

Б-24



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-91-257

**БАРАБАШ
Леонид Сергеевич**

УДК 539.1.074

**КООРДИНАТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

**Специальность: 01.04.01 - техника эксперимента,
физика приборов,
автоматизация физических исследований**

**Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук**

Дубна 1991

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор	ЦЫГАНОВ Эдуард Николаевич
доктор физико-математических наук, профессор	ТЯПКИН Алексей Алексеевич
доктор физико-математических наук, профессор	ЕРМОЛОВ Павел Федорович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт физики высоких энергий, г. Протвино.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1991 года
в " _____ " часов на заседании специализированного совета
Д-047.01.02. при Лаборатории высоких энергий Объединенного
института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ
Автореферат разослан " _____ " _____ 1991 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета

М. Ф. ЛИХАЧЕВ

Актуальность работы: Стремление к изучению новых фундаментальных свойств материи, изучение явлений с малыми сечениями требует повышения энергии ускоренных частиц, используемых для исследований в физике высоких энергий, создания новых, более мощных как по энергии, так и по интенсивности ускорителей заряженных частиц и, соответственно, адекватного развития техники детекторов заряженных частиц. Повышение энергии пучков обуславливает рост размеров физических установок для регистрации исследуемых процессов, определяет применение детекторов с большой чувствительной площадью. Среди обширного числа детекторов, применяемых для регистрации частиц высоких энергий, проволочные газовые детекторы занимают одно из ведущих мест.

Создание гигантских установок для исследований в физике элементарных частиц требует новых подходов и идей, применения новых технологий в технике детекторов. Разработки и поиски новых особенностей в режимах работы детекторов, новых схем и конструктивных решений играют важную роль в развитии этой области экспериментальной физики.

В связи с этим развитие методов регистрации частиц высоких энергий, разработки в этой области являются весьма актуальной задачей.

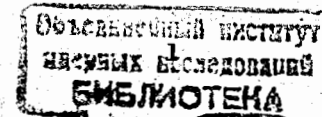
Цель работы состояла в дальнейшем развитии и совершенствовании методов регистрации заряженных частиц, исследовании и разработке газовых проволочных детекторов больших площадей для экспериментов в области нейтринной физики, в развитии и разработке новых методов регистрации и детекторов, позволяющих повысить информативность систем регистрации треков частиц, наиболее полно реализовать возможности и особенности явлений, возникающих в детекторах при прохождении через них заряженных частиц.

Настоящей работой автор защищает:

1. Исследования, разработки и создание детекторов с большой чувствительной площадью.

1.1. Создание и исследование больших дрейфовых камер установки НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР.

1.2. Исследование характеристик больших дрейфовых камер в



нейтринном пучке.

1.3. Новый способ высоковольтного питания проволочных газовых детекторов, позволяющий реализовать надежную и эффективную работу дрейфовых камер в составе установки.

2. Исследование и развитие метода регистрации заряженных частиц с использованием центра тяжести для вычисления координат частиц в детекторах.

2.1. Исследования пропорциональных камер с катодным считыванием информации, позволяющих реализовать высокую точность регистрации треков частиц.

2.2. Разработку и исследования нового детектора - сцинтилляционного позиционно-чувствительного счетчика с измерением координат треков частиц по центру тяжести распределения интенсивности света в сцинтилляторе.

2.3. Создание и исследование характеристик нового микрострипового полупроводникового детектора с измерением координат треков частиц по центру тяжести распределения заряда на резистивном электроде.

2.4. Исследования особенностей схем с ПЗС-регистрами при использовании последних для регистрации временных интервалов.

2.5. Разработку метода оценки возможной точности регистрации детекторов с центром тяжести, позволяющего анализировать и прогнозировать результаты, ожидаемые при использовании этого класса детекторов.

Научная новизна и практическая ценность заключается в предложении и реализации ряда методических решений, позволивших создать уникальные газонаполненные проволочные детекторы для исследований в области нейтринной физики, дальнейшем развитии нового направления в методике - детекторов с измерением координат треков частиц по центру тяжести распределений заряда.

На основе обширных исследований как характеристик различных типов дрейфовых камер, так и режимов и особенностей регистрации треков частиц в них, поиска новых решений в конструкции и применения новых материалов создана конструкция большой дрейфовой камеры для установки НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР, созданы 120 дрейфовых камер размером $4 \times 2 \text{ м}^2$, камеры установлены и отлажены в составе установки в нейтринном пучке ИФВЭ [1-5].

Разработаны и созданы конструкционные элементы больших камер - панели с сотовым заполнением площадью $4 \times 2 \text{ м}^2$, являющиеся

основой конструкции дрейфовых камер. Создана методическая база, обеспечившая создание не только больших дрейфовых камер, но и детекторов для нескольких экспериментальных установок, например, создание серии пропорциональных камер для установок СВД и НЕПТУН, общее количество которых составляет порядка 100 шт.

Предложен новый способ высоковольтного питания электродов газонаполненных детекторов [6], обеспечивающий надежную работу детекторов в пучке. Этот способ успешно используется в других установках.

Проведены исследования пропорциональных камер с катодным считыванием информации, получена точность регистрации треков частиц равная 50 мкм, изучены новые особенности этих детекторов, использование которых позволяет повысить точность регистрации, вести эффективную режекцию событий с δ -электронами [7-9,14].

Исследованы процессы формирования и регистрации распределений заряда в детекторах с резистивными электродами. [13,15].

Предложен и исследован новый тип детектора - позиционно-чувствительный сцинтилляционный счетчик, позволяющий получить точность регистрации треков частиц в сцинтилляторе 1.3 мм при шаге считывания по измеряемой координате 20 мм [10].

Предложен и исследован новый микростриповый полупроводниковый детектор, позволяющий получать высокую точность измерения координат треков частиц при умеренном количестве каналов регистрации информации [11, 12].

Исследованы возможности схем с ПЗС-регистрами при измерении временных интервалов [17].

Предложена схема новой дрейфовой камеры для точной регистрации координат треков мюонов высоких энергий [20].

Предложена и исследована методика оценки точности регистрации детекторов с измерением координат треков по центру тяжести распределений заряда [11-13].

Апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы в отечественных и зарубежных журналах, сообщениях ОИЯИ, докладах на международных конференциях и совещаниях, защищены авторскими свидетельствами на изобретения.

Публикации. Материалы, изложенные в диссертации, опубликованы в работах [1-20], выполненных автором в 1980-1990 гг.

