



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

33

В.М. Аульченко, Л.М. Курдадзе, М.Ю. Лельчук,
В.П. Нагаслаев, А.Б. Номероцкий,
Л.В. Романов, А.Г. Чилингаров

**СТРИМЕРНЫЕ ТРУБКИ: ИЗМЕРЕНИЕ
ПОПЕРЕЧНОЙ И ПРОДОЛЬНОЙ КООРДИНАТ**

ПРЕПРИНТ 85-122



НОВОСИБИРСК

АННОТАЦИЯ

Для оптимизации параметров стримерных трубок—элементов детектора СКИФ—изучены зависимости свойств стримерного режима от диаметра анода, состава газовой смеси, материала катода, первичной ионизации. При работе в дрейфовом режиме получено поперечное разрешение 130 мкм. Измерение продольной координаты методом разности времен прихода сигнала на противоположные концы трубки позволило получить разрешение 15 мм при эффективной длине 15 метров.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе изучается возможность применения трубок, работающих в стримерном режиме (стримерных трубок), в качестве элементов вершинной части и мюонной системы детектора СКИФ (Спектрометр-Калориметр для Иpsilon Физики) [1]. Этот новый универсальный детектор планируется создать в ИЯФ СОАН СССР для экспериментов на накопителе со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-4М.

Стримерный режим отличается большими ($\sim 1\text{мА}$) и короткими ($\sim 100\text{нс}$) сигналами. Впервые он был получен около 15 лет назад в камерах и счетчиках с относительно толстыми анодными проволочками в рабочих газах с большой концентрацией органических добавок, хорошо поглощающих фотоны [2, 3]. Однако потребовались кропотливая работа и большие усилия энтузиастов [4, 5] по изучению свойств стримерного режима прежде чем он нашел широкое применение в эксперименте. Подробный обзор механизма и известных свойств стримерной моды газового разряда приведен в работе [6].

В последнее время стримерные трубки активно применяются в экспериментах для регистрации частиц. Наибольшее распространение получили конструкции из стримерных трубок, работающие в режиме ДА-НЕТ [7, 8]. Менее изучена возможность их работы в дрейфовом режиме (измерение поперечной координаты по времени дрейфа электронов). Нам известен только один пример использования дрейфовых стримерных камер в эксперименте (в Дубне, СССР [6]).

Интерес к стримерному режиму объясняется тем, что большая амплитуда стримерного сигнала и ее малый разброс (20%—80%) позволяют упростить регистрирующую электронику, снизить требования к порогам чувствительности, временной стабильности. Другими словами, стримерный режим удешевляет электронику, повышает ее помехоустойчивость и надежность.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРИМЕРНОГО РЕЖИМА

Измерения проводились на тестовых трубках, изготовленных из алюминизированного лавсана толщиной 20 мкм [9], золоченого лавсана толщиной 100 мкм, стали толщиной 200 мкм. Диаметр тестовых трубок 14 мм, длина 40 см. Тонкие лавсановые стенки давали возможность работать как с источником электронов ^{90}Sr , так и с источником фотонов ^{55}Fe (6 КэВ). Нужно отметить также, что использование в качестве катода алюминизированного лавсана позволяло наблюдать образование стримеров от единичных электронов. Для этого использовались фотоэлектроны, вылетающие из катода при освещении трубки источником света (малая работа выхода, по-видимому, обеспечивается примесями, содержащимися в алюминии).

Компоненты рабочего газа смешивались в потоке в нужной пропорции. Для очистки и осушения CO_2 пищевого и технического стандартов (99,5%) применялась очистная система, содержащая активированный уголь и силикагель. Трубки продувались газовой смесью при атмосферном давлении.

Для визуального наблюдения сигналов, их оцифровки был использован цифровой осциллограф «МАГНОЛИЯ-06» с интерфейсом в стандарте КАМАК [10]. Предельное временное разрешение осциллографа 0,5 нс на точку, Полная временная шкала содержит 128 точек и может изменяться от 64 нс до 8,2 мкс.

На рис. 1 приведены осциллограммы характерных стримерных сигналов и, для сравнения, пропорционального сигнала, полученные на «МАГНОЛИИ».

На рис. 2 приведена упрощенная схема измерения эффективности образования стримера. После 50-кратного усиления сигнал поступает на два дискриминатора: с высоким (1000 мВ) и низким (15 мВ) порогом. Входное сопротивление дискриминаторов 50 Ом. Эффективность определяется как отношение скоростей счета на высоком и низком пороге. Началом плато считалось напряжение,

при которой эффективность достигала 97%—98%, а концом — напряжение, соответствующее быстрому росту загрузки трубки.

1.1. Влияние диаметра анодной проволоочки на работу трубок

Хотя влияние диаметра анодной проволоочки на стримерный режим хорошо изучено, до сих пор в литературе нет убедительного объяснения того, почему стример лучше образуется на толстых проволоочках.

С газовой смесью 45% $\text{Ar} + 55\% \text{CO}_2$ (неочищенный) были измерены характеристики трубок, различающихся лишь диаметром анода. Были использованы проволоочки диаметром 30, 60, 100, 120, 150 и 200 мкм. При диаметрах меньше 100 мкм нам не удалось получить устойчивого стримерного режима. Загрузки начинали резко возрастать раньше выхода эффективности на плато. На рис. 3 приведены счетные характеристики для диаметров 60, 100 и 200 мкм. В середине плато эффективности амплитуда, длительность, фронт сигналов совпали, в пределах погрешностей измерения, для всех диаметров анода.

Из результатов измерений можно сделать вывод, что после достижения величины 100 мкм диаметр проволоочки перестает существенно сказываться на работе трубки.

Почему же стримерный режим возникает именно на толстых проволоочках?

Существует следующее объяснение [11]: при малом диаметре проволоочки лавина может охватывать анод. Поэтому разные части лавины оказываются заэкранированы друг от друга проволоочкой.

Представляются разумными еще два предположения:

1. Рассмотрим как выглядят поля при толстой и тонкой проволочке, и как они выглядят, когда на них накладывается поле одинаковых по размеру и заряду лавин (рис. 4). Чем тоньше проволочка, тем резче изменяется напряженность поля. В случае толстой проволоочки поле первичной лавины существенно изменяет форму первоначального поля. Напряженность поля на краю пространственного заряда лавины может достичь и даже превысить напряженность поля на поверхности анодной проволоочки. Таким образом, первичная лавина создает выделенное место для образования вторичных лавин и развития стримера перпендикулярно к проволочке.

В случае тонкой проволоочки на более крутом склоне первоначального поля

Газовая смесь	U раб. (В)	Плато (В)	Амплитуда (мВ/50 Ом)	Длительность FWHM (нс)	Фронт (нс)
70% Ag + 30% CO ₂	3250 [*]	0	60—80	100	15
45% Ag + 55% CO ₂	4050	100	60—80	70	10
20% Ag + 80% CO ₂	4600	150	80—100	40	6—7
50% Ag + 50% i-C ₄ H ₁₀	4400	600	130—160	75	9—10
i-C ₄ H ₁₀	7200 [*]	>1500	20—40	15—20	3—4
63% CO ₂ + 37% n-C ₅ H ₁₂	6100	1100	60—80	15—20	3—4

^{*} Максимальное достигнутое напряжение.

На рабочих напряжениях при характерных нагрузках 200—400 Гц/см от источника ⁹⁰Sr эффективность составляла 99%—100% и слабо зависела от газовой смеси и диаметра анода.

