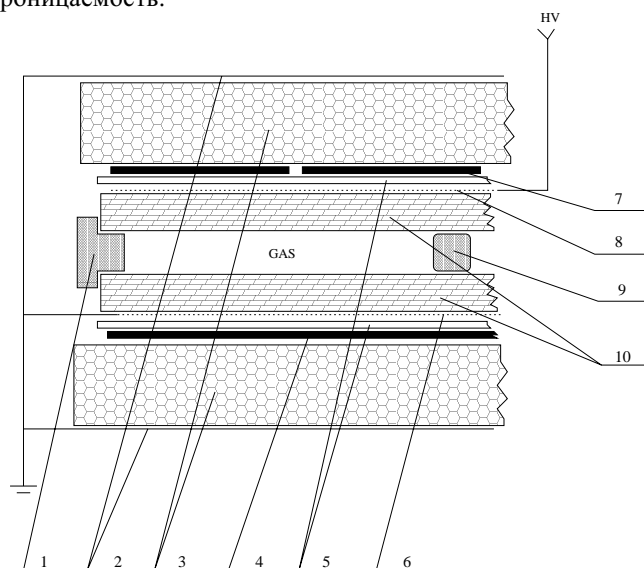


Рис. 1. Схема РПК: 1 – рамка; 2 – металлическое покрытие; 3 – поддерживающие панели; 4, 7 – поперечные и продольные сигнальные электроды; 5 – изоляционные прокладки; 6, 8 – графитовое покрытие; 9 – прокладка (спейсер); 10 – резистивные электроды.

Во второй главе излагаются результаты исследования механизма лавинно-стримерного перехода в 2-мм РПК. Необходимость таких исследований вызвана сложностью в понимании механизма образования стримера, которая возникает при попытках объяснить характерную величину (~100 нс) задержки стримера относительно лавины при скорости дрейфа электронов ~10 нс/мм.

Для получения информации о развитии разряда в РПК производилась регистрация оптического изображения разряда и соответствующих ему электрических сигналов. Для этого использовалась РПК со стеклянными электродами. Съём оптической информации осуществлялся при помощи сборки электронно-оптических преобразователей и видеокамеры. Для исследования множественных стримерных разрядов инициализация начальной лавины в РПК осуществлялась при помощи УФ-импульсного лазера. Исследования лавинно-стримерного перехода происходили на пучке заряженных частиц. Следуя традиционной терминологии для РПК, стримерным называется разряд, индуцирующий на электроды заряд ~ 100 пКл, а лавинным – ~ 1 пКл или меньше.

При работе РПК в стримерном режиме часто регистрируются разряды с несколькими последовательными электрическими импульсами. Их называют множественными стримерными разрядами. Такой разряд представляет собой серию пробоев в РПК, ближайшие из которых отстоят в плоскости камеры друг от друга на расстоянии порядка величины газового зазора. Одиночный пробой выглядит как яркое пятно диаметром около 2 мм.

Характерное пространственное распределение множественного стримерного разряда, полученное при помощи оптического преобразователя, представлено на **рис. 2(а)**, на «стримерной» газовой смеси – Ar/i-C₄H₁₀/CF₃Br. С этой смесью при среднем заряде полного разряда около 100-150 пКл в среднем образуются 2-3 пробоя, что приводит к снижению в 2-3 раза максимальной загрузки камеры по сравнению со случаем отсутствия вторичных стримеров, а координатное разрешение составляет ~1 см.

Спектр излучения стримерного разряда показан на **рис. 3**. Он регистрировался через стеклянный электрод РПК, ослабляющий УФ-излучение, поэтому спектр плавно спадает при $\lambda < 500$ нм. Можно предположить, что не менее 1% спектра излучения лежит в области, где энергия фотонов превышает 4 эВ ($\lambda < 300$ нм). На **рис. 4** построена зависимость числа пробоев от полного регистрируемого электрического заряда. Здесь видна линейная зависимость между средними величинами полных зарядов и числом вторичных разрядов.

Типичная картина лавинно-стримерного перехода вместе с осциллограммой электрических импульсов представлена на **рис. 2(б,в)**. Маленький прямоугольник на рисунках показывает триггерную зону (3×10 мм²), которая была выделена при работе на пучке частиц. Световое пятно внутри этой зоны считается следом лавинного разряда, вызванного прошедшей частицей.

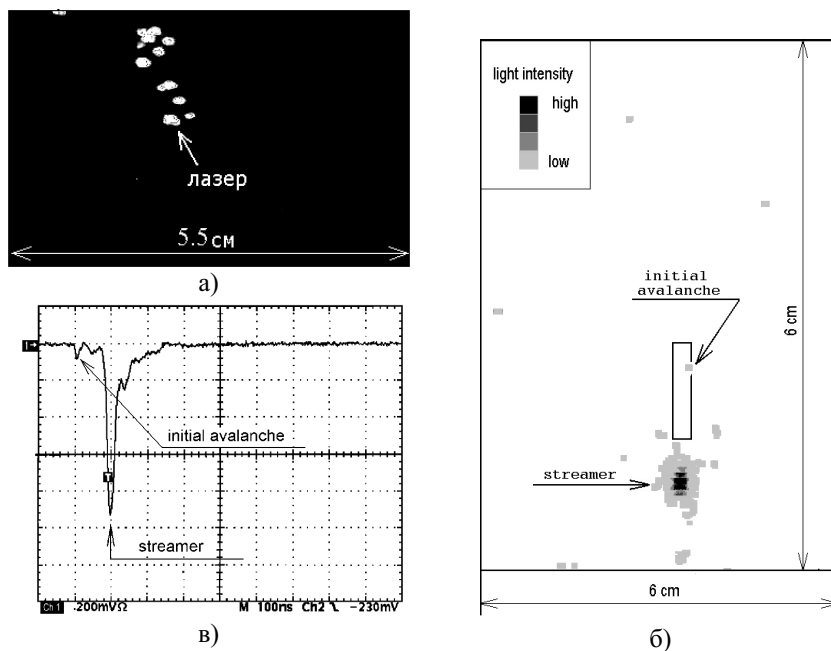


Рис. 2. Внешний вид стримерного разряда в плоскости РПК: **а)** мультистримерный разряд, инициированный лазерным импульсом, газовая смесь – Ar/iC₄H₁₀/CF₃Br = 54/36/10; **б)** стримерный разряд, вызванный прохождением частицы; **в)** соответствующая ему осциллограмма. Состав газа – TFE/IB/SF₆ = 95/5/0.