Диссертация состоит из трех глав, введения и заключения, изложена на 139 страницах машинописного текста, иллюстрирована 64

рисунками, содержит 5 таблиц и список цитируемой литературы из 71 наименования.

Краткое содержание работы

Диссертация состоит из двух частей. В первой части, включающей в себя первую и вторую главу, приведены исследования и разработки, выполненные автором в области детекторов с большой чувствительной площадью - больших дрейфовых камер, созданных для изучения физики нейтрино. Вторая часть диссертации содержит третью главу, посвященную попытке обобщить результаты развития новой области методики - детекторов с измерением координат по центру тяжести вторичных распределений, возникающих при прохождении заряженных частиц через чувствительный объем детектора.

В первой главе дано описание НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА, созданного усилиями сотрудничества Дубна - Будапешт - Цойтен - Протвино, работающего в настоящее время в нейтринном пучке ускорителя У-76 ИФВЭ [1].

НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР состоит из трех основных частей: мишени-калориметра, ливневого детектора электронов и γ -квантов и мюонного спектрометра.

Для измерения энергии в мишени-калориметре используются сцинтилляционные счетчики, наполненные жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Общий объем сцинтиллятора в мишени составляет 110 тонн. Вес активной мишени ограничен размерами $3 \times 3 \text{ м}^2$ и, с учетом установленных дополнительно в каждом зазоре пластин из алюминия толщиной 50 мм, составляет 100 тонн.

Мишень содержит 36 модулей, полная длина мишени по пучку равна 27.5 м. Каждый модуль имеет среднюю плотность 0.41 г/см^3 , составляет 1.24 радиационной и 0.33 ядерной длины взаимодействия и содержит: намагниченную железную раму размером $4.5 \times 4.5 \text{ м}^2$ и толщиной 105 мм по пучку, имеющую внутреннее окно $3 \times 3 \text{ м}^2$, 10 жидкостных сцинтилляционных счетчиков размером $(0.2 \times 0.3 \times 5) \text{ м}^3$ и две координатных плоскости X и Y дрейфовых камер размером $4 \times 4 \text{ м}^2$.

Мюонный спектрометр содержит 13 намагниченных дисков диаметром 4 м и толщиной по пучку 220 мм. В передней части спектрометра установлены пять одинарных дисков, четыре сдвоенных по толщине диска установлены в конце. В зазорах между дисками установлены плоскости X и Y дрейфовых камер, два зазора

оборудованы годоскопическими плоскостями сцинтилляционных счетчиков.

Ливневой детектор электронов расположен между мишенью - калориметром и мюонным спектрометром, имеет размеры $(0.2 \times 3.6 \times 3.6) \text{ м}^3$ и содержит 18 горизонтально расположенных слоистых счетчика (12 слоев свинца по 4 мм каждый и 12 слоев 10мм пластического сцинтиллятора).

Каждый модуль мишенной части и мюонного спектрометра содержит X- и Y-плоскости дрейфовых камер. Для установки, по разделению обязанностей между ИФВЭ и ОИЯИ, были созданы два типа камер: камеры размером $4 \times 0.5 \text{ м}^2$ - разработаны и изготовлены в ИФВЭ, камеры размером $4 \times 2 \text{ м}^2$ - разработаны и изготовлены в ОИЯИ [2, 4].

Дрейфовые камеры первого типа установлены во второй половине мишенной части (20 модулей), в остальных модулях мишенной части (17 модулей) и в мюонном спектрометре (10 модулей) установлены дрейфовые камеры второго типа. Оба типа камер имеют идентичную структуру сигнального элемента дрейфовой ячейки, отличие состоит в том, что камеры, изготовленные в ИФВЭ, имеют дрейфовый промежуток $\pm 250 \text{ мм}$, в камерах ОИЯИ дрейфовый промежуток равен $\pm 122.5 \text{ мм}$.

Общее количество камер, работающих в составе установки НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР -

камеры ИФВЭ	360 шт ($4 \times 0.5 \text{ м}^2$)
камеры ОИЯИ	104 шт ($4 \times 2 \text{ м}^2$)

Вторая глава содержит результаты исследований, определивших конструкцию больших дрейфовых камер, в ней приведены характеристики камер, полученные при работе в нейтринном пучке.

При создании детекторов большой чувствительной площади, таких как детекторы для исследований физики нейтрино, возникает необходимость оптимального выбора типа детектора. Одним из основных параметров, определивших тип детектора, является количество каналов регистрации информации, которое при дрейфовом промежутке $\pm 122.5 \text{ мм}$ составило порядка 4000.

Сигнальный элемент камеры содержит три плоскости проволочных массивов, не имеет резонансных областей, положение сигнальных и катодных проволок при подаче на них высоких напряжений стабильно [3]. Смещения при свободной длине проволоки равной 4 м составляют $\approx 180 \text{ мкм}$. Из учета возможного изгиба панелей с сотовым заполнением свободная длина сигнальных и катодных проволок была

выбрана равной 1.3 м и на длине 4 м были установлены 2 поддерживающих элемента.

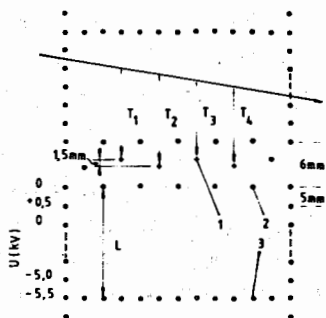


Рис. 1. Схема дрейфовой ячейки. 1-сигнальные, 2-катодные и 3-проволоки распределенного потенциала.

Структура сигнального элемента показана на рис. 1. Он содержит четыре сигнальных проволоки, смещенные относительно центральной плоскости ячейки на ± 0.75 мм, как показано на рисунке. Смещение сигнальных проволок позволяет разрешить лево-правую неопределенность и получить стабильное положение сигнальных проволок в пространстве.

Для наполнения камер используется смесь $Ar + 6\%CO_2$, имеющая насыщение по скорости дрейфа электронов 0.5 кВ/см и не являющаяся взрывоопасной. Проведены исследования трех- и четырехкомпонентных смесей, сформулированы требования к газовым смесям для дрейфовых камер.