К смесям Ag + CO₂ добавлялось 23 мм рт.ст. этилового спирта. Для этого газ продувался через спирт при температуре 10° С. Смесь с n-пентаном также приготавливалась путем пропускания CO₂ через жидкий n-пентан при 10° С.

Интересно отметить, что сначала при использовании неочищенного CO₂ (газовая смесь 45% Ag + 55% CO₂) имелось небольшое плато эффективности (~40 В). Но после его очистки и осушения резкий рост шумов начинался раньше выхода эффективности на плато. Таким образом плато исчезло. Это произошло, по-видимому, из-за удаления из газа органических примесей. Добавление в смесь этилового спирта позволило получить плато величиной 100 В.

С ростом концентрации CO₂ отмечается уменьшение длительности сигнала и его фронта (таб. 1). Это, по-видимому, является проявлением собственных гасящих свойств CO₂. Чем лучше гасящие свойства газа, тем на меньшие расстояния успевают отлетать фотоны. При этом вторичные лавины имеют для развития меньшую базу. Это приводит к тому, что стример становится короче, а сигнал от него, следовательно, получается меньшей длительности. Аналогичный эффект при увеличении концентрации гасящей добавки имеет место и в органических смесях [6].

чального поля гораздо менее заметно влияние поля первичной лавины. Первоначальное поле искажается слабо и, при достаточном напряжении, возбуждения атомов газа будут развиваться во вторичные лавины вероятнее всего вдоль проволоки, что приводит к возникновению гейгеровского разряда.

2. Коэффициент размножения (число электронов/см) растет с ростом напряженности поля [12]. Значит на тонкой проволоке, где поле растет резче, лавина получается плотнее и, следовательно, поле лавины экранирует внешнее поле быстрее (при меньших размерах лавины). Поэтому на тонких проволоках первичные лавины достигают меньших размеров. Это может уменьшать вероятность развития стримера, например, из-за меньшего числа фотонов, испускаемых лавиной.

Вообще, если говорить о переходе к стримерному режиму, то можно сказать, что он появляется, когда толщина проволоки становится больше характерного размера лавины.

1.2. Влияние газового состава на характеристики трубок

В 1982 году стримерный режим впервые был получен в неорганической смеси (Ag + CO₂) [13]. Необходимо отметить, что получение стабильного стримерного сигнала в смесях с CO₂ выглядит очень привлекательным. Углекислый газ безопасен (негорюч и неядовит), легко доступен, относительно легко поддается очистке. Очень важным его преимуществом является уменьшение эффектов старения трубок при работе с высокими нагрузками [14]. В органических же смесях интенсивно протекают процессы полимеризации [15].

Нами была проанализирована работа трубок с тремя видами газовых смесей:

- Ag + CO₂ + C₂H₅OH,
- Ag + i-C₄H₁₀,
- CO₂ + n-C₅H₁₂.

Основные результаты измерений сведены в таблицу 1.

Под рабочим напряжением понимается напряжение соответствующее середине плато эффективности. Фронт определяется как время нарастания сигнала от 10% до 90% амплитуды. Для амплитуды, длительности и величины фронта взяты характерные значения при рабочих напряжениях. Измерения проведены на трубках с катодом из алюминизированного лавсана.

1.3. Зависимость вероятности образования стримера от первичной ионизации

При анализе амплитудных спектров и распределений по полному заряду была изучена зависимость вероятности образования стримера от первичной ионизации трех видов (от источников ^{90}Sr , ^{55}Fe и единичных электронов) для разных газовых смесей.

В случае облучения трубки фотонами изотопа ^{55}Fe в газе образуется один крупный кластер ионизации (~ 200 электронов). Бета-излучение изотопа ^{90}Sr оставляет цепочку кластеров, характерное расстояние между которыми 300 мкм. При этом подавляющая часть кластеров содержит от одного до трех электронов.

На рис. 5 приведены зарядовые спектры для смеси (20% Ag + 80% CO_2) + этил.спирт полученные для разных видов ионизирующего излучения. Ясно видно, что вероятность образования стримера от большего количества ионизации выше. Второй пик в амплитуде дают двойные стримеры (одновременное образование двух стримеров) [11].

В случае смеси 63% CO_2 + 37% n- C_5H_{12} наблюдался интересный эффект. Дело в том, что ясный переход от пропорциональной моды к стримерной был замечен только для одноэлектронных импульсов (рис. 6). При облучении изотопом ^{90}Sr полный заряд сигнала непрерывно рос с ростом напряжения, нигде не обнаруживая характерного скачка между двумя модами (рис. 7). Такая же картина наблюдалась при работе с чистым изобутаном. Сигналы при этом были необычно короткими, с амплитудой меньше обычной. Аналогичный эффект отмечался авторами [16] при повышении давления.

Это можно попытаться объяснить так: первичная лавина от большого количества первичной ионизации настолько велика и так широко распределена по проволочке, что теряется всякая выделенность какого-либо направления. В первичную лавину со всех сторон вливаются вторичные. При этом сигнал получается большой и короткий, но настоящего стримера не образуется, несмотря на то, что пробег фотона мал. В то же время лавина от единичного электрона компактна, и с повышением напряжения достигает достаточной величины, чтобы создать необходимые условия для развития стримера в выделенном направлении.

1.4. Влияние материала катода на формирование послеимпульсов

Стабильная работа трубок требует широкого плато эффективности. При работе с CO_2 плато невелико (~ 100 В). Правый край плато определяется быстрым ростом шумовых загрузок, в том числе и загрузок от послеимпульсов, имеющих фотонную природу. Фотон, образующийся при развитии стримера, может долететь до катода и выбить из него электрон, который через характерное время дрейфа даст еще один импульс и т. д.

Проводилось изучение влияния материала катода на формирование послеимпульсов, целью которого было выяснить нельзя ли за счет подбора материала уменьшить вероятность образования послеимпульсов и тем самым расширить плато эффективности. Были проделаны измерения, сравнивающие три трубки одинакового размера с разными катодами. Сравнение проводилось для стального катода и катодов из алюминизированного и золоченого лавсана. Использовалась газовая смесь (20% Ag + 80% CO_2) + этил.спирт. Обработка цифровых осциллограмм (рис. 8) позволяла получать распределения по числу послеимпульсов, следующих за каждым сигналом.

Золотой и стальной катоды оказались заметно более устойчивыми к образованию послеимпульсов. На рис. 9 изображено распределение по числу послеимпульсов для золотого и алюминиевого катода при фиксированном напряжении на правом краю плато эффективности. Одинаковость условий (правильность выбора напряжений) контролировалась сравнением амплитудных и зарядовых характеристик трубок. При этом отличие в максимумах спектров не превышало 5%. Из рисунка видно, что послеимпульсов в случае алюминиевого катода образуется почти в пять раз больше.

Однако, несмотря на то, что золотой и стальной катоды более устойчивы к образованию послеимпульсов, нам не удалось получить существенного удлинения плато. Прирост плато составил около 50 В в случае золотого катода и около 30 В в случае стального катода.

На смесях с органическими газами (изобутан, n-пентан) за счет хороших гасящих свойств было получено большое плато — 700 и 1100 В соответственно. Таким образом, здесь материал катода менее важен, так как рабочее напряжение всегда можно выбрать достаточно далеко от краев плато. При этом на работе не будут сказываться ни колебания давления, ни технологический разброс параметров трубок.

2. СТРИМЕРНЫЕ ТРУБКИ В ДРЕЙФОВОМ РЕЖИМЕ

Работа стримерных трубок в дрейфовом режиме имеет ряд особенностей.