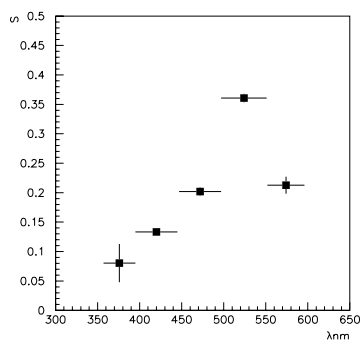


Рис. 3. Оценка спектра излучения стримерного разряда.

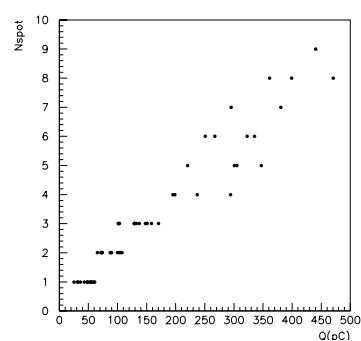


Рис. 4. Зависимость числа световых пятен (Nspot) от величины индуцированного заряда (Q, пКл).

Из рисунков видно, что центр тяжести разряда в общем случае смещён от точки развития начальной лавины. Наблюдения показывают, что примерно в 70% случаев центр тяжести стримера отстоит от центра начальной лавины на расстоянии нескольких миллиметров (см. табл. 1, величину ΔR_{max}).

Таблица 1.

Газ TFE/IB/ SF ₆ , %	Средний заряд, пКл		r _{эфф} , мм		n _{сп}		ΔR _{max} , мм		R _{эфф} , мм	
	лав.	стр.	лав(i)	стр.	лав.	стр.	лав.	стр.	лав.	стр.
95/5/0	1.5	800	0.58	1.6	2.4	13	3.6	5.6	6.5	4.1
100/0/0	1.4	120	0.60	1.7	2.7	23	4.1	5.5	6.8	4.8
20/80/0	1.1	660	0.51	2.4	3.4	38	2.0	6.9	6.8	4.7
99/0/1	4.9	150	-		3.3	20	3.0	3.3	5.0	4.3
98/0/2	2.4		-		2.7		1.5		6.0	
	12		-		5.6		4.2		4.9	
94/5/1	10		0.78		3.2		3.8		4.7	
90/5/5	9.7		0.63		4.4		4.8		5.1	

Пространственные характеристики разряда приведены в табл. 1. Для исследований использовались газовые смеси на основе тетрафторэтана (TFE) с добавками изобутана (IB) и шестифтористой серы (SF₆), так как эти газы входят в состав рабочей смеси для РПК в экспериментах на ЛНС. Для нахождения этих параметров использовалась световая интенсивность, регистрируемая каждым пикселем видеокамеры, посредством которой определялся центр масс светового пятна. В таблице представлены средние величины множественности световых кластеров (n_{sp}), отклонения кластера, имеющего максимальную интенсивность, от начального разряда (ΔR_{max}) и эффективный радиус разряда в детекторе (R_{eff}).

$$R_{eff} = \sqrt{\sum_i (\vec{R}_{cm} - \vec{r}_i)^2 E_i / E_{tot}}, \quad (1)$$

где $\vec{R}_{cm} = \vec{r}_i E_i / E_{tot}$ – радиус-вектор центра масс системы световых кластеров; \vec{r}_i и E_i – радиус-вектор и световая энергия кластера i ; E_{tot} – полная световая энергия разряда. Эффективный радиус разряда определяет предельное пространственное разрешение детектора, которое не зависит от способа съёма сигналов с РПК. Для всех изученных газовых смесей он ~ 5 мм, вне зависимости от типа разряда. Также измерен эффективный радиус начальной лавины $r_{eff} \sim 600$ мкм («лав(i)» означает начальную лавину). Он примерно в 3-4 раза меньше эффективного радиуса основного стримерного кластера, который достигает 2 мм, и в ~ 10 раз меньше эффективного радиуса всего разряда.

Из полученных данных можно сделать вывод, что стримерные разряды вызваны механизмом вторичной эмиссии фотоэлектронов с катода РПК. Образование фотоэлектронов должно идти под воздействием фотонов с энергией в несколько электронвольт. То, что в разряде имеется большое количество фотонов с энергией более 4 эВ, было найдено при оценке спектра излучения стримерного разряда. Вероятно, процесс образования множественных разрядов в «стандартном газе» сильно подавлен из-за большой электроотрицательности используемых газов, приводящей к быстрому прилипанию к молекулам единичных фотоэлектронов. Так как стримерный процесс включает в себя десятки пространственно разделённых разрядов, то большие задержки во временном развитии стримера вызваны, по-видимому, сложным процессом многократной инициации лавин вблизи катода или на нём.

Третья глава посвящена исследованию характеристик РПК с 2-мм газовым зазором. При высоких фоновых нагрузках РПК эксплуатируются в лавинном режиме, и поэтому применяется накамерная электроника с низким порогом. В этих условиях возникновение стримерного разряда приводит к множественному срабатыванию стрипов, что ухудшает пространственное разрешение РПК как «цифрового» детектора. Для обеспечения удовлетворительной работы детектора необходимо решить следующие задачи:

- Обеспечить ширину плато рабочих напряжений в лавинном режиме более 200 В, что составляет несколько процентов от рабочего напряжения. Доля стримерных разрядов в этой области должна быть менее 1%.
- Исследовать множественность срабатывания стрипов в зависимости от режима эксплуатации камеры.

Основной компонентой газовой смеси для РПК является тетрафторэтан ($C_2H_2F_4$), содержание которого составляет более 90%. Для получения долговременной стабильной работы камеры в смесь добавляют несколько процентов изобутана. Чтобы замедлить развитие разряда и тем самым подавить развитие стримера, нужно использовать небольшую добавку сильно электроотрицательного газа. В качестве такого газа использовалась шестифтористая сера (SF_6). Использование этой добавки не исключает развития стримера, но сильно расширяет плато рабочих напряжений.

Во время исследований процентное содержание изобутана было фиксировано на величине 3%, а концентрация SF_6 варьировалась в пределах от 0 до 5%. Добавление SF_6 приводит к существенным изменениям зарядовых распределений в области напряжений выше V_{knee} . Здесь V_{knee} определено как величина напряжения, при котором эффективность достигает 98%. Этот эффект проиллюстрирован на **рис. 5**, где показаны зарядовые распределения при величине высокого напряжения, превышающего V_{knee} на 1 кВ.

