



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2007–19
ОЭФ

В.А. Беззубов, Ю.В. Гилицкий, М.Ю. Костин, С.А. Куликов,
М.М. Солдатов, А.В. Солин*, А.А. Щукин

ПИКСЕЛЬНАЯ 21-КАНАЛЬНАЯ ДРЕЙФОВАЯ КАМЕРА

Направлено в ПТЭ

* НЦ Физики частиц и высоких энергий БГУ, Минск, Беларусь

Протвино 2007

Аннотация

Беззубов В.А., Гилицкий Ю.В., Костин М.Ю. и др. Пиксельная 21-канальная дрейфовая камера. Препринт ИФВЭ 2007 –19. – Протвино, 2007. – 10 с., 10 рис., 2 табл., библиогр.: 5.

Изучение характеристик пиксельной камеры было проведено на пучках ускорителя ИФВЭ. Среднее пространственное разрешение для ячейки пиксельной камеры равно 0,9 мм при интенсивности пучка до 10^6 с^{-1} и становится равным 1,1 мм при интенсивности $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Эффективность камеры равна ~90% при интенсивности пучка 10^6 с^{-1} и уменьшается до 75% при интенсивности $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$.

Abstract

Bezzubov V. A., Gilitsky Yu.V., Kostin M.Yu. et al. The Pixel 21-Channel Drift Chamber. IHEP Preprint 2007 –19 – Protvino, 2007. – p. 10, figs. 10, tabs. 2, refs. : 5.

Characteristics of the pixel chamber with 40 mm cell and 120 mm gas gap were studied in the particle beams of the IHEP accelerator. Medium space resolution averaged over the cell size appeared to be 0.9 mm at intensity up to 10^6 pps . It became 1.1 mm at $5 \cdot 10^6 \text{ pps}$. Chamber efficiency is equal to ~90% at intensity 10^6 pps and drops down to 75% at $5 \cdot 10^6 \text{ pps}$.

Введение

Для измерения координат частиц в интенсивных пучках частиц от современных ускорителей обычно используются сцинтилляционные годоскопы, пропорциональные или дрейфовые камеры, детекторы типа GEM.

В настоящей работе изучена возможность применения для этой цели пиксельной камеры [1]. Камера состоит из трех секций с большим (40 мм) размером ячейки с целью уменьшения числа каналов (7 на секцию). Секции смещены друг относительно друга на 10 мм в вертикальном и на $\sqrt{300}$ мм в горизонтальном направлениях, чтобы иметь возможность определять координату частицы как точку пересечения трех окружностей. Исследованы зависимости эффективности камеры и точности восстановления координат от высокого напряжения, положения трека частицы и интенсивности пучка.

1. Конструкция секции

Один пиксель состоит из 6 параллельных оси пучка потенциальных проволок, расположенных по окружности диаметром 40 мм, и одной сигнальной проволоки в центре. Потенциальные проволоки изготовлены из бериллиевой бронзы БрБ2 диаметром 0,4 мм, сигнальная – позолоченная вольфрамовая проволока диаметром 20 мкм. Длина проволок 120 мм. Схема печатной платы показана на рис. 1.

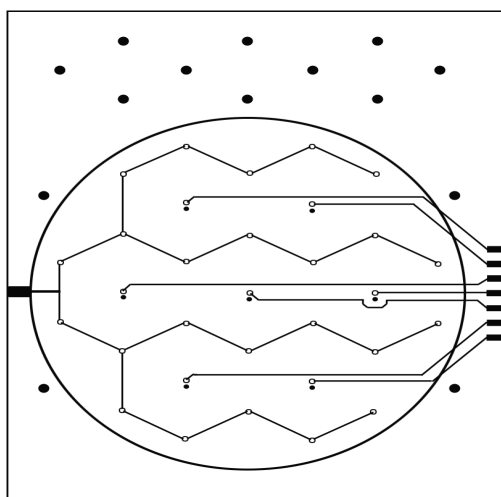


Рис. 1. Схема печатной платы одной плоскости камеры.

Она состоит из стеклотекстолитовой рамки, размером 140 x 165 x 1,5 мм³. Рамка имеет отверстие диаметром 120 мм на пути пучка, которая заклеена стеклотекстолитовой пленкой толщиной 200 мкм с разводкой соединений сигнальных и потенциальных проволок с ламелями. Возможно использование стеклотекстолитовой пленки толщиной 60 мкм. Так как отверстия для протяжки проволок были большего диаметра, чем диаметр проволоки (0,5 мм для потенциальной и 0,2 мм для сигнальной проволок), то отверстия смещались с учетом того, что проволоки ложились всегда на нижнюю точку каждого отверстия.