— Нетрадиционные газовые смеси при высоких напряженностях поля, необходимых для стримерного режима, требуют специального изучения поведения дрейфовой скорости и диффузии.

— Образование стримера носит пороговый характер (вероятность образования зависит от первичной ионизации). Поэтому возможен эффект зажигания стримера не от первого электрона, что может приводить к большой погрешности в определении координаты.

— При образовании стримера образуется много положительных ионов, которые создают так называемые мертвые зоны (участки анодной проволоочки нечувствительные к приходу ионизации в течение некоторого времени).

— При работе в магнитном поле более высокая, чем в пропорциональном режиме, напряженность электрического поля в трубке уменьшает лоренцевский угол, возникающий при дрейфе электронов в скрещенных полях. Приращение времени дрейфа из-за появления лоренцевского угла при этом уменьшается обратно пропорционально квадрату напряжения, приложенного к трубке (при насыщенной скорости).

Последний пункт можно отнести к достоинствам стримерных трубок.

Для изучения дрейфовых свойств газовых смесей, пригодных для работы в стримерном режиме, был изготовлен годоскоп из 16 стальных трубок диаметром 14 мм (рис. 10) длиной 50 см с толщиной стенки 200 мкм. Диаметр анода из бериллиевой бронзы 100 мкм. Сигнал с трубок подавался на дискриминатор с порогом 20 мВ без предусилителей. С дискриминаторов сигнал поступал на дрейфовую электронику в стандарте ВИШНЯ и КАМАК [9]. Для запуска электроники требовалось трехкратное совпадение сцинтилляционных счетчиков. Поступающая с трубок информация записывалась на магнитную ленту (МЛ). Среднее по трубке разрешение извлекалось при обработке МЛ из анализа распределения величины S (сумм квадратов отклонений измеренных координат от восстановленной траектории) [9]. При восстановлении трека по четырем трубкам распределение S совпадает с распределением χ^2 для двух степеней свободы.

Работа велась на частицах космического излучения. Слой свинца толщиной 35 см позволял отбирать частицы с энергией

больше 0,5 ГэВ. При этом вклад в разрешение многократного рассеяния на стенках трубок не превышал 40 мкм. Дрейфовые характеристики получались из распределений по временам дрейфа. При равномерной засветке трубки космическим излучением эти распределения пропорциональны скорости дрейфа электронов в газе.

2.1. Дрейфовая скорость и пространственное разрешение

На рис. 11 приведены дрейфовые характеристики для четырех газовых смесей. Для смесей $Ag + CO_2 + C_2H_5OH$ дрейфовая скорость не насыщается даже при высоких полях вблизи проволоочки и превышает величину 100 мкм/нс на расстояниях меньше 2 мм от проволоочки. Это предъявляет повышенные требования к временному разрешению электроники, так как скорость дрейфа фактически есть коэффициент пересчета вклада временного разрешения в пространственное разрешение трубки. В случае смеси $Ag + i-C_4H_{10}$ дрейфовая скорость насыщается во всем объеме трубки. Насыщенная скорость дрейфа менее подвержена влиянию изменения атмосферного давления, температуры и концентраций компонент газовой смеси. Смесь с *n*-пентаном занимает промежуточное положение между двумя первыми смесями. Здесь скорость дрейфа не насыщена и не превышает 100 мкм/нс. Эффективность трубок при рабочих напряжениях была лучше 99%.

В таблице 2 приведено среднее по трубке разрешение для различных смесей.

Таблица 2

Газовая смесь	σ , мкм
$(50\% Ag + 50\% CO_2) + 23 \text{ мм Hg } C_2H_5OH$	210 ± 10
$(20\% Ag + 80\% CO_2) + 23 \text{ мм Hg } C_2H_5OH$	210 ± 10
$63\% CO_2 + 37\% n-C_5H_{12}$	135 ± 7
$50\% Ag + 50\% i-C_4H_{10}$	125 ± 7

На рис. 12 приведено распределение по S для смеси CO_2 с *n*-пентаном.

В случае смесей $Ag + CO_2 + C_2H_5OH$ разрешение определяется высокой скоростью дрейфа вблизи проволоочки. Была проведена обработка событий в которых трек проходит на расстоянии больше, чем 2 мм от каждой из четырех проволоочек. После такого отбора разрешение составило 120 мкм.

2.2. Кластерный эффект

Хорошее временное разрешение цифрового осциллографа «МАГНОЛИЯ» позволило изучить интересный эффект, связанный с пороговой природой возникновения стримера. При наблюдении фронтов сигналов от изотопа ^{90}Sr были видны случаи зажигания стримера не от первого пришедшего электрона (рис. 13). Особенно хорошо эффект проявлялся при малых концентрациях гасящих добавок и при напряжениях, соответствующих низким эффективным. Приведенные ниже результаты были получены на смеси (70% Ag + 30% CO₂) + этил.спирт.

На рис. 14 изображено распределение по временным интервалам между двумя порогами: высоким (20 мВ) и низким (1 мВ), полученное при обработке цифровых осциллограмм. Низкий порог выбран так, что его пересекают и стримерные, и пропорциональные импульсы. До высокого порога пропорциональные сигналы не достают. Распределение дает представление о том, какие пропорциональные импульсы в результате подхода следующих кластеров развились в стримерные. Присутствующая периодичность (около 20 нс) свидетельствует, по-видимому, о влиянии положительного пространственного заряда лавины. При подходе очередного кластера образуется обычная пропорциональная лавина, препятствующая некоторое время развитию лавин от последующих кластеров. Период 20 нс соответствует времени отдрейфовывания положительных ионов от проволоки на расстояния порядка размера лавины. С ростом напряжения периодическая структура пропадает, ширина распределения уменьшается и при рабочих напряжениях просто соответствует разбросу фронта. Отсутствие подобного эффекта при приходе одного большого кластера от изотопа ^{55}Fe или единичных электронов подтверждает предположение о том, что наблюдаемое развитие пропорционального сигнала в стримерный с некоторой задержкой есть результат прихода последующих кластеров ионизации, а не результат каких-либо внутренних процессов развития лавины.

При рабочих напряжениях (эффективность порядка 100%) эффект запаздывания развития стримера отсутствовал.

2.3 Измерения мертвой зоны

Способность стримерных трубок работать при высоких нагрузках удобно характеризовать величиной мертвой зоны [6].

Мертвая зона, возникающая при развитии стримера, была измерена методом задержанных самосовпадений [6]. Метод позволяет измерять динамику развития мертвой зоны во времени. Схема измерений приведена на рис. 15. Измеряемая величина—число случайных самосовпадений при задержке сигнала на время T : $N(T)$ связана с размером области, нечувствительной к приходу ионизации $\delta(T)$, по формуле:

$$\frac{N_{\infty} - N(T)}{N_{\infty}} = \frac{\delta(T)}{l} - \left[\frac{\delta(T)}{2l} \right]^2;$$

где l —ширина коллиматора.

На рис. 16 приведены измеренные зависимости $\delta(T)$ для смесей (20% Ag + 80% CO₂) + C₂H₅OH и 50% Ag + 50% i-C₄H₁₀. Мертвая зона, определяемая обычно как площадь под линией $\delta(T)$, составила соответственно 50 и 20 мкс·см, что соответствует предельным нагрузкам 20 и 50 кГц/см. Этот результат хорошо согласуется с данными [17], где ухудшение разрешения наблюдалось именно при таких нагрузках.