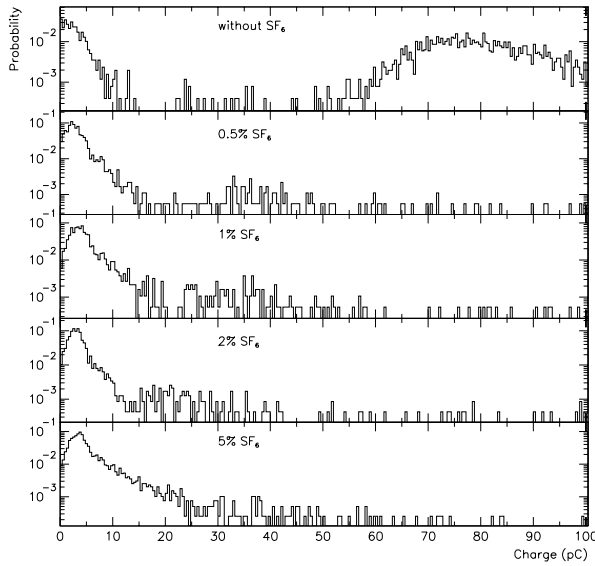


Рис. 5. Распределения зарядов сигналов при $\Delta V=1$ кВ для TFE/IB/SF₆ смесей с 3% изобутана и различными концентрациями SF₆.

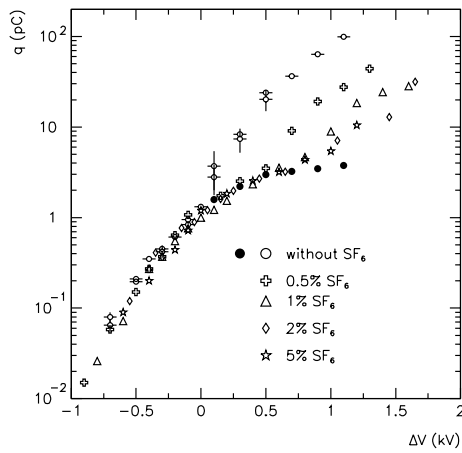


Рис. 6. Средняя величина зарядов как функция ΔV для TFE/IB/SF₆ смесей с 3% изобутана и различными концентрациями SF₆. Черные и белые кружки показывают лавинный и полный заряды соответственно для TFE/IB=97/3 газовой смеси.

Для бинарной смеси (C₂H₂F₄/i-C₄H₁₀) наблюдается распределение с отдельными друг от друга лавинной и стримерной частями. Для смесей, содержащих SF₆, видна тенденция к слиянию стримерной и лавинной частей. При этом

с увеличением концентрации SF_6 уменьшается заряд стримера, а зарядовое распределение лавин расширяется. И уже нет смысла в разделении зарядов на лавинный и стримерный.

На **рис. 6** показано поведение средних значений полного наведенного заряда в зависимости от $\Delta V = V - V_{knee}$ для некоторых газовых смесей. Для сравнения величин зарядов на рисунке также приведено поведение среднего лавинного заряда для бинарной смеси. Выше V_{knee} для смесей, содержащих SF_6 , полный заряд $\langle q_{tot} \rangle$ в некотором промежутке напряжений ведёт себя так же, как и лавинный заряд для бинарной смеси, а затем начинает быстро нарастать, но без заметного скачка, как это наблюдается в отсутствие SF_6 . С увеличением концентрации этой добавки вплоть до 2% $\langle q_{tot} \rangle$ дольше сохраняет «лавиновую» зависимость от ΔV . Поведение $\langle q_{tot} \rangle$ в зависимости от ΔV практически не меняется при увеличении концентрации SF_6 от 2 до 5%, т.е. происходит насыщение лавины. Поэтому расширять далее таким способом бесстримерное плато не имеет смысла. Такой режим был назван насыщенным лавинным режимом. На рисунке хорошо видно универсальное поведение средних зарядов в лавинной области (ниже колена). Это означает, что добавки SF_6 не оказывают существенного влияния на эффективный коэффициент Таунсенда при достаточно низких напряжённостях поля в газовом зазоре.

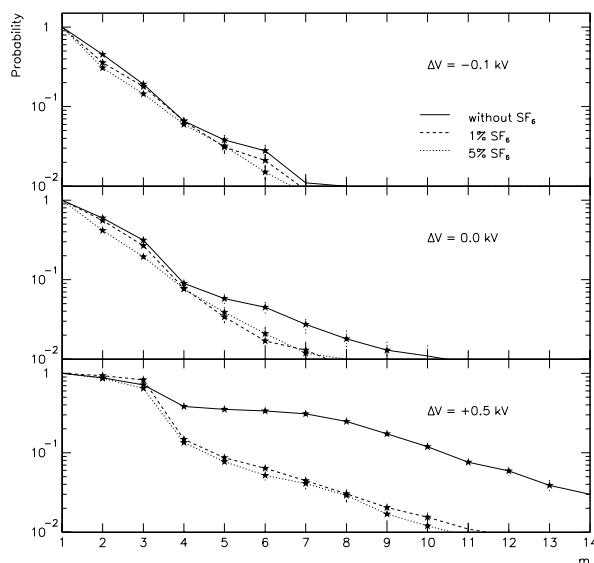


Рис. 7. Средняя множественность срабатывания стрипов в зависимости от ΔV для $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4/i\text{-C}_4\text{H}_{10}/\text{SF}_6$ смесей с 3% изобутана и различными концентрациями SF_6 .

Очевидно, что форма зарядового спектра сигналов влияет на распределение по множественности срабатывания стрипов. Для изучения множественности срабатывания стрипов определим кумулятивное распределение

$$P_n(m) = \frac{\sum_{i \geq m} n_i}{\sum_{i \geq 1} n_i}, \quad (2)$$

где $P_n(m)$ – вероятность срабатывания более чем m стрипов; n_i – число событий со сработавшими i -стрипами.

На **рис. 7** представлена трансформация формы распределения (2) в зависимости от концентрации электроотрицательной добавки. В лавинной области ($\Delta V = -0.1$ кВ) $P_n(m)$ ведёт себя одинаково для различных смесей во всём интервале значений m , что связано с одинаковостью зарядовых распределений в этой области. В начале плато по напряжению поведение $P_n(m)$ одинаково для различных смесей вплоть до $m=4$. Для бинарной смеси с увеличением ΔV хвост распределения начинает быстро расти, тогда как для тройных газовых смесей он примерно на порядок меньше. Из **рис. 7** следует, что увеличение концентрации SF_6 с 1 до 5% не даёт значимого уменьшения множественности срабатывания стрипов. Таким образом, добавка SF_6 к «стандартному» $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4/i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ -газу позволяет получить удобный режим «насыщенной лавины», для которого существует плато напряжений шириною 1 кВ, где снижен средний заряд сигнала и снижена на порядок множественность срабатывания стрипов.