В верхней части рамки находятся три ряда отверстий диаметром 3 мм, которые позволяют не только достаточно точно собрать попарно рамки на направляющих, но и каждую последующую секцию сдвинуть относительно предыдущей на строго заданный шаг. Измерение времени дрейфа ионизационных электронов дает возможность оценить радиус окружности с центром в сигнальной проволоке, через которую могла пройти частица. Таким образом, смещение печатных плат секций дает возможность однозначно координату частицы как точку пересечения трех окружностей. Жесткость сборки секции достигается размещением между двумя рамками четырех текстолитовых стержней диаметром 8 мм вне области пучка.

Все три секции подвешиваются на направляющей полосе из стали и помещаются в закрытый газовый объем с майларовыми окнами толщиной 60 мкм. Непараллельность двух плоскостей направляющей полосы не хуже 20 мкм. Погрешность изготовления отверстий на печатной плате меньше 50 мкм. Точность изготовления направляющих для печатных плат 300 мкм. Для придания жесткости потенциальным проволокам из бериллиевой бронзы производилось закаливание проволок в термической печи в специально изготовленных формах из алюминиевого сплава AD31. Для повышения надежности крепления сигнальных проволок применялась дополнительная пайка. Натяжение сигнальных проволок составляет 32 г. Для определения конфигурации электростатического поля секции пиксельной камеры было проведено численное моделирование с использованием программы GARFIELD.

Результаты расчетов представлены на рис. 2 в виде силовых линий электростатического поля при рабочем высоковольтном напряжении 3 кВ.

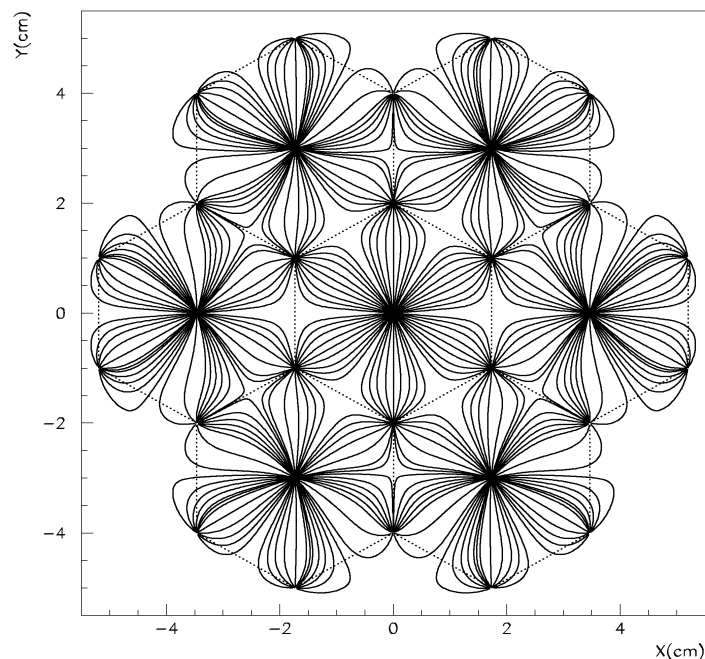


Рис. 2. Распределение силовых линий электрического поля в плоскости камеры.

2. Регистрирующая электроника

Для регистрации сигналов с камер в условиях больших загрузок камерная электроника должна удовлетворять двум противоречивым требованиям: высокое быстродействие и низкий уровень шумов при заданной емкости детектора. Оптимизация этих параметров необходима для минимизации рабочего газового усиления, которое определяет время жизни камеры из-за эффектов старения и ее загрузочную способность. В этом плане пиксельная камера обладает рядом существенных достоинств. Она позволяет иметь значительный газовый зазор по глубине, увеличивающий уровень первичной ионизации, и быстрый выходной сигнал, практически независимый от поперечных размеров ячейки. Маленькая емкость ячейки позволяет достичь низких значений шума при широкой полосе пропускания усилительного тракта.