2.4. Возможность применения стримерного режима в координатной системе

Полученное для стримерных трубок пространственное разрешение является типичным для координатных систем, работающих в пропорциональном режиме. Сравнение свойств стримерного разряда в трубках со стальным катодом и трубках с тонким катодом из алюминизированного лавсана позволяет утверждать, что аналогичное пространственное разрешение может быть получено и на стримерных трубках с лавсановым катодом.

Годоскопические системы из таких трубок могут применяться в координатной части детектора, так как вклад лавсана в многократное рассеяние не превышает вклада от рассеяния на газе [9].

Наилучшее пространственное разрешение, полученное в стримерном режиме до настоящего времени, составляет 100—150 мкм [6, 17].

3. ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ КООРДИНАТЫ

Измерение продольной координаты в длинных системах, подобных стримерным трубкам, может осуществляться стандартными

способами: по заряду, наведенному на поперечные полоски, методом деления заряда, использованием катодных линий задержки ...

Большая амплитуда сигнала в стримерном режиме и ее малый разброс позволяют организовать съем продольной координаты другим методом—по измерению разности времен прихода сигнала на противоположные концы трубки [18]. Координата пропорциональна измеренной разности времен. Коэффициент пропорциональности—скорость распространения сигнала по трубе V , деленная пополам. В случае наполненного газом коаксиального волновода эта величина практически совпадает с половиной скорости света в вакууме. Преимуществами данного метода является слабая зависимость пространственного разрешения от длины трубы (что позволяет соединять трубы последовательно) и использование одного преобразователя аналог-цифра, в отличие от часто применяющегося сейчас метода определения продольной координаты делением заряда, где используются два преобразователя.

Экспериментальная установка для измерений продольной координаты состояла из системы, содержащей 16 труб из нержавеющей стали (диаметр 40 мм, длина 3 метра, толщина стенки 300 мкм) с анодом из бериллиевой бронзы диаметром 100 мкм. Натяжение анодной проволоки составляло 500 г. С концов трубы закрывались пробками из оргстекла, по оси которых были закреплены тонкостенные медные трубочки с диаметром отверстия 130 мкм для фиксации в них проволоки. Продувка производилась через специальные отверстия в пробках.

Для измерений использовался канал электроники, разработанный в ИЯФ (рис. 17). Один канал включает в себя два дискриминатора: старт и стоп, устанавливаемые непосредственно на концах трубы, и временной экспандер. Длительность выходного сигнала экспандера пропорциональна разности времен между сигналами старт и стоп.

Измерения продольной координаты проводились на газовой смеси (20% Ag + 80% CO₂) + эт.спирт с помощью коллимированного источника ⁵⁵Fe. Рабочее напряжение составляло 5600 В. Источник поочередно устанавливался на одном из шести специально сделанных лавсановых окошек, равномерно расположенных по всей длине трубы.

В таблице 3 приведено продольное разрешение (сигма), полученное при последовательном соединении трехметровых труб. Последовательное соединение осуществлялось с помощью неэкранированного проводника длиной 10 см. При этом коэффициент пере-

счета $2/V$ составлял 6,7 пс/мм в центре средней трубы и 7,5 пс/мм на концах крайних труб.

Таблица 3

кол-во труб	полная длина, м	$\sigma(z)$, мм в центре	$\sigma(z)$, мм на краю
1	3	10	20
3	9	13	35
5	15	15	50

Полученное разрешение 15 мм при полной длине 15 метров соответствует относительной точности 0.1%. Это в 5—10 раз лучше, чем точность, обычно достигаемая методом зарядового деления.

Метод определения продольной координаты по разности времен будет использован в мюонной системе детектора СКИФ. Предполагается изготовление 4500 трубок длиной от 1,5 до 4 метров. Последовательное соединение трубок позволит ограничиться 2000 каналами электроники.

Была проверена возможность использования данного метода для определения продольной координаты в вершинной части детектора. На тестовых трубках из алюминизированного лавсана диаметром 14 мм, длиной 50 см было получено продольное разрешение 2 мм в центре и 3,5 мм в 5 см от края трубки.

Измерения продольной координаты этим же методом с изотопом ⁹⁰Sr дали результаты, совпадающие с результатами для изотопа ⁵⁵Fe.

В центре трубки разрешение определяется в основном собственным разрешением электроники, на краях—эффектами распространения сигнала, конечными порогами дискриминаторов и амплитудным разбросом (25%).

В настоящий момент ведется работа по изучению вопросов, связанных с улучшением разрешения и калибровками реальных систем. Однако, уже полученные результаты позволяют говорить о том, что этот метод определения продольной координаты прост, дешев и удобен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описаны конструкция и результаты испытаний стримерных трубок с различными диаметрами анодной проволоки, различными материалами и диаметрами катода при продувке несколькими типами газовых смесей. Прделанная работа позволила оптимизировать параметры стримерных трубок—элементов нового детектора СКИФ. Продольное разрешение 10—20 мм, полученное методом измерения разности времен, является достаточным для мюонной системы детектора. Поперечное разрешение 130 мкм, полученное в дрейфовом режиме, дает возможность использовать стримерный режим в вершинной части детектора.

Стримерные трубки просты в изготовлении и при правильном выборе газовой смеси работают стабильно.

В заключение авторы хотели бы искренне поблагодарить А.М. Батракова и В.В. Чуканова за помощь в освоении цифрового осциллографа, В.И. Исаченко и В.Д. Кутовенко за изготовление и настройку электроники, А.Н. Креницина и А.В. Чегодаева за помощь в изготовлении трубок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.А. Аксенов и др. Препринт 85- , ИЯФ СОАН СССР (1985).
2. С. Grunberg et al. Nucl. Instr. Meth., 78 (1970), 102.
3. G. Charpak et al. Nucl. Instr. Meth., 80 (1970), 13.
4. G.D. Alekseev et al. Nucl. Instr. Meth., 177 (1980), 385.
5. E. Jarocci. Nucl. Instr. Meth., 217 (1983), 30.
6. Г.Д. Алексеев и др. ФЭЧАЯ, т.13, вып.3 (1982), 703.
7. M. Jonker et al. Preprint CERN EP/80-101 (1980).
8. G. Battistoni et al. Phys. Lett. 118B (1982) 461.
9. V.M. Aulchenko et al. Preprint 84-166, ИЯФ СОАН СССР (1984).
10. А.М. Батраков и др. Препринт 85-30, ИЯФ СОАН СССР (1985).
11. M. Atac et al. Nucl. Instr. Meth. 200 (1982) 345.
12. F. Sauli. Preprint CERN 77-09 (1977).
13. T.A. Mulera et al. Nucl. Instr. Meth. 203 (1982) 609.
14. A.J.F. den Boggende et al. J. Sci. Instr. 2 (1969) 701.
15. M. Turala et al. Nucl. Instr. Meth. 205 (1983) 141.
16. E. Fernandez et al. Preprint SLAC-PUB-3390 (1984).
17. K. Fujii et al. Nucl. Instr. Meth. 225 (1984) 23.
18. S.F. Biagi et al. DELPHI 84-9 TRACK-1, CERN (1984).