Использование обычной схемы высоковольтного питания, когда на электроды камеры подаются постоянные напряжения, приводит к тому, что при достаточно долгой эксплуатации камер в них возможны срывы по частоте шумов. Эти эффекты наблюдаются практически во всех газовых проволочных детекторах и определяются наличием микроострий и поляризацией диэлектриков, используемых в конструкции камер. Тренировка обратным напряжением, меры по чистоте, применяемые при закрывании камер, значительно снижают вероятность возникновения коронных разрядов, являющихся причиной роста частоты шумов с проволок. Однако, полностью исключить эти эффекты не удается.

Довольно эффективно это явление может быть подавлено применением квазипульсного высоковольтного питания электродов камеры. На рис. 2. показаны временные диаграммы работы системы высоковольтного питания в таком режиме [5,6]. Суть его заключается в следующем: между циклами ускорителя напряжение

питания сигнальных и потенциальных проволок выставляется на 1 кВ ниже рабочего. Перед сбросом пучка на мишень напряжения повышаются до уровня, достаточного для эффективной работы камер. Далее, после сброса, напряжения снова снижаются на 1 кВ до следующего цикла ускорителя. Таким образом, рабочие напряжения устанавливаются только на время сброса пучка. На рис. 3. приведены сравнительные характеристики двух камер при постоянном и импульсном режиме работы. Эффективность регистрации треков (левая шкала, кривые 1 и 2) не зависит от режима работы системы высоковольтного питания. Существенное отличие наблюдается в зависимости шумовых характеристик камер от сигнального напряжения (правая шкала, пунктир 1 и 2 - постоянное напряжение, сплошные кривые 1 и 2 - импульсный режим). Как видно из рисунка, импульсный режим дает заметный выигрыш в ширине плато по эффективности регистрации треков частиц. Кроме того, применение импульсного режима значительно повышает надежность работы камер во время сеансов. Аналогичный режим работы системы высоковольтного питания применен для пропорциональных камер и показал положительные результаты.

Характеристики больших дрейфовых камер исследованы при работе камер в составе установки и использовании режима импульсного высоковольтного питания. Порог регистрации считывающей электроники был равен 1 мкА.

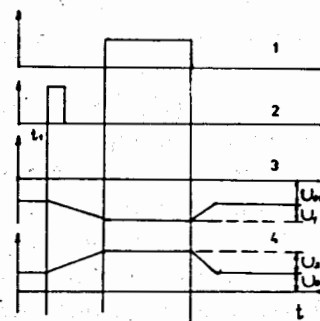


Рис. 2. Временные диаграммы работы системы высоковольтного питания дрейфовых камер в импульсном режиме.

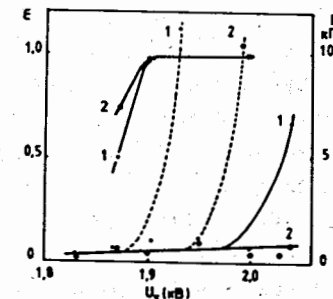


Рис. 3. Характеристики двух камер при постоянном и импульсном режиме питания.

Смещение сигнальных проволок относительно центра симметрии дрейфовых ячеек позволяет разрешить лево-правую неоднозначность по распределению величины K_1 , равной:

$$K_1 = 1/2(T_1 - 3T_2 + 3T_3 - T_4) = \pm 4\Delta T$$

где T_i - времена, зарегистрированные отдельными сигнальными проволоками, ΔT - временной сдвиг сигналов, определяемый сдвигом сигнальных проволок относительно центра симметрии дрейфовой ячейки.

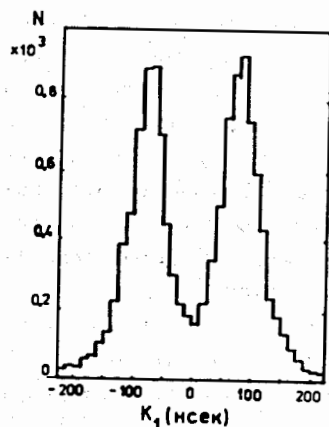


Рис. 4. Распределение K_1 , проинтегрированное по дрейфовому промежутку.

На рис. 4. показано распределение величины K_1 для сигнальных элементов дрейфовых камер, проинтегрированное по дрейфовому промежутку. Изучение зависимости $K_1=f(x)$ показывает, что вероятность ошибки в определении левых и правых треков составляет несколько процентов.

Неоднородности в распределении полей в дрейфовых ячейках можно оценить по поведению коэффициента K_2 :

$$K_2 = (T_1 - T_2) - (T_3 - T_4) = (T_1 + T_4) - (T_2 + T_3)$$

По распределению величины K_2 можно оценить среднюю точность регистрации координат треков в дрейфовых камерах на смеси $Ag+6\%CO_2$, которая равна $\sigma_1 \approx 1$ мм. [5].

Суммарное распределение срабатываний дрейфовых камер в течении нескольких суток сеанса на ускорителе в нейтринном пучке, характеризующее уровень шумов в системе камер, показано на рис. 5.

Создание большой серии детекторов подобных дрейфовым камерам установки НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР потребовало последовательного выполнения работ по разработке, проектированию и созданию макетов дрейфовых камер, технологического оборудования для изготовления как деталей, так и собственно камер. Созданию большой серии предшествовало создание опытной серии дрейфовых камер, при исследовании характеристик которых была отработана конструкция серийной камеры.

Для выполнения этих работ в ОП ОИЯИ был создан участок изготовления проволочных детекторов. Создание конструкторской документации на опытную серию дрейфовых камер было закончено к

началу 1982 года, в этом же году были изготовлены пять опытных камер. В I квартале 1983 года была закончена разработка документации на серийную дрейфовую камеру, к концу года были изготовлены первые 10 серийных камер. Изготовление дрейфовых камер в количестве 120 шт. было закончено в 1985 году.

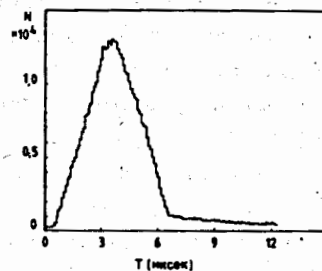


Рис. 5. Суммарное распределение срабатываний дрейфовых камер при работе в нейтринном пучке.

В результате выполнения цикла работ по дрейфовым камерам НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА в ОИЯИ была создана методическая база по изготовлению проволочных детекторов, подготовлены квалифицированные кадры в этой области. В 1985 году участок был дополнен линией для производства пластиковых дрейфовых трубок для адронного калориметра установки DELPHI.