В последнее десятилетие появилось значительное количество специализированных интегральных микросхем для съема информации с камер, работающих при больших нагрузках. Практически все они имеют одинаковую структуру канала регистрации. Это зарядочувствительный усилитель с оптимизированным временем интегрирования, усилитель-формирователь для компенсации медленных компонент входного сигнала и входного полюса передаточной характеристики, определяющегося емкостью детектора и входным сопротивлением усилителя, цепь быстрого восстановления базовой линии, дискриминатор с управляемым порогом и выходной буфер для работы на линию передачи. В нашем случае использовалась интегральная микросхема “Анод-2м”, разработанная и изготовленная по комбинированной биполярно-полевой радиационно-стойкой технологии [2].

Микросхема оптимизирована для работы с детекторами малой емкости (см. рис. 3). Формирователь микросхемы “Анод-2м” настроен на компенсацию двух полюсов (36 и 362 нс).

На рис. 4 приведены смоделированные выходные сигналы усилителя-формирователя при входном дельта-импульсе 10 фКл. Основные параметры “Анод-2м” приведены в табл.1.

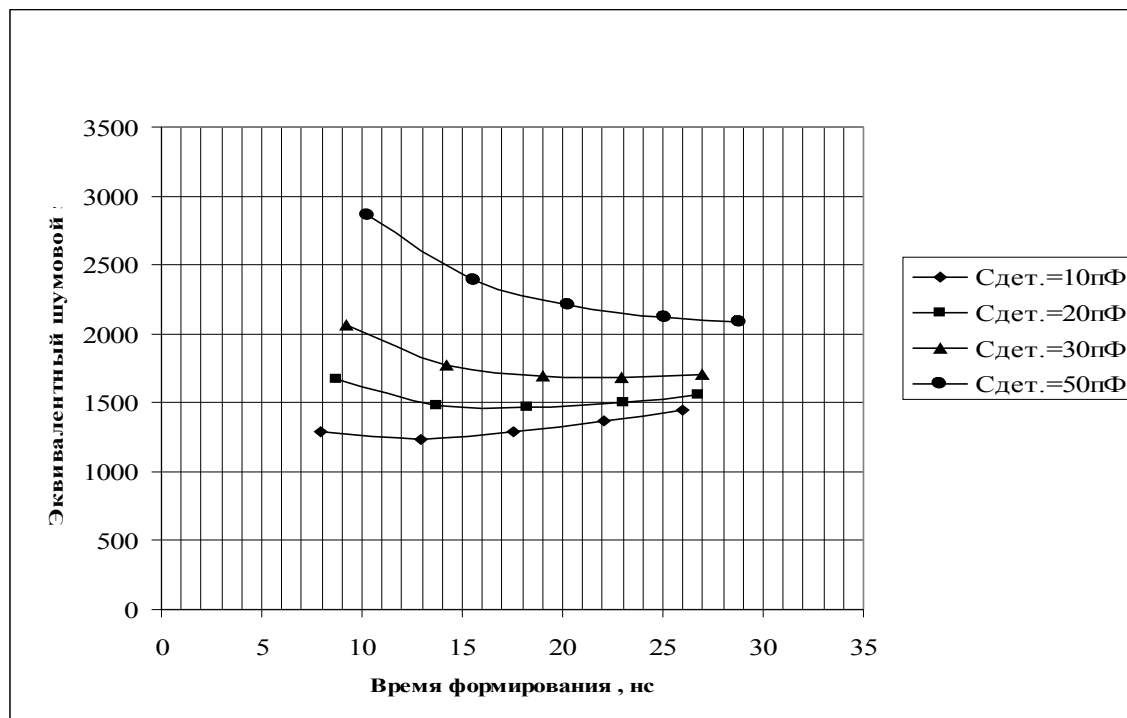


Рис. 3. Расчетные зависимости шума от времени формирования при разных емкостях детектора.

Таблица 1. Характеристики восьмиканальной интегральной схемы усилителя-формирователя- дискриминатора «Анод-2м».