На множественность срабатывания стрипов существенное влияние оказывают конструктивные особенности камеры, такие как сопротивление проводящего покрытия электродов, структура стриповой панели, взаимное расположение стрипов и плоскости земли. Поэтому возникла необходимость изучения межэлектродных наводок в «стандартной» РПК. Основными задачами исследований были:

- получить количественные данные о природе межэлектродных наводок в РПК, конструкция которой такая же, как и у РПК для эксперимента АТЛАС;
- оценить степень корреляции между величиной индукционного сигнала и множественностью срабатывания стрипов.

Во-первых, было изучено влияние проводимости покрытия высоковольтных электродов на величину и форму межэлектродных наводок. Оказалось, что, когда применяется покрытие с низким поверхностным сопротивлением $\rho_s=50$ кОм/кв, на соседних с «основным» стрипах появляются медленно нарастающие наводки той же полярности, что и полезный сигнал. При использовании высокорезистивного покрытия $\rho_s=500$ кОм/кв эти наводки исчезают и остаются только «быстрые», индуцированные разрядом сигналы. Амплитуды медленных выбросов больше амплитуд «быстрых» сигналов в 2-5 раз. Медленные наводки

связаны с процессом разрядки паразитной ёмкости C^* между стрипом и графитовым слоем, которая заряжается во время разряда в газе через эффективное сопротивление проводящего покрытия R^* . На **рис. 8** приведена зависимость средней множественности срабатывания стрипов M от величины индуцированного заряда q_m для двух значений сопротивления проводящего покрытия анода. В наиболее важной области зарядов – от 1 до 10 пКл – множественность заметно различается: для большего сопротивления она примерно на единицу ниже.

Во-вторых, изучались два типа стриповых панелей: обычная и экранированная, которая имела тонкие полоски шириною 1 мм между сигнальными стрипами – экранирующие стрипы. На РПК эффект экранирования изучался при помощи методики внутренней искровой пульсации. В этом методе индуцированный на стрип сигнал получался при помощи искрового разряда между иглой и электродом. На **рис. 9** показано, как распределяются амплитуды сигналов между соседними стрипами для экранированной и неэкранированной (обычной) стриповых панелей. Из рисунка не видно заметного различия в этих распределениях. Очевидно, что дополнительный экранирующий стрип не улучшает свойств РПК в отношении снижения межэлектродных наводок.

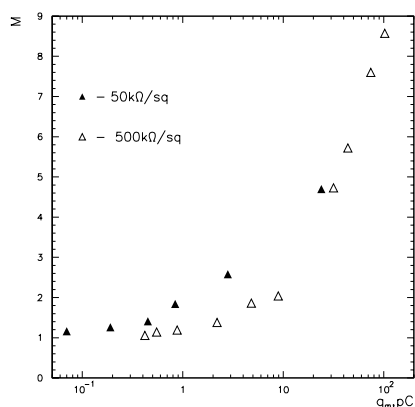


Рис. 8. Средняя множественность срабатывания стрипов в зависимости от среднего индуцированного заряда. Белые треугольники – $\rho_s=500$ кОм/кв; чёрные треугольники – $\rho_s=50$ кОм/кв.

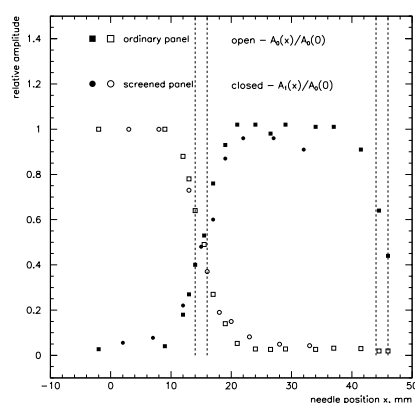


Рис. 9. Величины наводок для «экранированной» (кружки) и «не экранированной» (квадратики) стриповых панелей. Белые символы соответствуют отношению $A_0(x)/A_0(0)$, чёрные – $A_1(x)/A_1(0)$.

Можно выделить два источника появления наводок в РПК. Во-первых, это индукционная наводка токов на стрипы движущимися в газовом зазоре зарядами. На соседние стрипы могут наводиться сигналы разных полярностей, что

приводит к снижению множественности срабатывания. Такое возможно при достаточно большом расстоянии между анодной и катодной плоскостями стрипов в сравнении с толщиной анода. В стандартной конструкции РПК такая возможность не реализована. Индукционная наводка доминирует в переходной области между стрипами. Ширина этой области зависит от расстояния между анодной и катодной плоскостями. В остальной области преобладающим источником наводок является емкостная связь между стрипами. В этом случае индуцированный сигнал с амплитудой A_0 передаётся на соседний стрип с амплитудой $A_r \sim A_0 \cdot C_p / (C_p + C_s)$, где C_p – ёмкость между стрипами, а C_s – ёмкость между падом и землёй.

В четвёртой главе представлены результаты разработки многозачорных РПК (МРПК), работающих в насыщенном лавинном режиме, для времяпролётных измерений в эксперименте ALICE. Статистические флуктуации первичной ионизации, а также флуктуации газового усиления ухудшают временное разрешение детектора. Основным способом улучшения временного разрешения РПК является уменьшение газового зазора, где развивается разряд. Чтобы при этом эффективность детектора не снижалась, необходимо увеличить число газовых зазоров, что тоже приводит к улучшению временного разрешения. Эти утверждения являются оправданными для создания МРПК.

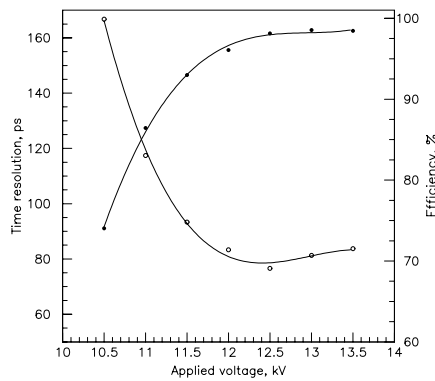


Рис. 10. Зависимость временного разрешения (Time resolution, пс; белые кружки) и эффективности (Efficiency, %; чёрные кружки) для 5×0.220 мм МРПК от напряжения, кВ.