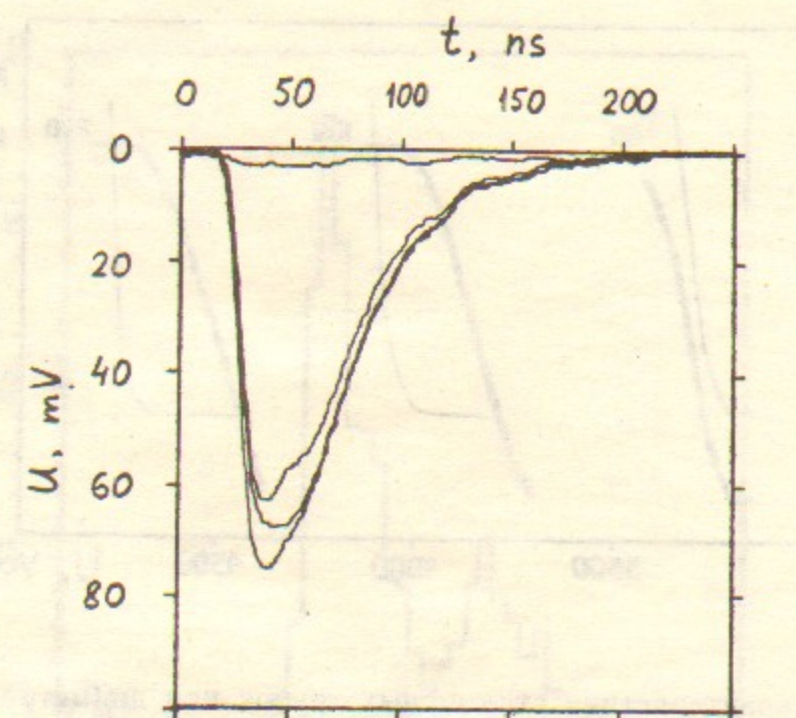


Рис. 1. Осциллограммы характерных стримерных сигналов и, для сравнения, пропорционального сигнала, полученные на смеси 45% Ag + 55% CO₂ с помощью цифрового осциллографа «МАГНОЛИЯ».

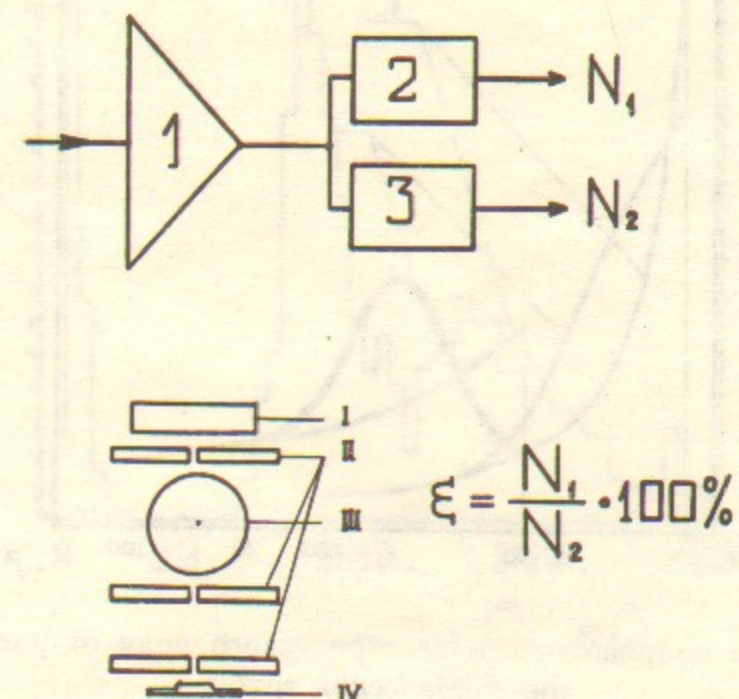


Рис. 2. Блок-схема измерения эффективности образования стримера:

I—усилитель, 2, 3—дискриминаторы с порогами 1000 и 15 мВ, соответственно. I—сцинтилляционный счетчик, II—коллиматор, III—исследуемая стримерная трубка, IV—источник электронов ⁹⁰Sr.

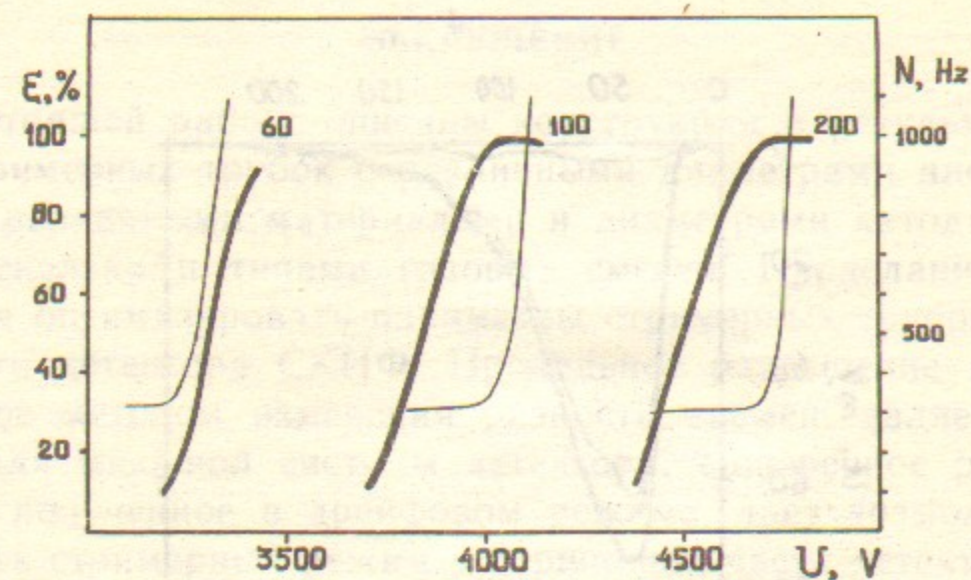


Рис. 3. Счетные характеристики стримерных трубок при диаметрах анодной проволоки 60, 100, 200 мкм, газовая смесь 45% Ag + 55% CO₂. Толстые линии — графики эффективности, тонкие — графики скоростей счета.

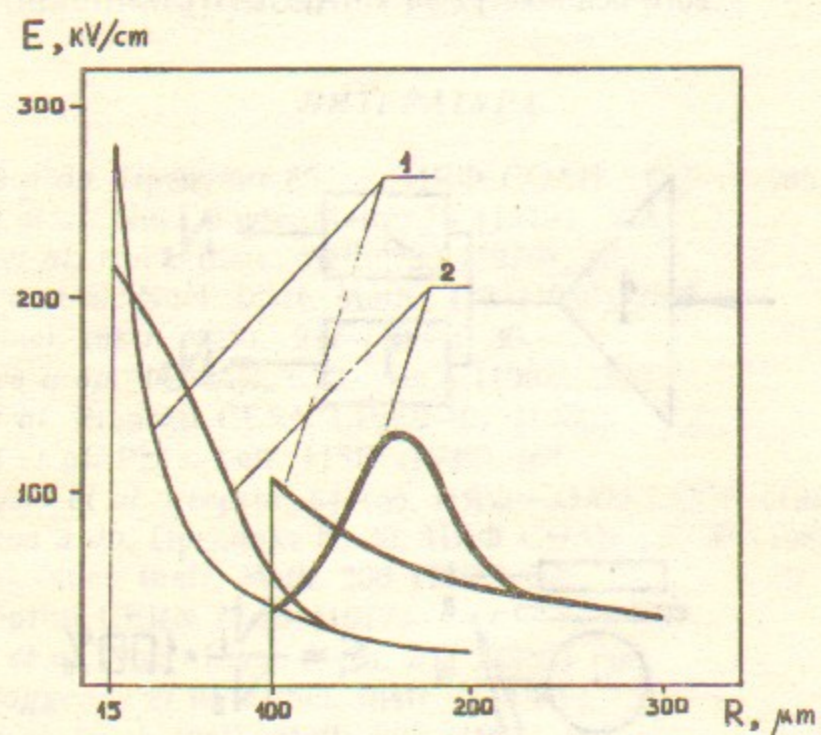


Рис. 4. Зависимость напряженности электрического поля от расстояния до центра цилиндрической трубки.