Структура ИС «Анод-2м»		
Число каналов ИС	8	
Тип корпуса	48 выводной четырехсторонний планарный, шаг выводов 1мм	
Схема канала	ЗЧУ-формирователь-восстановитель базовой линии-дискриминатор	
Уровни напряжения питания	(5±0,5) В	
Ток потребления от источника питания	45 мА	
Параметры формирователя		
Тип формирователя	Интегратор 4-го порядка с компенсацией 3 экспонент (постоянной времени ЗЧУ и экспоненты токового сигнала с камеры)	
Время формирования Qвход. = 10 фКл [δ-импульс], Сдет.=0 (100 пФ)	15 нс (18 нс)	
Входное сопротивление	50 Ом	
Эквивалентный шумовой заряд (сигма)	1150e +32e/пФ	
Дифференциальный коэффициент преобразования Qвход. = 10 фКл [δ-импульс], Сдет.=0 (100 пФ)	18 мВ/фКл (12 мВ/фКл)	
Амплитуда выходного сигнала	0,5 В	
Кросс-ток между каналами	0,5%	
Параметры дискриминатора		
Тип дискриминатора	Однопороговый, продлевающего типа	
Минимальный порог	5 фКл	
Диапазон регулировки порога	(5÷40) фКл	
Длительность выходного сигнала Q порог. =10 фКл [δ-импульс], Сдет.=0 (100 пФ)	Qвход. = 20 фКл 25 нс (35 нс)	Qвход. = 100 фКл 50 нс (65 нс)
	Время распространения Qвход =100 фКл [δ-импульс], Qпорог. = 10 фКл, Сдет.=0 (100 пФ)	25 нс (25 нс)
Временная точность Qвход =(20÷200) фКл [δ-импульс], Qпорог = 10 фКл, Сдет.=0 (100 пФ)	3,7 нс (7 нс)	
Система тестирования		
Тестовые сигналы подаются одновременно на 8 каналов		
Номинал тестовой емкости	0,2 пФ	

Каждая микросхема монтировалась на индивидуальную карту с дополнительными цепями защиты по входу, стабилизации питания и регулировки порога дискриминации. Карты подключались к каждой секции камеры через индивидуальные разъемы вне газового объема.

Порог выставлялся по калибровочному сигналу одинаковым по уровню 20 фКл. Выходные сигналы передавались по 75-метровым витым парам в стандарте LVDS на вход преобразователя время–код.

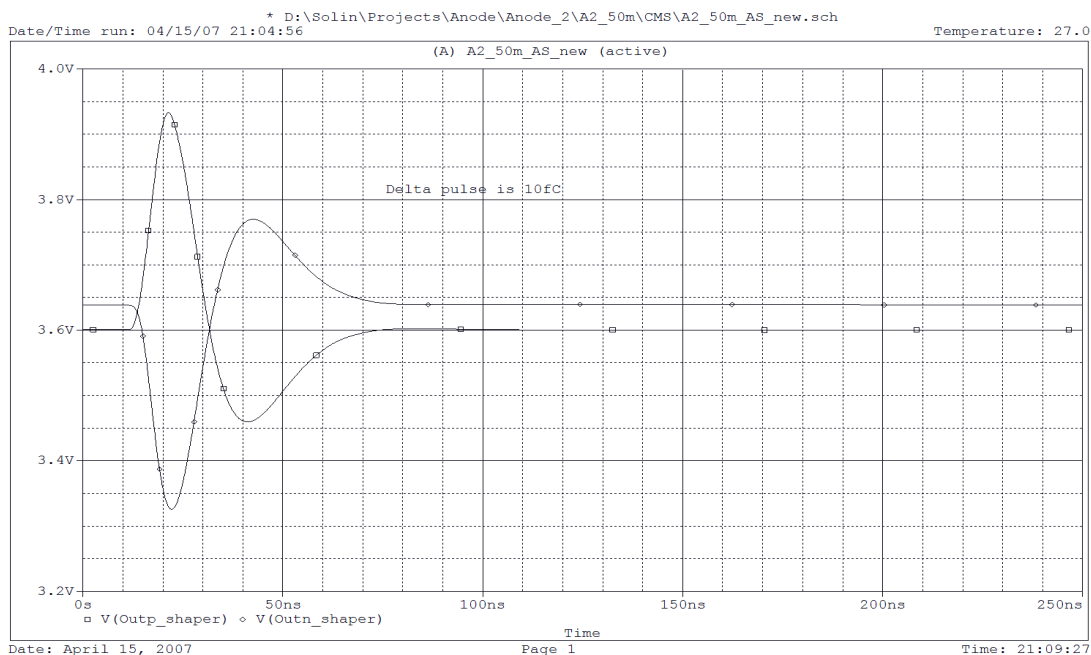


Рис. 4. Парафазный отклик усилителя-формирователя на дельта-импульс при Сдет.=10 пФ.