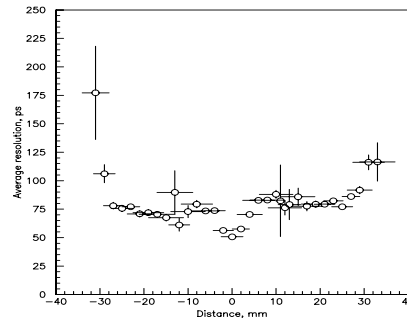


Рис. 11. Зависимость средневзвешенного временного разрешения для двух падов (Average resolution, пс) от места прохождения частицы (Distance, мм).

Было изготовлено и испытано несколько образцов МРПК, величина одного газового зазора которых варьировалась в пределах 200-300 мкм. На **рис. 10** показаны временное разрешение и эффективность в зависимости от прикладываемого напряжения для МРПК, состоящей из 5 газовых зазоров по 220 мкм каждый. Для работы использовалась газовая смесь, состоящая из TFE/iC₄H₁₀/SF₆=90/5/5. Как видно из рисунка, на первых образцах было получено временное разрешение около 80 пс и эффективность около 97-98%. Тестирование прототипов детектора показало, что они могут удовлетворительно работать при фоновых нагрузках, превышающих на порядок ожидаемые в эксперименте ALICE (около 50 Гц/см²).

Съём сигналов с МРПК осуществляется с помощью падов. Размер одного пада ~10 см². При прохождении частицы вблизи границы пада происходит снижение индуцированного на пад заряда, что приводит не только к снижению эффективности регистрации, но и к ухудшению временного разрешения. Это вызвано тем, что с уменьшением входного сигнала ухудшается временное разрешение камерной электроники. На **рис. 11** показана зависимость временного разрешения от координаты вдоль двух соседних падов: правый пад занимает область от 1 до 31 мм, а левый – от -31 до -1 мм. В области ±10 мм, где срабатывают оба канала считывания, однозначную информацию о времени прохождения частицы можно получить, применяя процедуру усреднения с весами пропорциональными индуцированным зарядам. С этой целью для каждого канала получаемая временная отметка t_i корректируется на заряд сигнала q_i ($i=1,2$), а затем производится усреднение полученных t_i по формуле

$$\bar{t} = \frac{t_1 \cdot q_1 + t_2 \cdot q_2}{q_1 + q_2}. \quad (3)$$

При этом в области ±10 мм получается хорошее временное разрешение – около 50 пс. Что касается области падов на внешних границах детектора, которые соответствуют координатам в районе -30 и +30 мм, то там временное разрешение около 100 пс, что допускается техническими требованиями.

Исследования однородности распределения эффективности регистрации и временного разрешения показывают (**рис. 12**), что ширина на полувысоте для распределения по разрешению составляет ~10 пс, а для эффективности ~1%. То есть, детектор достаточно однородный.

Схема последнего испытанного детектора с 6 газовыми зазорами представлена на **рис. 13**. Ширина одного газового зазора составляет 250 мкм. Окончательная версия отличается от этой только четырьмя дополнительными зазорами, которые немного улучшают загрузочную способность камеры. Особенностью конструкции является внутреннее расположение падов, когда МРПК состоит из двух сборок газовых зазоров, на каждую из которых независимо подаётся

разность потенциалов. Такая схема позволяет уменьшить в два раза прикладываемое напряжение. Кроме того, по сравнению с обычной конструкцией, амплитуды регистрируемых сигналов возрастают примерно вдвое. На **рис. 14** показаны временное разрешение и эффективность для такого детектора. Достигается временное разрешение около 50 пс в диапазоне рабочих напряжений ~ 0.5 кВ. Улучшение временного разрешения достигнуто при использовании дифференциального съёма сигналов и специально подобранной камерной электроники. Исследование загрузочной способности детектора проводилось на том же пучке частиц, результаты представлены на **рис. 15**. Сравнение этих данных с данными, полученными для прототипа, показывает, что детектор при внешних нагрузках ~ 100 Гц/см² обладает эффективностью около 98% и временным разрешением ~ 70 пс.

Проведенные исследования показывают, что МРПК будет надёжно работать в фоновых условиях эксперимента ALICE, обладая высокими временным разрешением и эффективностью. Разброс характеристик отдельных модулей не должен превышать 10%.

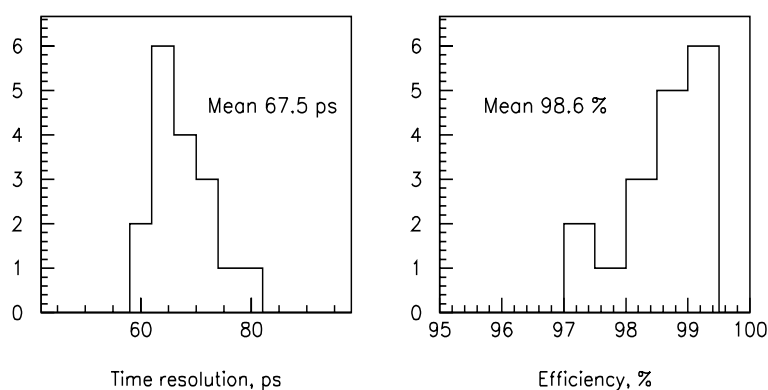


Рис. 12. Проверка на однородность распределения временного разрешения и эффективности по площади детектора. Распределения построены по 17 падам. Во время тестирования использовались предусилители MAX3760.

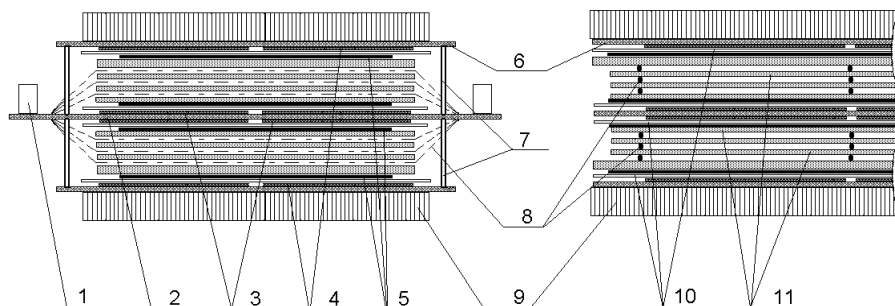


Рис. 13. Схема МРПК для эксперимента ALICE: 1 – сигнальный разъем; 2 – двухслойная плата с нанесёнными на неё анодными падами; 3, 4 – анодные и катодные пады; 5 – проводящие слои для подачи разности потенциалов; 6 – плата с катодными стрипами; 7 – металлические стяжки; 8 – капроновые волокна (спейсера); 9 – панели для придания жёсткости МРПК; 10 – изоляционные листы лавсана; 11 – стеклянные электроды.