Тонкая линия — для диаметра анодной проволоки 30 мкм и рабочего напряжения 2,5 кВ, толстая — для диаметра 200 мкм и рабочего напряжения 4,7 кВ. 1 — первоначальное поле в трубке, 2 — форма поля после образования первичной лавины (вдоль линии, соединяющей центр трубки с центром лавины). Предполагено, что на месте лавины образуется кластер из положительных ионов с полем на поверхности 60 кВ/см, находящийся на расстоянии 60 мкм от поверхности проволоки.

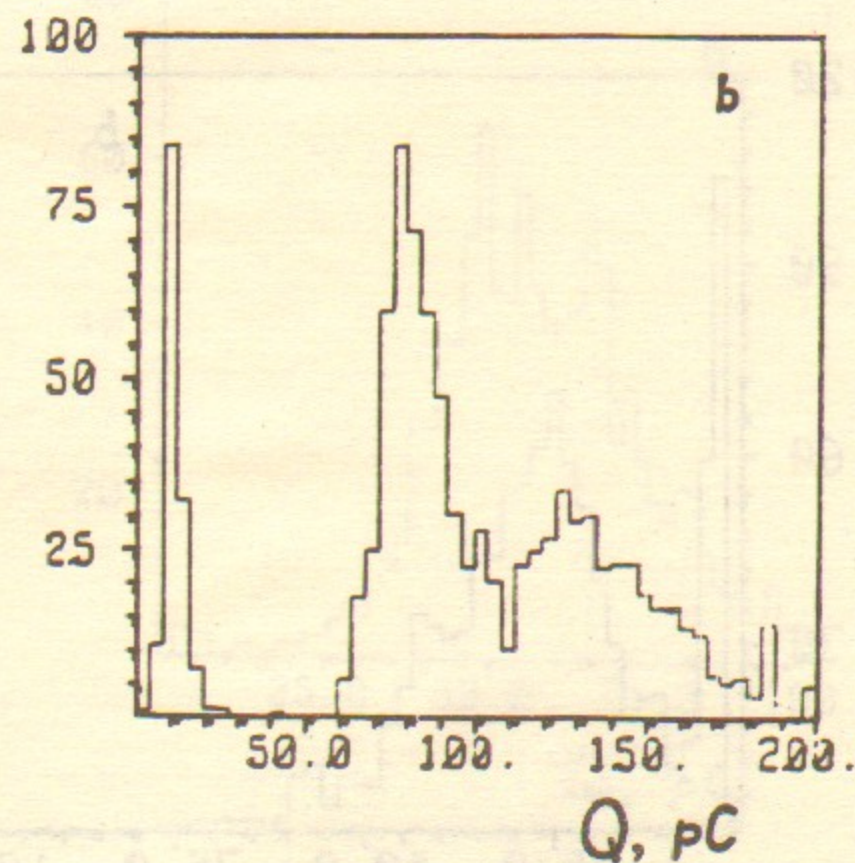
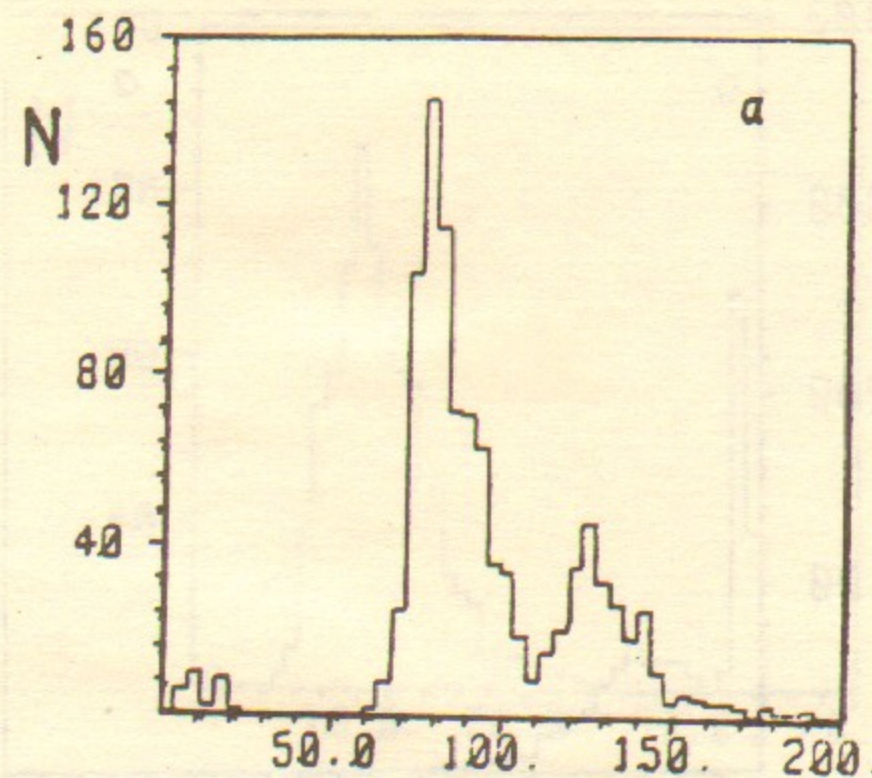


Рис. 5. Распределения сигналов с трубки по заряду для смеси (20% Ag + 80% CO₂) + этил.спирт при 4,5 кВ для разной первичной ионизации: а — электроны источника ⁹⁰Sr, б — одиночные фотоэлектроны, вылетающие из катода при освещении трубки.