В дальнейшем на этом участке были изготовлены несколько сот модулей дрейфовых труб для установки "МЕЧЕННЫЕ НЕЙТРИНО", для установок СВД и НЕПТУН изготовлены около 100 пропорциональных камер.

В третьей главе обсуждаются возможности метода измерения координат треков частиц по центру тяжести вторичных распределений, возникающих в детекторах после прохождения заряженной частицы через объем детектора. Не вызывает сомнения, что при повышении требований точность регистрации, практически в любом детекторе мы приходим к необходимости использовать этот метод измерения координат треков. Эта методика достаточно широко применяется в экспериментальных установках в последнее время несмотря на сложность канала регистрации информации, который должен иметь аналоговую линию задержки сигналов с чувствительных элементов детектора и анализ амплитуды сигналов.

В обычных детекторах, при дискретном шаге регистрации координат треков (например, пропорциональные камеры со считыванием информации с анодных проволок, "микростриповые" полупроводниковые детекторы или дрейфовые камеры с пороговой электроникой), ошибка в измеряемой координате определяется

выражением:

$$\sigma = W / \sqrt{12} \quad (1)$$

где W - пространственный или временной интервал считывания координаты.

Улучшение точности регистрации треков частиц в таких детекторах возможно только за счет уменьшения шага W , что приводит к значительному увеличению количества каналов регистрации информации на единицу измеряемой координаты.

Точность регистрации координаты для рассматриваемых ниже детекторов может быть оценена по формуле [11-13]:

$$\sigma = (\Delta Q/Q)W \quad (2)$$

где $\Delta Q = \alpha \sigma_n$

σ_n - ошибка измерения заряда в канале регистрации информации (шумы каналов электроники),

Q - регистрируемый полный заряд,

$\alpha > 1$ - коэффициент, который определяется методом вычисления координаты.

Для метода средневзвешенного, $\alpha \approx \sqrt{n}$, где n - количество каналов, по которым вычисляется координата. Фитирование распределений приближенными функциями позволяет получать α близким к единице.

Формула (2) справедлива для случая, когда расстояние между центрами считывающих электродов W примерно равно среднеквадратичному отклонению регистрируемого распределения σ_Q и может быть записана в виде:

$$\sigma = (\Delta Q / Q) \sigma_Q \quad (3)$$

В этом случае необходимо, чтобы W , интервал считывания координаты, был меньше или порядка σ_Q , т. е. количество точек на экспериментальном распределении было достаточно велико.

Из формул (2) и (3) следует, что точность регистрации, при заданном шаге считывающих электродов, определяется относительной ошибкой в измерении полного заряда. В связи с этим, использование малошумящих входных устройств в канале регистрации информации является необходимым условием, ибо в этом случае удастся наиболее полно реализовать преимущества этого метода измерения координаты: высокое разрешение по измеряемой координате при минимальном количестве каналов считывания и регистрации информации.

К таким детекторам относятся пропорциональные камеры с катодным считыванием информации, детекторы с формированием распределений заряда на резистивном слое, позиционно -

чувствительные сцинтилляционные детекторы и дрейфовые камеры с измерением временной координаты по центру тяжести импульсов с сигнальных проволок.

Одним из основных достоинств пропорциональных камер с катодным считыванием информации является возможность получения высокой точности регистрации заряженных частиц. В работах [7-9,14] получены результаты по точности регистрации при использовании для вычисления координат метода средневзвешенного и метода наименьших квадратов (МНК).

Для вычисления координат треков методом средневзвешенного использовалась формула:

$$x_0 = \frac{\sum (q_i - q)x_i}{\sum (q_i - q)}$$

где q_i - заряд, регистрируемый i -тым стрипом, q - смещение распределения заряда, определяемое наличием емкости между стрипами и анодом камеры.

В работе [8] для определения номеров стрипов, входящих в кластер, по которому вычисляется центр тяжести зарядового распределения, применено дифференцирование регистрируемого распределения. На рис. 6. показано распределение заряда, индуцированного на катодных стрипах, и процедура дифференцирования. При использовании такого подхода получена точность регистрации треков $\sigma = 65$ мкм.

Фитирование распределений индуцированного заряда формулой

$$f(x) = \frac{A}{ch^2 \frac{\pi}{S}(x-x_0)} \quad (4)$$

где A - величина, пропорциональная полному заряду, выделенному в лавине, а S - свободный параметр, характеризующий ширину распределения заряда, индуцированного на катоде камеры, позволяет получить точность регистрации $\sigma = 50$ мкм. На рис. 7. приводится распределение второй разности Δ , полученное для координат, вычисленных по МНК [7].

Преимущества использования МНК по сравнению с методом средневзвешенного особенно заметны в случае применения камер с широкими стрипами. На рис. 8. [14] показана зависимость точности регистрации координат лавины в пропорциональной камере с шириной стрипов $W = 18$ мм ($D = 7$ мм, $W/D = 2.57$) от напряжения на камере. Видно, что использование МНК позволяет улучшить точность примерно в 3 раза.

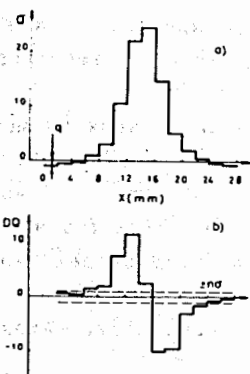


Рис. 6. Распределение заряда, регистрируемое системой стрипов (а) и дифференциальный спектр амплитуд (б).

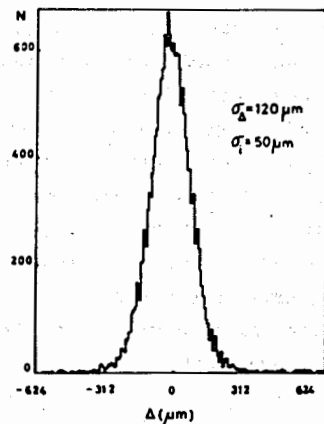


Рис. 7. Распределение величины Δ для координат, вычисленных с использованием фита (4).