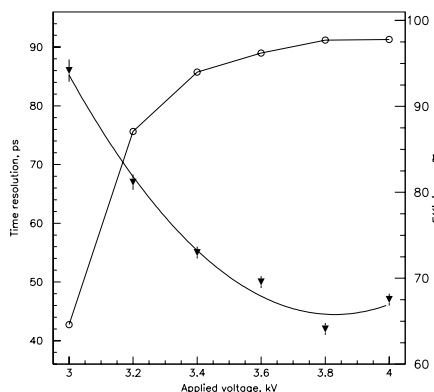


Рис. 14. Зависимость временного разрешения (Time resolution, пс; чёрные треугольники) и эффективности (Efficiency, %; белые кружки) от прикладываемого напряжения, кВ.

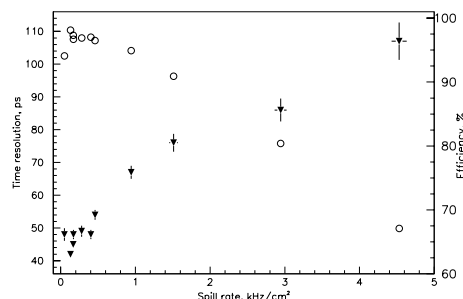


Рис. 15. Зависимость временного разрешения (Time resolution, пс; чёрные треугольники) и эффективности (Efficiency, %; белые кружки) от величины импульсной загрузки, кГц/см².

В пятой главе приводятся исследования специально разработанного для эксперимента HARP тонкого резистивного плоского счётчика (РПС), работающего в насыщенном лавинном режиме, и описана времяпролётная система,

созданная на его основе. Особенностью счётчика является его малая толщина – 10 мм, которая позволила встроить его в экспериментальную установку. Требуемое временное разрешение составило около 200 пс, что привело к необходимости использования многозачорного РПС. Схема счётчика представлена на **рис. 16**. В качестве рабочего газа использовалась «стандартная» смесь – TFE/iC₄H₁₀/SF₆ = 90/5/5. Новыми направлениями исследований для этой конструкции были минимизация числа каналов считывания и оптимизация способа съема сигналов.

Минимизировать число каналов считывания можно двумя способами. Первый заключается в простом увеличении площади падов. Но при этом нужно учитывать время распространения сигнала по паду, иначе нельзя получить хорошего временного разрешения. Так, при равномерном облучении пада со стороны ~10 см временной разброс по времени прихода сигнала на предусилитель будет примерно 170 пс (скорость распространения сигнала около 60 пс/см). А с учётом локального разрешения МРПК ~100 пс, полное разрешение будет примерно 200 пс. На **рис. 17** показана зависимость локального временного разрешения от площади пада. Аппроксимация этих данных линейной функцией даёт $\sigma_t = 70 + 0.26 \times S$, где S (см²) – площадь пада, а разрешение (σ_t) измеряется в пикосекундах.

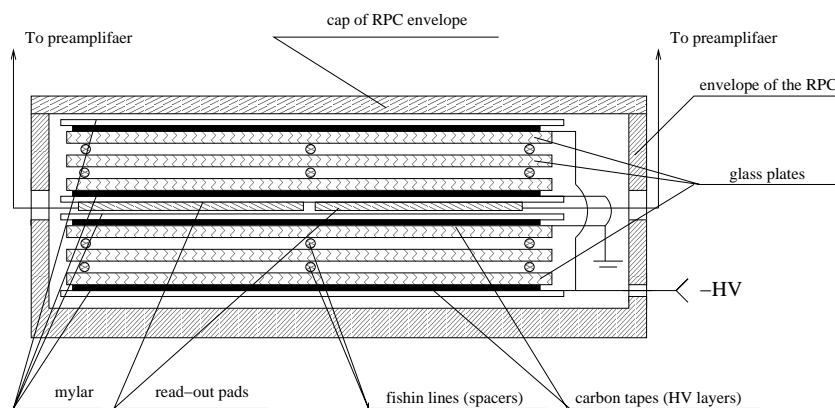


Рис. 16. Схема четырехзачорного МРПК-счётчика: mylar – лист лавсана; read-out pads – сигнальные пады; fishing lines – капроновые волокна; carbon tapes – графитовая плёнка (500 кОм/кв.) для подачи на счётчик разности потенциалов -HV; glass plates – стеклянные электроды; envelope – коробка; cap – съёмная крышка коробки.

Другой способ заключается в аналоговом суммировании сигналов от многих небольших падов. Для исследований был изготовлен сигнальный электрод, который состоял из 2×4 (двух рядов по четыре) маленьких падов с размерами $4.3 \times 5.6 \text{ см}^2$. Результаты тестирования представлены на **рис. 17**. Увеличение числа суммирующих каналов приводит к увеличению σ_t . Если аппроксимировать экспериментальные точки прямой, то получается, что $\sigma_t = 71 + 0.13 \times S$, где S – активная площадь системы. Из сравнения с той же зависимостью для сплошных падов видно, что временное разрешение многопадового элемента ухудшается в 2 раза медленнее и становится заметно лучше при площади более 100 см^2 . Измерения показали, что для любого количества падов в системе $\varepsilon_{3\sigma} = 96.0 \pm 0.5\%$. Последняя величина определена как вероятность получить сигнал в $\pm 3\sigma_t$ -временном интервале.

Несмотря на то что разница между локальным разрешением большого пада ($11 \times 18 \text{ см}^2$) и такой же по площади системы 8 падов всего 20%, методика суммирования даёт преимущество перед прямым использованием больших падов. Так, для системы падов, размер стороны которых $\sim 5 \text{ см}$, полное разрешение будет около 130 пс, что практически даёт двойной запас по временному разрешению.

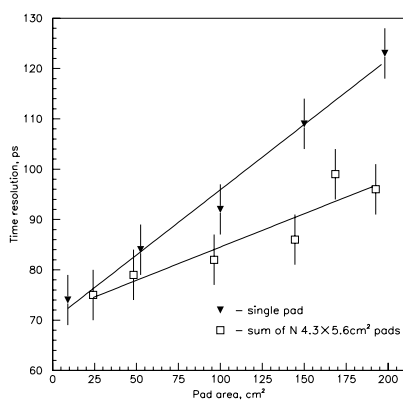


Рис. 17. Зависимость временного разрешения РПК от площади сигнального элемента: при съёме сигнала с однородного пада (чёрные треугольники) и с нескольких маленьких падов через суммирующий предусилитель (квадраты).