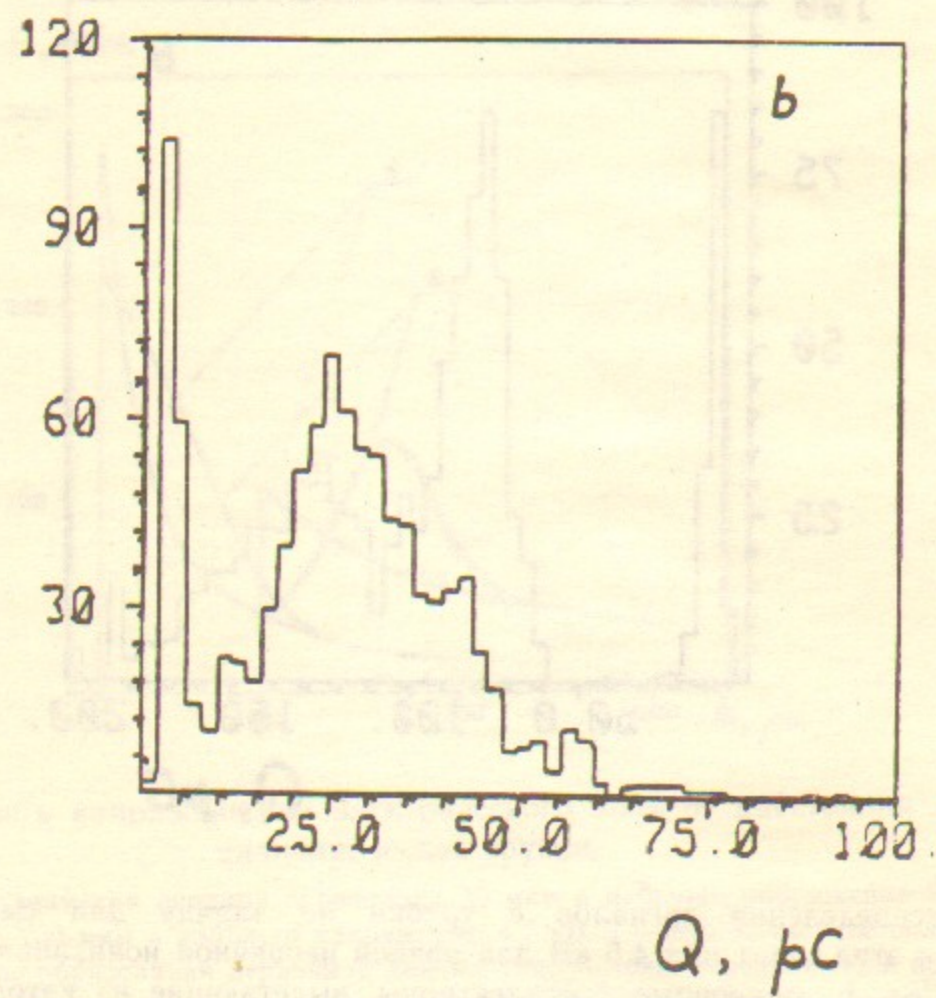
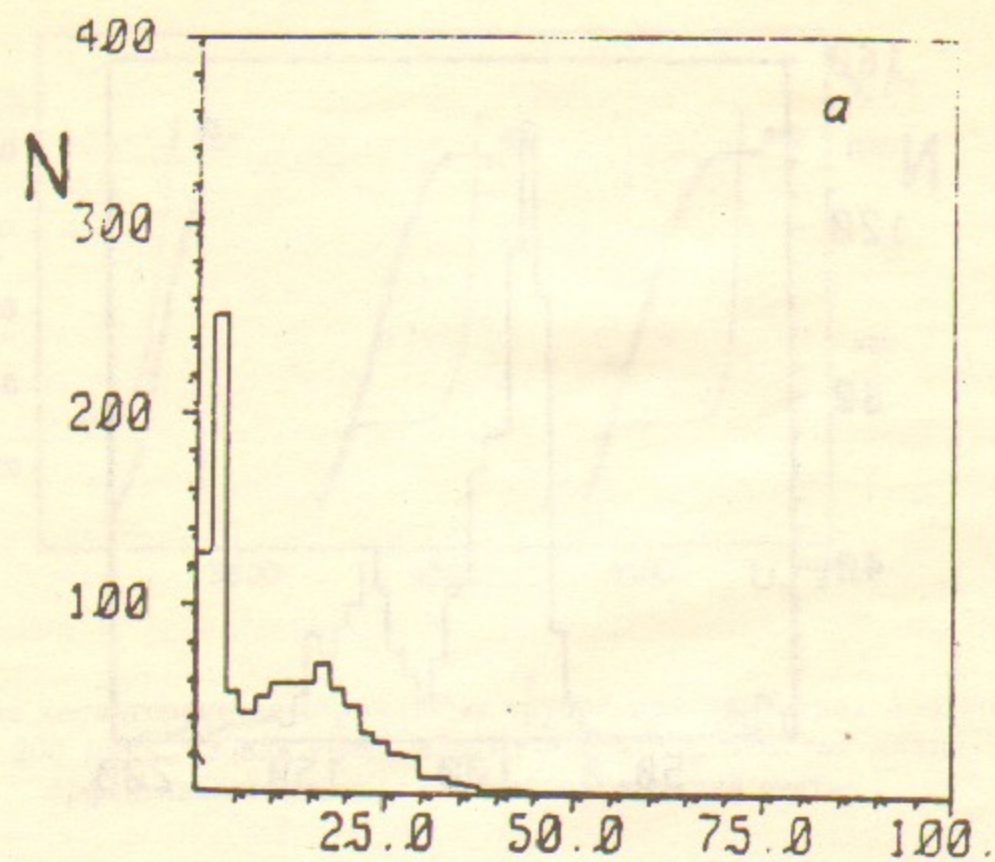


Рис. 6. Распределения сигналов с трубки по заряду для смеси $63\% \text{CO}_2 + 37\% n\text{-C}_5\text{H}_{12}$ для одиночных фотоэлектронов: a —5,8 кВ, b —6,1 кВ.

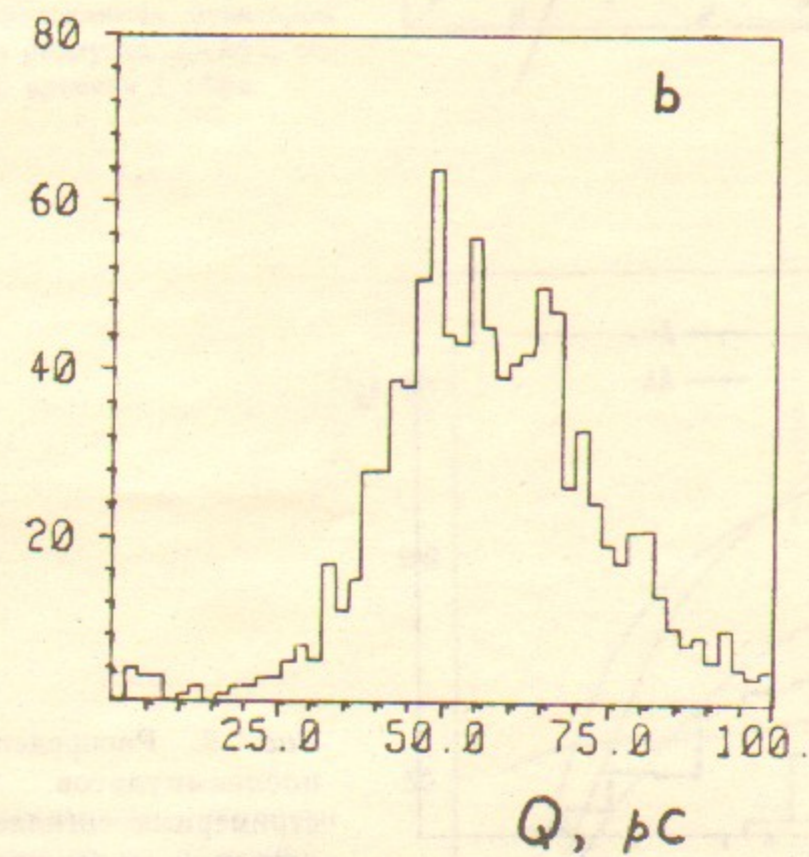
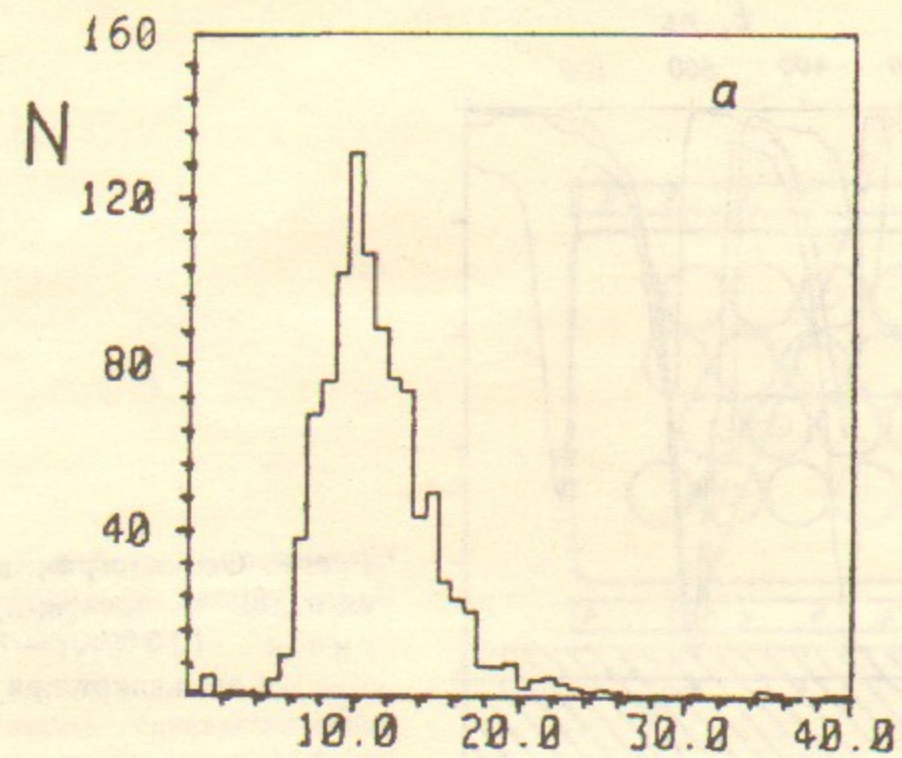