Для измерения времени дрейфа использовался TDC ЛЭ-78. Этот прибор построен на основе FPGA ALTERA EP1K50 и содержит 64 канала измерения. Преобразование времени в цифру основано на прямом счете с использованием пересчетных схем, поэтому «мертвое время» отсутствует. Для проведения измерений ЛЭ-78 был запрограммирован для работы в режиме «общий стоп», т.е. измерения интервалов времени с момента прихода сигналов от детектора до сигнала СТОП, общего для всех каналов измерения. Конструктивно модуль выполнен в соответствии с системой МИСС [3], что позволяет вычитывать из TDC только значащую информацию, т.е. информационные слова, содержащие номер сработавшего канала и соответствующее время с циклом чтения примерно 200 нс.

Основные параметры модуля представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры время-цифрового преобразователя.

Временное разрешение	~2,3 нс
Динамический диапазон преобразования	8 бит
Длительность входных сигналов	> 5 нс
Количество каналов измерения	64
Уровни входных сигналов	LVDS
Уровни управляющих сигналов	NIM

Сигналы подводятся к модулю двумя ленточными кабелями, подключаемыми к двум 68-контактным разъемам типа Robinson Nugent P50-068 на передней панели. Для входного сигнала СТОП и выходного сигнала ИЛИ используются коаксиальные разъемы типа LEMO 00.

3. Изучение характеристик пиксельной камеры

Детальное изучение характеристик пиксельной камеры было проведено при облучении их электронным и π -мезонным пучками на канале 2Б ускорителя ИФВЭ в диапазоне импульсов 6–34 ГэВ/с при интенсивности пучков до $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Пучок мониторировался телескопом из 4 сцинтилляционных счетчиков. На канале было размещено три исследуемые камеры, что позволило провести изучение характеристик пиксельной камеры без привлечения других трековых детекторов.

Камеры продувались двухкомпонентной газовой смесью Ar(80%)+CF₄ (20%) при потоке 0,06 л/мин. На рис. 5 приведены зависимости эффективности ϵ регистрации пучковой частицы и множественности срабатываний $\langle M \rangle$ от высокого напряжения на пиксельной камере. Эффективность рассчитывалась как вероятность срабатывания плоскости в средней камере при условии восстановления координат в двух крайних камерах.

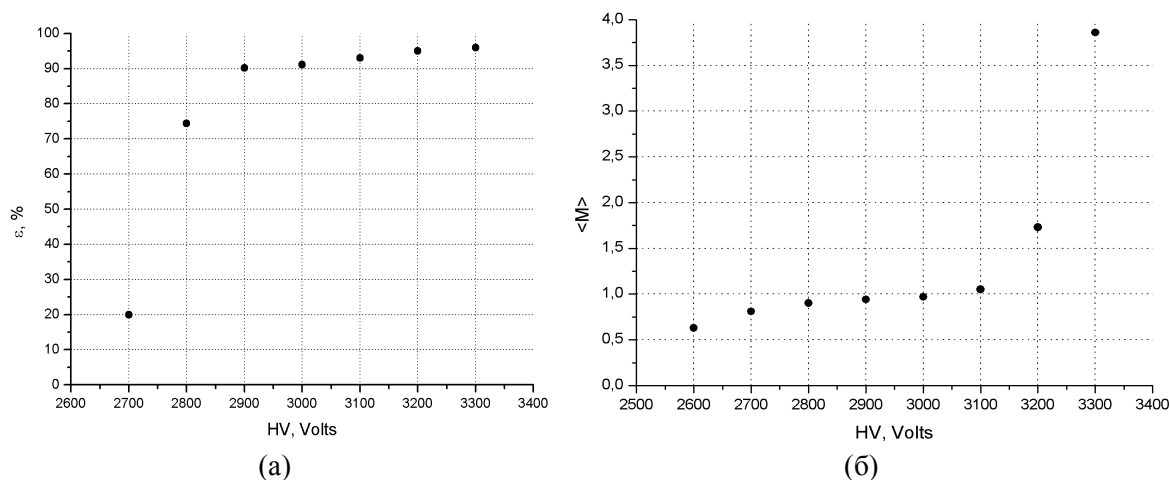


Рис. 5. Зависимость эффективности и множественности срабатывания камеры от высокого напряжения.