В исследованиях формы распределений заряда, регистрируемых на катодных стрипах отмечалось, что ширина распределений (FWHM) составляет не менее $2D$, где D — расстояние между анодом и катодами камеры. При использовании простых методов вычисления координат треков это приводит к тому, что два рядом лежащих трека возможно разрешить при расстояниях между ними больше $2D$. Однако, еще в ранних работах по исследованию пропорциональных камер было высказано предположение о том, что форма регистрируемого на катодных стрипах заряда должна быть стабильна и эта особенность камер может быть использована для улучшения многотрекового разрешения, что подтверждено исследованиями, выполненными в работе [10]. На рис. 9. показано распределение параметра S (см. формулу (4)), характеризующего ширину распределений заряда для событий, регистрируемых в камерах. Из рисунка видно, что ширина распределения заряда, определяемая геометрией электродов камеры, в случае регистрации одной частицы, является стабильной величиной. Среднеквадратичное отклонение составляет $70 \mu\text{м}$ при среднем значении параметра S равном $5,65 \text{мм}$. Это обстоятельство может быть использовано для улучшения многотрекового разрешения этого типа детекторов.

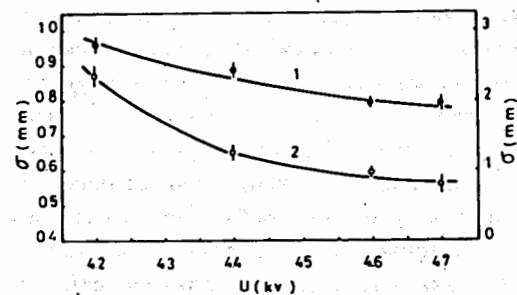


Рис. 8. Зависимость точности регистрации треков в пропорциональной камере с катодным считыванием информации от напряжения на камере ($D=7 \text{мм}$, $W=18 \text{мм}$): кривая 1 — координаты вычислены по центру тяжести индуцированных распределений (правая шкала), кривая 2 — с использованием распределения Коши (левая шкала).

Как указывалось ранее, одной из привлекательных особенностей обсуждаемых детекторов является возможность получения высокой точности измерения координат треков при минимальном количестве каналов регистрации информации. Однако, при использовании широких стрипов (по отношению к ширине индуцированного распределения заряда, $W > \sigma_0$) наблюдается систематическое смещение вычисленной координаты относительно истинной, имеющее вид периодической функции. Период функции равен расстоянию между центрами катодных стрипов W , узлы функции расположены по центрам стрипов и на границе между ними.

Основным источником, приводящим к систематическим ошибкам, является наличие емкости связи C_m между катодными стрипами, амплитуда отклонений вычисленной координаты от истинной зависит от величины коэффициента связи $K=C_m/C$, где C — сумма емкостей стрип-заземленный экран и входной емкости усилителя, подключенного к стрипу [8,14]. Емкостная связь между стрипами приводит к перераспределению зарядов на соседних стрипах, величина которого пропорциональна разности регистрируемых зарядов. При этом для событий, координаты которых совпадают с центрами стрипов ($x_0=0.5Wn$) либо лежат на границе двух стрипов ($x_0=Wn$), регистрируемое распределение симметрично и ошибок в вычисленной координате не возникает. Ошибки максимальны для событий с координатами $x_0=0.25Wn$ и $x_0=0.75Wn$ и имеют разный знак для этих групп событий.

В работе [14] проведены исследования систематических ошибок возникающих при регистрации лавины широкими стрипами. Для

вычисления поправок в измеренные амплитуды зарядов с разных стрипов использовалось матричное уравнение, учитывавшее коэффициенты связи между стрипами. Индуцированные лавиной сигналы регистрировались независимо системами стрипов верхнего и нижнего катодов камеры, сдвинутыми по координате на величину $0.5W$, что позволяло оценить точность регистрации лавины по распределению величины $\Delta = C_1 - C_2$, где $C_{1,2}$ - координаты лавины, вычисленные по разным катодам, и измерять систематические ошибки по поведению среднего значения величины Δ в зависимости от координаты лавины.

На рис. 10. показано изменение величины Δ в зависимости от места прохождения трека при разных коэффициентах связи. Как видно из рисунка, правильным учетом коэффициента связи систематические ошибки в вычисленной координате могут быть сведены до минимума. Очевидно, что необходимо иметь коэффициент связи между стрипами как можно меньше. Для этой цели желательно применять в канале регистрации информации зарядово-чувствительные усилители с большой динамической емкостью входа.

Важной особенностью такого типа камер является отсутствие "ложных" треков при регистрации двух координат трека в одной камере. Мечение треков возможно по регистрируемому полному заряду и по времени дрейфа [18].

В пропорциональных камерах с катодным считыванием информации ширина распределения заряда, индуцированного на катоде, определяется конструкцией камеры и может быть изменена только изменением расстояния между анодом и катодами камеры D . Дополнительная возможность формирования заданного распределения заряда появляется при использовании в детекторах резистивных электродов. Распределение заряда, индуцированное на резистивном электроде, уширяется со временем за счет диффузии заряда с постоянной, определяемой величиной поверхностного сопротивления R_{\square} и погонной емкостью C_{\square} . Регистрация распределения заряда производится системой внешних электродов (стрипов или площадок), ширина регистрируемого распределения может изменяться дополнительно изменением длительности импульса, стробирующего входы АЦП, и задержки строба относительно времени пролета частицы через детектор. К таким детекторам относятся дрейфовые трубки с резистивными катодами и "миктостриповые" полупроводниковые детекторы с резистивным электродом.

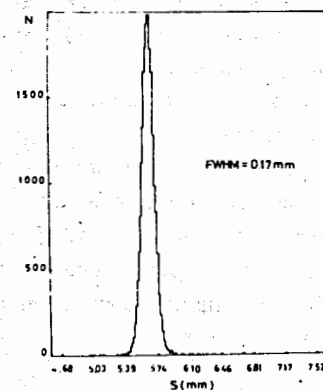


Рис. 9. Распределение параметра S , характеризующего ширину регистрируемых катодными стрипами распределений заряда.

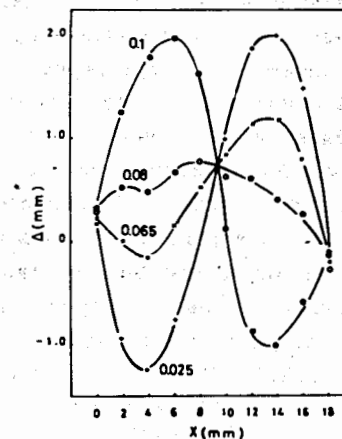


Рис. 10. Изменение среднего значения параметра $\Delta = C_1 - C_2$ от координаты при разных коэффициентах связи между стрипами.