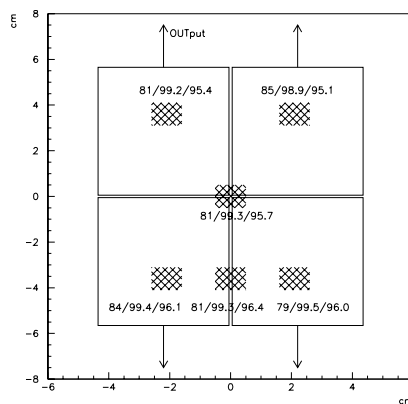


Рис. 18. Однородность распределения временного разрешения /эффективности $/\varepsilon_{3\sigma}$ -эффективности для сигнального элемента, состоящего из четырёх падов, сигналы которых просуммированы аналоговым способом.

На **рис. 18** показаны результаты изучения однородности временного разрешения и эффективности для многопадовой системы. Заштрихованные области обозначают места облучения пучком частиц. Как видно из рисунка, временное разрешение (первая цифра), полная эффективность (вторая цифра) и $\epsilon_{3\sigma}$ -эффективность (последняя цифра) одинаковые в трёх основных областях: между четырьмя падами, между двумя падами и в центре одного пада.

Проведенные методические исследования легли в основу создания первой в мире времяпролетной системы на РПС, работающих в насыщенном лавинном режиме, для эксперимента HARP (**рис. 19, 20**). Система была спроектирована, изготовлена и запущена в эксплуатацию в течение девяти месяцев. Она состояла из 46 РПС размером 100×2000 мм², имела 368 считывающих амплитудных и временных каналов, покрывала площадь ~ 10 м² и работала в магнитном поле напряженностью 2 Т. Эта система успешно проработала с мая 2001 г. по октябрь 2002 г. – времени завершения набора статистики в эксперименте HARP, показав стабильность работы и простоту в эксплуатации. Система обладала временным разрешением около 150 пс и эффективностью 99%.

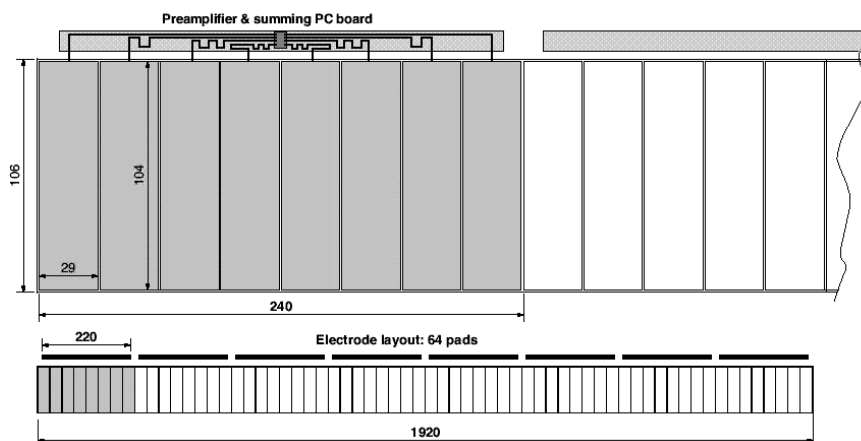


Рис. 19. Схема разбиения «сигнального слоя» на пады в эксплуатировавшихся РПС. К одному предусилителю подсоединяются восемь соседних падов.

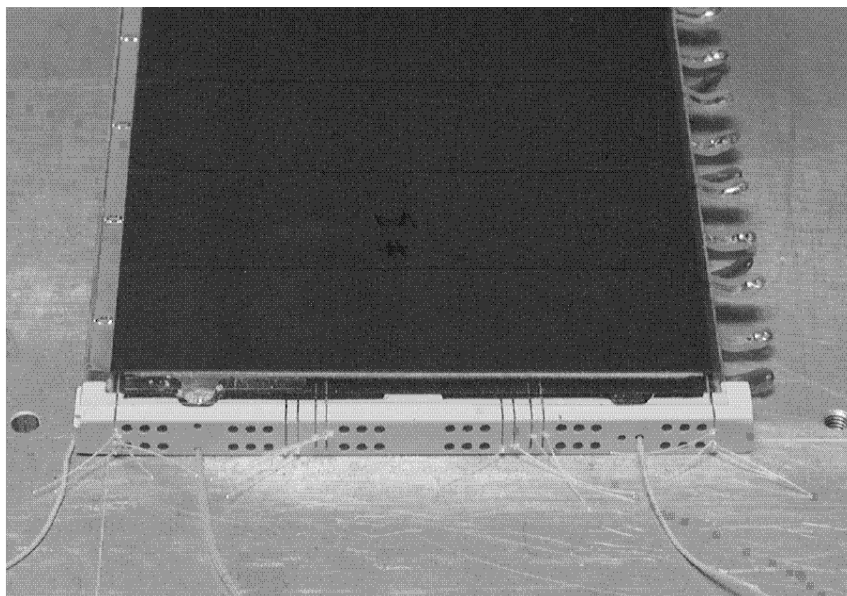


Рис. 20. Фотография торца электродной сборки с фиксатором для спейсеров.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы:

1. Впервые получено пространственное распределение разряда в РПК, работающей в стримерном режиме. Обнаружено многократное появление вторичных стримерных разрядов, которые распределены по значительной площади в РПК. Из рассмотрения свойств разряда для различных газовых смесей следует, что вторичные разряды возникают при выбивании фотоэлектронов из катода, а не в результате фотоионизации в газе.
2. Впервые исследованы пространственно-временные характеристики разряда РПК, работающей в режиме насыщенной лавины. Обнаружено, что процесс фотоионизации с катода играет важную роль в формировании как стримерного, так и лавинного разрядов. Получены количественные пространственно-временные характеристики разряда в детекторе. Так как стримерный процесс включает в себя десятки пространственно-разделённых разрядов, то большие задержки во временном развитии стримера вызваны, по-видимому, сложным процессом многократной инициации лавин вблизи катода.