В качестве рабочего напряжения для дальнейшего изучения характеристик пиксельной камеры было выбрано 3 кВ. Временной спектр одного канала представлен на рис. 6, откуда следует, что максимальное время дрейфа для пиксельной ячейки диаметром 40 мм составляет ~ 250 нс.

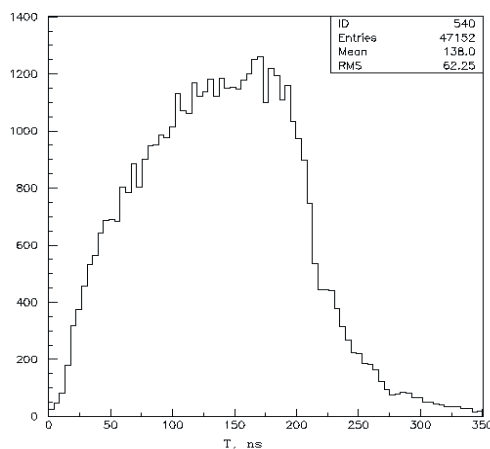


Рис. 6. Временной спектр одной ячейки камеры.

4. Восстановление координаты прохождения частицы и скорости дрейфа

При известной средней скорости дрейфа электронов в камере (v), координаты (x, y) прохождения частицы в системе из трех смещенных плоскостей определяются как точка пересечения трех окружностей с радиусами $R_i = v t_i$ с центрами (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , где t_i – время, зарегистрированное в i -й плоскости камеры.

В общем случае из-за погрешности измерений времени, конечной точности изготовления камер, а также возможных отклонений оси камеры от оси пучка эти окружности в одной точке не пересекаются. Одним из методов решения такой задачи является метод наименьших квадратов [4], когда определяется точка, минимально удаленная от всех трех окружностей, что и было реализовано в этой работе.

Однако скорость дрейфа также является неизвестной величиной. Для ее нахождения был использован следующий алгоритм. Для каждого события циклически задавалась обратная средняя скорость дрейфа в диапазоне от 8 до 15 нс/мм в каждой из трех камер, вычислялись координаты прохождения частицы и методом наименьших квадратов проводился трек через три камеры. После этого вычислялась сумма расстояний от восстановленной точки прохождения частицы до трека (S). При минимальном S значения скоростей дрейфа v и полученные радиусы R_i фиксировались. В результате были получены временные распределения для каждого R в диапазоне от 1 до 20 мм с шагом 1 мм. Эти распределения были аппроксимированы распределением Гаусса, и для каждого значения R были получены средние значения t . Из зависимости $R(t)$ легко получить искомую среднюю скорость дрейфа v .

Дрейфовая скорость v , как функция расстояния от сигнальной проволоки приведена на рис. 7. На этом рисунке для сравнения приведены данные F. Sauli [5] и результаты численного моделирования с использованием программы GARFIELD. Видно, что наблюдается хорошее согласие между данными.

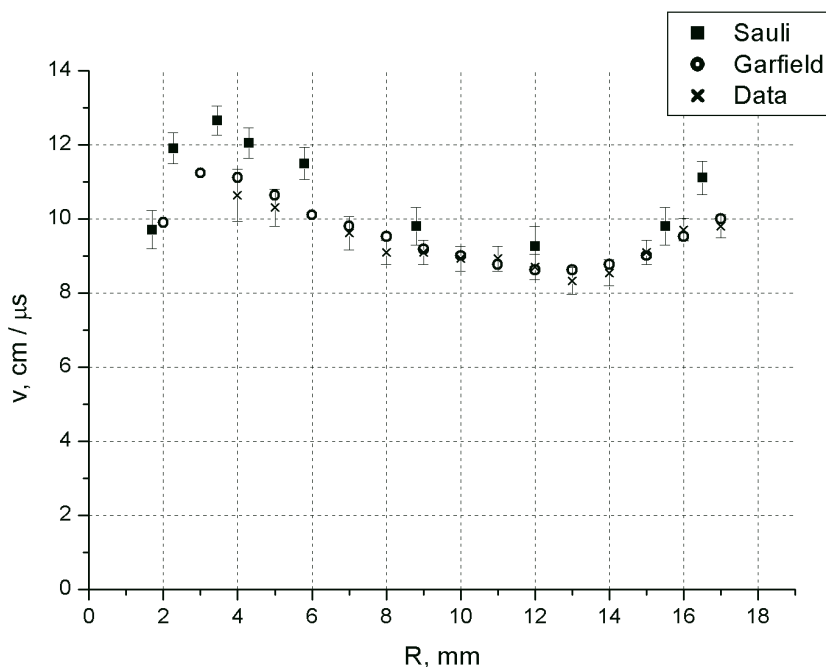


Рис. 7. Зависимость средней скорости дрейфа от расстояния дрейфа.