Экранирующее действие поверхностного сопротивления определяется скин-эффектом для различных составляющих спектра импульса тока. Расчеты, приведенные в этом разделе работы, показывают, что поверхностные сопротивления прозрачны излучению лавины вплоть до достаточно малых значений сопротивлений [13] и основным процессом, определяющим формирование распределений заряда является диффузия заряда по поверхностному сопротивлению [15].

Эти представления развиты для полупроводниковых позиционно-чувствительных детекторов, имеющих резистивные электроды и в которых физика формирования распределений заряда аналогична процессам в пластиковых дрейфовых трубках. В обычных микростриповых полупроводниковых детекторах ширина распределений заряда, определяемая диффузией носителей, не превышает 3-5 мкм [16], и попытка использовать ее для повышения точности регистрации с применением аппарата центра тяжести позволяет реализовать высокую точность регистрации треков, но, в то же время, приводит к необходимости иметь значительное количество каналов регистрации информации из детекторов. Применение

детекторов с резистивными слоями позволяет оптимизировать это отношение. На рис.11. показана схема микрострипового полупроводникового детектора [11], в котором регистрация распределения заряда, формирующегося на резистивном электроде, осуществляется системой внешних стрипов, изолированных от кристалла. В качестве распределенного сопротивления в детекторе использовался слой необедненного полупроводника, что позволяло формировать распределения заряда в системе "резистивный слой - погонная емкость детектора", которые приведены на рис.12.[12]. Предложенная схема полупроводникового детектора позволила получить точность регистрации 25мкм при шаге считывающих стрипов равном 0.5мм.

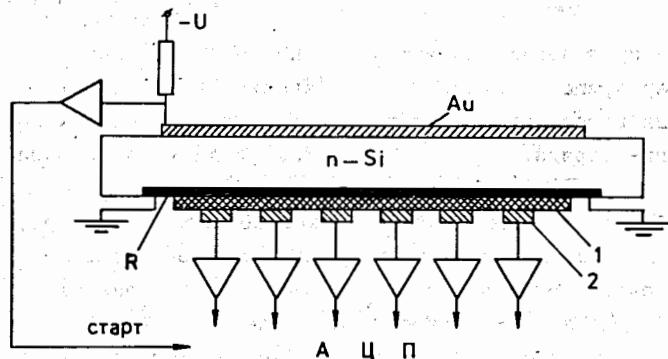


Рис.11. Схема полупроводникового детектора с резистивным слоем.

Описанная выше схема полупроводникового микрострипового детектора привлекает внимание тем, что позволяет иметь высокую точность регистрации координаты при значительно меньшем по сравнению с обычными микростриповыми детекторами количестве каналов регистрирующей электроники и сравнительной простоте технологии изготовления детекторов.

Координаты треков частиц могут быть измерены по центру тяжести распределений интенсивности света в сцинтилляторе. Схема позиционно-чувствительного сцинтилляционного счетчика, приведенная на рис.13., исследована в работе [10]. Между двумя сцинтилляторами толщиной $L=40$ мм размещена система полосковых световодов, выполненных из полистирола с добавками преобразователя частоты, образующих координатную систему. Полосковые световоды были изолированы друг от друга по свету и

имели ширину равную $W = 20$ мм. Каждый световод имел оптический контакт с фотоумножителем, импульсы с выходов ФЭУ подавались на входы АЦП, стробировавшиеся сигналами триггера с длительностью 15 нсек.

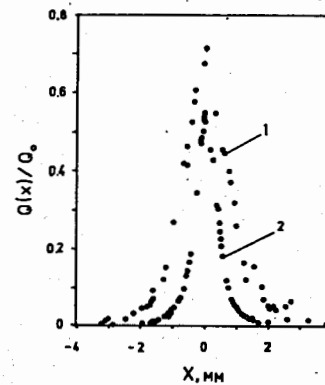


Рис.12. Форма распределений заряда на резистивном электроде, регистрируемая системой стрипов: 1- $W=1.25$ мм, 2- $W=0.5$ мм.

Для оценки точности регистрации использовался коллимированный радиоактивный источник ^{106}Ru и светодиод, имитировавший заряженные частицы. Точность регистрации определялась по центру тяжести распределения интенсивности света, зарегистрированного полосковыми световодами, и при регистрации электронов от источника ^{106}Ru получена равной $\sigma = 3$ мм. При имитации частиц коллимированным светодиодом, который давал световую вспышку по амплитуде соответствующую треку в сцинтилляторе длиной ≈ 40 мм, и ширине коллиматора 0.8мм точность регистрации составляла $\sigma = 1.3$ мм. На рис.14. показаны распределения координат, вычисленные по центру тяжести интенсивности света, регистрируемой полосковыми световодами, при двух положениях коллимированного светодиода.

Приводятся результаты измерений формы распределений интенсивности света от электронов источника ^{106}Ru и космических частиц. Полная ширина на полувысоте (FWHM) распределений интенсивности света от частиц космического излучения составляет 25 мм.

Необходимо отметить еще одну особенность такого детектора. При использовании для считывания системы полосковых световодов, не требуется иметь хорошую прозрачность сцинтиллятора. Более того, изменением прозрачности сцинтиллятора можно формировать в некоторых пределах распределение интенсивности света, регистрируемое полосковыми световодами.

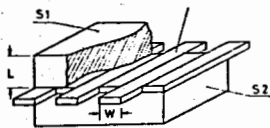


Рис. 12. Схема позиционно-чувствительного сцинтилляционного счетчика.

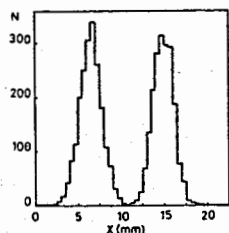


Рис. 13. Распределение координат событий, регистрируемых полосковыми световодами, при двух положениях светодиода.

В последнее время в экспериментальной технике бурно развивается еще одно направление, в котором используется аппарат метода центра тяжести. Речь идет об измерении временных интервалов в системах с дрейфовыми камерами. Обычно, в этом случае, используется пороговая электроника и измерение времени прихода импульса с сигнальных проволок относительно сигнала триггера производится с помощью время - цифровых преобразователей (TDC). С появлением быстрых аналогово - цифровых преобразователей (FADC), которые позволяют вести оцифровку временных сигналов с частотами до 100 МГц, возникла возможность использовать метод центра тяжести для измерения временных координат треков частиц в дрейфовых камерах.