3. Проведено исследование влияния электроотрицательного газа SF₆ на рабочие характеристики РПК. Был получен удобный режим «насыщенной лавины», для которого существует плато напряжений шириною 1 кВ, где снижен средний заряд сигнала, значительно снижена множественность срабатывания стрипов. Работа в «насыщенной лавинной» моде позволила использовать высокий порог дискриминации сигнала ~1 мВ, который предпочтителен для многоканальной системы.
4. Впервые исследованы характер и величина наводок в РПК в зависимости от расположения электродов. Было выделено два источника появления наводок в РПК – индукционный эффект и паразитная емкостная связь между стрипами. Наблюдаемые в эксперименте сигналы есть результат суперпозиции этих двух источников. Причем на соседних с основным стрипах преобладает влияние первого, а на последующих – второго. Не обнаружено заметного влияния «экранирующих» стрипов на величину межэлектродных наводок и множественность срабатывания, в сравнении с обычной стриповой панелью. Зависимость множественности срабатывания от величины индуцируемого на основной стрип заряда находится в согласии с наблюдаемыми распределениями межэлектродных наводок по стрипам.
5. Впервые получено рекордное временное разрешение для 6-зазорной МРПК, работающей в насыщенном лавинном режиме, что позволило использовать этот детектор для измерения времени пролёта в современных экспериментах. Разработана конструкция детектора, который будет использоваться для времяпролётных измерений в эксперименте ALICE. Проведенные исследования показывают, что МРПК будет надёжно работать в ожидаемых фоновых условиях, обеспечивая временное разрешение ~60 пс и эффективность 98%. Разброс характеристик отдельных модулей не должен превышать 10%.
6. Впервые разработан и исследован тонкий, простейший в конструкции резистивный плоский счетчик для временных измерений. Счетчик работает в насыщенной лавинной моде, имеет 4 зазора со съемом сигнала посередине и толщину 10 мм. Исследована зависимость временного разрешения от площади электрода и способа съема сигналов. Минимальное временное разрешение составило 70 пс.
7. Впервые создана и прошла успешно эксплуатацию в условиях реально проведенного эксперимента HARP времяпролётная система на основе тонких 4-зазорных резистивных плоских счетчиков, работающих в насыщенном лавинном режиме. Временное разрешение системы составило 150 пс.

Список литературы

- [1] V.Ammosov, A.Ivanilov, V.Koreshev, Yu.Sviridov, V.Zaets (Protvino, IHEP), **A.Semak** (Moscow Phys. Eng. Inst.), *Study of Cross-talks for multi-strip RPC read-out*. Prepared for 5th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99), Bari, Italy, 28-29 Oct. 1999. Published in Nucl. Instrum. Meth. A456:55-61, 2000.
- [2] **A.Semak**, V.Ammosov, V.Gapienko, A.A.Ivanilov, V.Koreshev, A.Kulemzin, Yu.Sviridov, V.Zaets, E.Gushin, S.Somov (Serpukhov, IHEP & Moscow Phys. Eng. Inst.). *Properties of discharge in the narrow gap glass RPC*. Prepared for 5th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99), Bari, Italy, 28-29 Oct. 1999. Published in Nucl. Instrum. Meth. A456:50-54, 2000.
- [3] V.Koreshev, V.Ammosov, A.Ivanilov, Yu.Sviridov, V.Zaets (Serpukhov, IHEP), **A.Semak** (Moscow Phys. Eng. Inst.). *Operation of narrow gap RPC with tetrafluoroethane-based mixtures*. Prepared for 5th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99), Bari, Italy, 28-29 Oct. 1999. Published in Nucl. Instrum. Meth. A456:46-49, 2000.
- [4] A.Akindinov, F.Anselmo, M.Basile, E.Cerron Zeballos, L.Cifarelli, F.Cindolo, J.Choi, B.Cozzoni, A.De Caro, S.De Pasquale, D.W.Kim, N.Y.Kim, W.Klempf, A.Kluge, G.Laurenti, S.C.Lee, V.Golovin, D.Hatzifotiadou, A.Martemyanov, P.Martinengo, A.Pesci, E.Platner, J.Roberts, A.Seganti, **A.Semak**, A.Smirnitsky, M.Spiegel, P.Szymanski, G.Valenti, D.Vicinanza, M.C.S.Williams, A.Zichichi (Moscow, ITEP & INFN, Bologna & Bologna U. & CERN & Salerno U. & INFN, Salerno & Pohang Accelerator Lab. & Kangnung National U. & Rice U.). *The multigap resistive plate chamber as a Time-Of-Flight detector*. Prepared for 5th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99), Bari, Italy, 28-29 Oct. 1999. Published in Nucl. Instrum. Meth. A456:16-22, 2000.
- [5] V.Ammosov, V.Gapienko, **A.Semak**, V.Sen'ko, Yu.Sviridov, V.Zaets, E.Usenko. *Four gap glass RPC as a candidate to a large area thin time-of-flight detector*. – Preprint IHEP 2002-10, Protvino, 2002.
- [6] V.Ammosov, V.Gapienko, A.Ivanilov, **A.Semak**, Yu.Sviridov, E.Usenko, V.Zaets. *Comparison of timing properties of glass multigap RPCs with 0.3 and 0.6 mm subgap width*. – Preprint IHEP 2002-14, Protvino 2002.
- [7] V.Ammosov, V.Gapienko, A.Kulemzin, **A.Semak**, Yu.Sviridov, V.Zaets. *Study of the avalanche to streamer transition in glass RPC excited by UV light*. – Preprint IHEP 2002-11, Protvino, 2002.

- [8] V.Ammosov, A.Ivanilov, V.Koreshev, Yu.Sviridov, V.Zaets (Serpukhov, IHEP), **A.Semak** (Moscow Phys. Eng. Inst.). Study of SF₆ addition influence on narrow gap RPC performance. – Preprint IHEP 99-53, Protvino, 1999.
- [9] V.Ammosov, A.Ivanilov, V.Koreshev, Yu.Sviridov, V.Zaets (IHEP), **A.Semak** (Moscow Phys. Eng. Inst.). *Multy-strip read-out in RPCs: cross-talks and cluster size*. – Preprint IHEP 99-52, Protvino, 1999.
- [10] M.Bogomilov, R.Dumps, F.Dydak, J.Wotschack (CERN, Switzerland), D.Dedovich (JINR, Dubna), V.Gapienko, **A.Semak**, Y.Sviridov, E.Usenko, V.Zaets (IHEP, Protvino). *The RPC time-of-flight system of the HARP experiment*. Prepared for VI International Workshop on Resistive Plate Chambers and related detectors, Coimbra, Portugal, 26-27 November 2001.

Рукопись поступила 20 января 2004 г.

А.А. Семак

Исследование характеристик резистивных плоских камер при работе в насыщенном лавинном режиме.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 21.01.2004. Формат 60x84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 1,42. Уч.-изд.л. 1,61. Тираж 100. Заказ 187. Индекс 3649.
ЛР №020498 06.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

АВТОРЕФЕРАТ 2004 –6, ИФВЭ, 2004