Основной задачей в исследовании дрейфовой камеры является вычисление координатного разрешения. Разрешение находилось следующим образом. Через две крайние камеры проводился трек и определялись отклонения восстановленной координаты в средней камере от этого трека (Δx и Δy). Величины Δx и Δy распределены по Гауссу с одинаковыми дисперсиями. Следовательно, распределение величины отклонения точки, измеренной в средней камере, от трека ΔR описывается распределением Рэлея с плотностью вероятности $P(\Delta R)$:

$$P(\Delta R) = \frac{\Delta R}{\sigma_{\Delta R}^2} e^{-\frac{\Delta R^2}{2\sigma_{\Delta R}^2}}.$$

Дисперсия этого распределения определяет разрешение системы из трех камер. Координатное же разрешение одной камеры равно среднеквадратичному отклонению величины:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{\Delta R}.$$

Зависимость координатного разрешения пиксельной камеры от расстояния между треком пучковой частицы и сигнальной проволокой приведена на рис. 8.

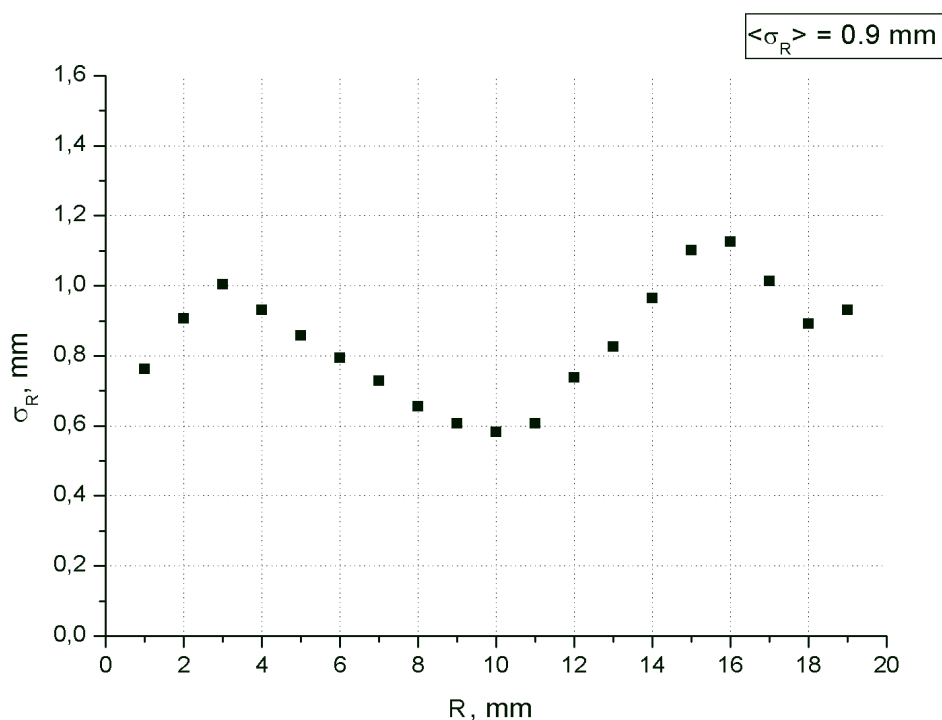


Рис. 8. Зависимость координатного разрешения камеры от расстояния точки регистрации до сигнальной проволочки.

Во всем диапазоне координатное разрешение σ_R остается не хуже 1,2 мм, а в центральной области достигает 0,6 мм.

Ухудшение координатного разрешения на краях ячейки объясняется ее геометрией – «неэффективные» области располагаются вблизи высоковольтных проволочек и по линиям ограничивающим площадь пикселя (рис. 2).

5. Изучение работы камеры при различных интенсивностях пучка

Эффективность камеры ε и ее координатное разрешение σ_R исследовались в диапазоне интенсивностей от $0,14 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ до $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Зависимость эффективности пиксельной камеры от интенсивности пучка приведена на рис. 9. Работоспособность камеры, хотя и с некоторым понижением эффективности, сохраняется до $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Среднее координатное разрешение в зависимости от интенсивности пучка приведено на рис. 10.