Так же как и при измерении пространственных координат, точность измерения временных координат можно оценить используя формулу (2), в которой, в этом случае, W означает период оцифровки амплитуды импульса. Как видно из формулы (2), при измерении временных координат также возникает вопрос об оптимальном периоде считывания амплитуды сигнала при известной его длительности. Это обстоятельство является весьма важным, поскольку определяет глубину памяти FADC, используемой для запоминания информации, и степень сложности дальнейшей обработки информации.

Наиболее существенными преимуществами, которые дает использование метода центра тяжести при измерении временных координат по сравнению с обычной пороговой электроникой, является

возможность получения лучшей точности регистрации и высокое двухтрековое разрешение.

Исследования возможностей схем с ПЗС-регистрами, в которых производится измерение временных интервалов по центру тяжести распределений заряда, выполнены в работе [17], в которой приводится схема ПЗС-регистра с объемным каналом переноса заряда. ПЗС-регистр был исследован на частоте 25 МГц, которая является граничной для данной схемы и определяется быстродействием выходного усилителя. Подбором напряжений смещения на входном диоде и затворах МОП-транзистора можно установить режим, при котором схема интегрирует входной сигнал в течении всего такта, и импульсы на входе преобразуются в гистограмму с интервалом измерения времени, равным периоду тактового генератора. Время хранения информации в ПЗС-регистре составляло ≈ 10 мсек.

ПЗС-регистры обладают прекрасным свойством преобразователя частот входных сигналов, позволяя производить запись информации на одной частоте, считывание - на другой. В приведенных исследованиях запись производилась на частоте 25 МГц, считывание и оцифровка - на частоте 6 МГц.

Малые собственные шумы ПЗС позволяют получать малую относительную погрешность измерения заряда и, соответственно, реализовать высокую точность измерения временной координаты. Измерение временных интервалов производилось по величине отношения Q_i/Q_{i+1} , где Q_i - заряд, зарегистрированный в i -той ячейке ПЗС и в которую по времени попадает начало входного импульса, Q_{i+1} - заряд в следующей ячейке. При амплитуде входных импульсов 100 мВ и такте оцифровки сигналов 40 нсек получена точность регистрации $\sigma = 0.5$ нсек для импульсов прямоугольной формы и 1.2 нсек - для экспоненциальных импульсов. Приведенная зависимость точности регистрации времени от амплитуды входного экспоненциального импульса при разных временах такта оцифровки сигналов, подтверждает справедливость формулы (2) (относительная ошибка измерения полного заряда была порядка 1%).

Результаты исследований показывают, что использование ПЗС-регистров совместно с FADC в схемах регистрации информации дает возможность реализовать по сравнению с пороговой электроникой следующие преимущества:

- высокую точность регистрации временных интервалов,
- измерение полного заряда в лавине, что позволяет оценивать dE/dx и проводить режекцию событий с δ -электронами,

- иметь малую потребляемую мощность на канал,
- осуществлять мультиплексирование каналов электроники регистрации информации.

Одним из основных явлений, ограничивающих точность регистрации газовых проволочных детекторов, является статистика электронов ионизации, рождаемых частицей в газовой смеси, наполняющей камеры. Известно, что в двух- или трехкомпонентных смесях релятивистская частица рождает порядка 100 пар/см. Эта и без того бедная статистика дополнительно подавляется эффектами объемного заряда, возникающего при образовании лавин вблизи тонких проволок. В результате, количество кластеров, регистрируемое проволоками значительно меньше, чем количество электронов ионизации. Эти эффекты определяются коэффициентом газового усиления и повышение точности регистрации газовых детекторов возможно за счет:

- увеличения статистики кластеров при увеличении длины отрезка трека, с которого собираются электроны ионизации,
- подавления эффектов объемного заряда снижением коэффициента газового усиления, использованием более толстых сигнальных проволок, применением медленных газовых смесей и использованием для регистрации отрезка трека нескольких проволок, сигналы с которых суммируются на входном сопротивлении усилителя.

В этом случае можно ожидать точность регистрации треков, равную:

$$\sigma_d = \sigma_1 / \sqrt{n}$$

где σ_1 - точность регистрации треков отдельной проволокой,
 n - количество проволок, с которых суммируются сигналы.

Одновременно, применение схемы суммирования, позволяет повысить отношение сигнал-шум и существенно сократить количество каналов регистрации информации [18-20].

В заключении приведены основные результаты, нашедшие отражение в диссертации:

1. В результате исследований, проведенных в области детекторов, имеющих большую чувствительную площадь, созданы 120 дрейфовых камер для исследований в нейтринном пучке ускорителя У-76 ИФВЭ.

1.1. Создана серия основных конструктивных элементов для больших дрейфовых камер - панелей с сотовым заполнением размером $4 \times 2 \text{ м}^2$.

1.2. Проведены исследования и отработка конструкции отдельных элементов дрейфовой камеры, изучены электростатика дрейфовых ячеек и оптимальные условия сбора электронов ионизации на чувствительные проволоки сигнальных элементов. Исследованы газовые смеси, используемые для наполнения дрейфовых камер.

1.3. Предложен и внедрен новый способ питания электродов дрейфовых камер, позволяющий получить большую ширину плато по эффективности регистрации треков и обеспечить надежную работу камер. Аналогичный режим применен для пропорциональных камер и показал хорошие результаты.

1.4. Большие дрейфовые камеры установлены и отлажены в ИФВЭ, исследованы их характеристики при работе в нейтринном пучке. Камеры работают в составе аппаратуры установки НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР в течение нескольких лет.

2. Проведен анализ современного состояния области детекторов заряженных частиц с использованием для вычисления координат треков центра тяжести вторичных распределений, возникающих в детекторах при регистрации следов частиц. Предложена методика оценки ожидаемой точности регистрации для этого класса детекторов.

2.1. Проведены исследования пропорциональных камер с катодным считыванием информации, получена точность регистрации треков частиц равная 50 мкм. Исследована форма распределений индуцированного заряда, регистрируемого на катодах пропорциональных камер. Показано, что форма индуцированных распределений является стабильной величиной, зависящей от геометрии электродов пропорциональной камеры. Эта характеристика совместно с полным зарядом, регистрируемым при образовании лавины вблизи анодных проволок камеры, может быть использована как независимый критерий для повышения точности регистрации и многотрекового разрешения пропорциональных камер. Предложен способ мечения треков по времени дрейфа. Изучены источники систематических ошибок, возникающих при вычислении координат треков, предложены способы учета последних.

2.2. Исследованы процессы формирования распределений заряда на резистивных катодах пластиковых дрейфовых трубок, предложена методика расчета прозрачности резистивных покрытий. Показано, что прозрачность таких катодов слабо зависит от величины поверхностного сопротивления.

2.3. Предложен и исследован новый полупроводниковый

микростриповый детектор, в котором координаты треков частиц определяются по центру тяжести распределений заряда, формирующегося на резистивном слое необедненного полупроводникового кристалла и регистрируемого внешней системой электродов, изолированных от детектора. В детекторах такого типа получена точность регистрации α -частиц $\sigma = 25$ мкм при расстоянии между центрами считывающих электродов $W = 0.5$ мм.

2.4. Предложен и исследован новый позиционно-чувствительный сцинтилляционный счетчик, в котором координаты треков частиц определяются по центру тяжести распределений интенсивности света, регистрируемых внешней координатной системой световодов. Применение метода центра тяжести позволяет реализовать достаточно высокую точность регистрации треков при умеренном количестве каналов регистрации информации. Получена точность регистрации равная 1.3 мм при интервале считывания координаты 20 мм.

2.5. Предложена новая схема дрейфовой камеры с суммированием сигналов с группы проволок, в которой возможна высокая точность регистрации координат треков частиц высоких энергий. Предложенная схема суммирования сигналов позволит снизить коэффициент газового усиления, что дает возможность увеличить количество кластеров, регистрируемых проволоками. Ожидаемая точность регистрации при суммировании сигналов с n проволок $\sigma = \sigma_1 / \sqrt{n}$, где σ_1 - точность регистрации координат одной проволокой.

2.6. Проведены исследования канала регистрации информации, в котором в качестве аналоговой линии задержки используется ПЗС-регистр. Исследована зависимость точности регистрации временных интервалов от амплитуды сигналов на входе ПЗС-регистров, в которых при вычислении временной координаты используется метод центра тяжести. Показана возможность получения высокой точности регистрации (≈ 1 нсек) при временном интервале оцифровки сигналов, равном 40 нсек.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Л.С. Барабаш, С.А. Бунятов, И.А. Голутвин и др., Новый нейтринный детектор для серпуховского ускорителя, Материалы III Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ, Р 1,2,13-83-81, Дубна (1983), стр. 10-11.
2. Л.С. Барабаш, И.А. Голутвин, Ю.Л. Злобин и др., Конструкция серийной дрейфовой камеры для установки

НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР,

Материалы V Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ, Д 1,2,13-84-332, Дубна (1984), стр. 108-111.

3. Л.С. Барабаш, И.А. Голутвин, Н.И. Замятин и др., Исследование характеристик макета дрейфовой камеры, Материалы III Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ, Р 1,2,13-83-81, Дубна (1983), стр. 37-42.
4. Л.С. Барабаш, А.Г. Карев, Б.А. Морозов и др., Исследование характеристик серийных дрейфовых камер, Материалы V Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ, Д 1,2,13-84-332, Дубна (1984), стр. 112-116.
5. Л.С. Барабаш, С.А. Баранов, Н.В. Горбунов и др., Характеристики дрейфовых камер мюонного спектрометра установки НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР, Сообщение ОИЯИ, Р 1-88-516, Дубна (1988).
6. А.С. №118405 СССР, G 01 T 1/18, 5/12, Л.С. Барабаш и В.В. Чалышев, Способ питания высоким напряжением электродов дрейфовой камеры, ОИ №29 (1987), стр. 263.
7. Л.С. Барабаш, А.М. Баранов, Г.Б. Бондаренко и др., Исследование характеристик пропорциональных камер с катодным считыванием информации, Препринт ОИЯИ, Р9-82-724, Дубна, 1982.
8. L.S. Barabash, A.M. Baranov, G.B. Bondarenko et al., A study of the detection accuracy of proportional chambers with cathode read-out, Nucl. Instr. & Meth. A236 (1985) p.271-274.
9. Л.С. Барабаш, А.М. Баранов, Г.Б. Бондаренко и др., Исследование характеристик многопроволочных пропорциональных камер с катодным съемом информации, Препринт ИФВЭ, 83-182, Серпухов, 1983.
10. L.S. Barabash, V.V. Chalishev, I.E. Chirikov-Zorin et al., Measurements of the coordinates of particle tracks by the center of gravity of a light flash in a scintillator, Nucl. Instr. & Meth. 211 (1983) p.331-333.
11. А.С. №1220461 СССР, G 01 T 1/24, H 01 L 31/02, Л.С. Барабаш и В.В. Чалышев, Полупроводниковый позиционно-чувствительный детектор, ОИ №24 (1990), стр. 273.
12. L.S. Barabash, E. Belcaz, Yu.V. Gurov et al., Semiconductor Microstrip Detector with a Resistive Layer, Nucl. Instr. & Meth. A288 (1990), p. 375-378.

13. Л.С. Барабаш, Л. Месарош, В.В. Чалышев,
К оценке прозрачности резистивных катодов,
Сообщение ОИЯИ, Р 13-86-563, Дубна (1986).
14. Л.С. Барабаш, А.В. Вишнеvский, Н.В. Власов и др.,
Исследование пространственного разрешения большой пропор-
циональной камеры с аналоговым считыванием информации с
катодов, Сообщение ОИЯИ, Р13-81-554, Дубна, 1981.
15. Л.С. Барабаш, Т.И. Корешкова, Л. Месарош и др.,
Измерение прозрачности резистивных катодов,
Сообщение ОИЯИ, 13-87-31, Дубна (1987).
16. H. Boettcher, A. Donat, R. Leiste...L.Barabash... et al.,
Performance of silicon strip detectors with 50 and 100 μm strip
distance, Nucl. Instr. & Meth. 226 (1984) p.72-77.
17. Л.С. Барабаш, Н.В. Горбунов, Ю.Б. Дубасов и др.,
Измерение временных интервалов с использованием ПЗС-регистров,
Сообщение ОИЯИ, Р 13-90-511, Дубна (1990) стр.10.
18. L.S.Barabash, Some comments to investigations of limit
strimear tybes,
EMPACT note #325,(1990).
19. L.S.Barabash, S.A.Baranov, O.Yu.Denisov et al.,
The construction of the precision drift chamber,
EMPACT note #326 (1990).
20. L.S.Barabash and M.Yu.Kazarinov,
Drift Chambers for Precision Track Measurement of the
Trjectories of High Energy Muons,
JINR Rapid Communications, # 7 [46] - 90, p.74-77.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июня 1991 года.