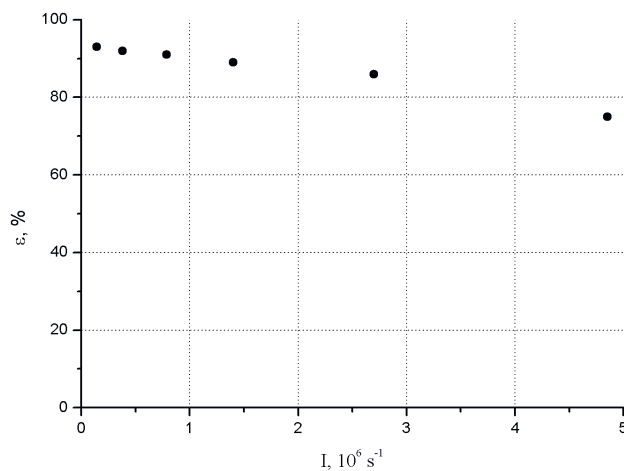


Рис. 9. Зависимость эффективности регистрации от интенсивности потока частиц.

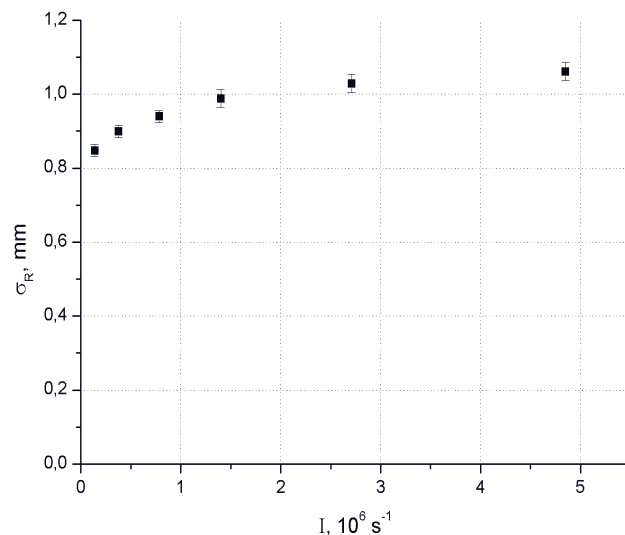


Рис. 10. Зависимость среднего координатного разрешения камеры от интенсивности потока частиц.

Заключение

Исследованы характеристики пиксельной камеры с размером ячейки 40 мм и длиной газового промежутка 120 мм. Пространственное разрешение камеры, усредненное по размеру ячейки, оказалось равным 0,9 мм при интенсивности пучка до $\sim 10^6 \text{ с}^{-1}$. Оно увеличивается до 1,1 мм при интенсивности $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Эффективность регистрации частиц меняется от 90% до 75% при увеличении интенсивности пучка от 10^6 с^{-1} до $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$.

Дальнейшее улучшение пространственного разрешения, эффективности и загрузочной способности камеры возможно прежде всего за счет уменьшения размера ячейки камеры и увеличения числа потенциальных проволок (в пределе переход к сплошным высоковольтным электродам).

Благодарности

Авторы благодарят С.П. Денисова за поддержку исследований, Н.К. Марчихина за помощь в производстве печатных плат, В.М. Кораблёва за участие в расчетах электрических полей пиксельных структур.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-16557).

Список литературы

1. Balagura V. // Gas Pixel Chambers. NIM A368 (1995) 252-258
2. M.A. Baturitsky et al. // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 44 (1995), p. 628.
3. Бушнин Ю.Б., Ваньёв В.С., П.И.Гончаров и др. – Препринт ИФВЭ 88-47, Серпухов, 1988.
4. Дж. Себер. Линейный регрессионный анализ. – М: «Мир», 1980.
5. Reisert A., Sauli . F Drift and diffusion of electrons in gases: a compilation. – Preprint CERN 84-08, 1984.

Рукопись поступила 7 декабря 2007 г.

В.А Беззубов, Ю.В Гилицкий, М.Ю. Костин и др.
Пиксельная 21-канальная дрейфовая камера.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы *Word*.
Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати 14.12.2007. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ.л. 1,37. Уч.– изд.л. 1,2. Тираж 90. Заказ 120. Индекс 3649.
ЛР №020498 от 17.04.97.

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

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2007-19, ИФВЭ, 2007