Рис. 7. Распределения сигналов с трубки по заряду для смеси $63\% \text{CO}_2 + 37\% n\text{-C}_5\text{H}_{12}$ для электронов источника ^{90}Sr : a —5,0 кВ, b —6,0 кВ.

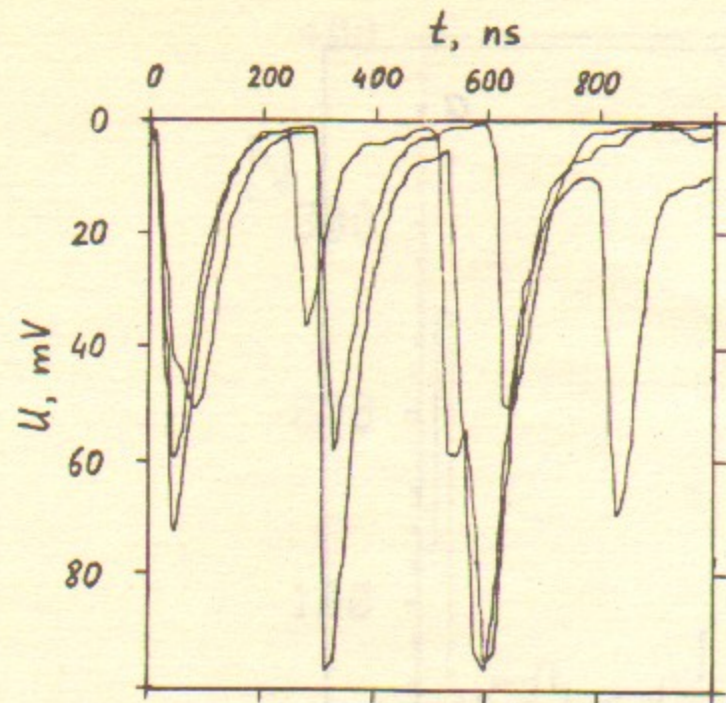


Рис. 8. Осциллограммы стримерных сигналов с послепулсами для смеси (20% Ar + 80% CO₂) + этил.спирт при 4,7 кВ.

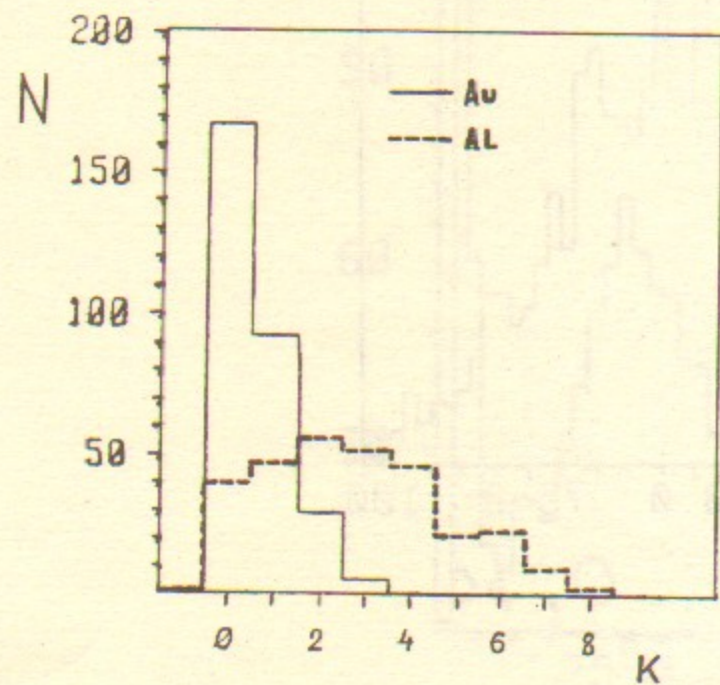


Рис. 9. Распределение по числу послепулсов, следующих за стримерным сигналом, для трубок с катодами из золоченого и алюминированного лавсана.

Рис. 10. Схема работы годоскопа из стримерных трубок с космическими частицами.

1—стримерная трубка в дрейфовом режиме, 2—запускающие сцинтилляционные счетчики, 3—поглотитель (свинец), 4—защитный экран, 5—трек космической частицы. Радиусы нарисованных пунктиром окружностей равны радиусам дрейфа, определенным по времени дрейфа.

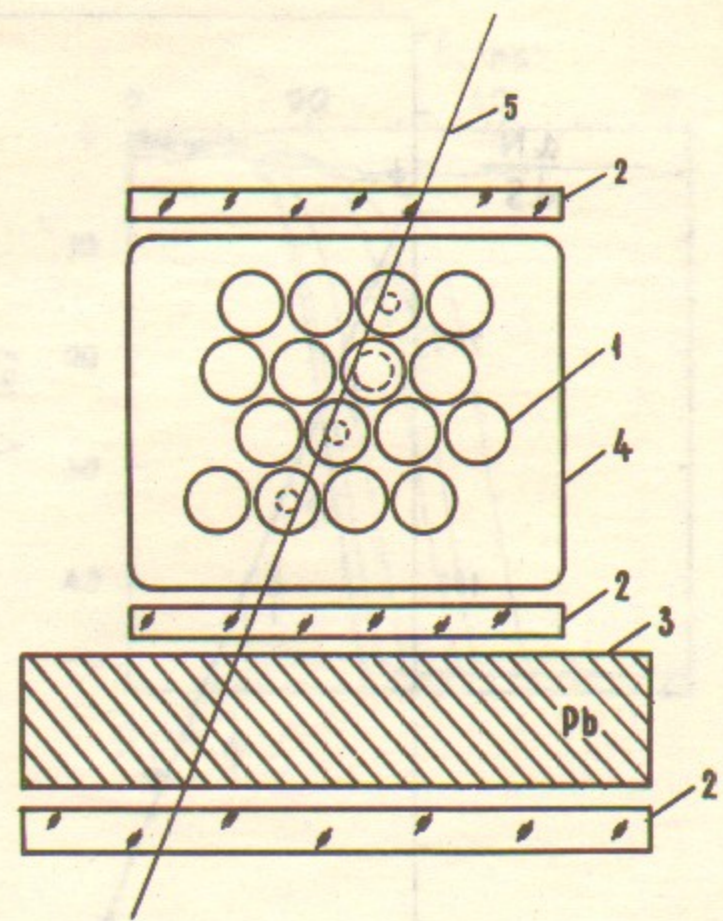
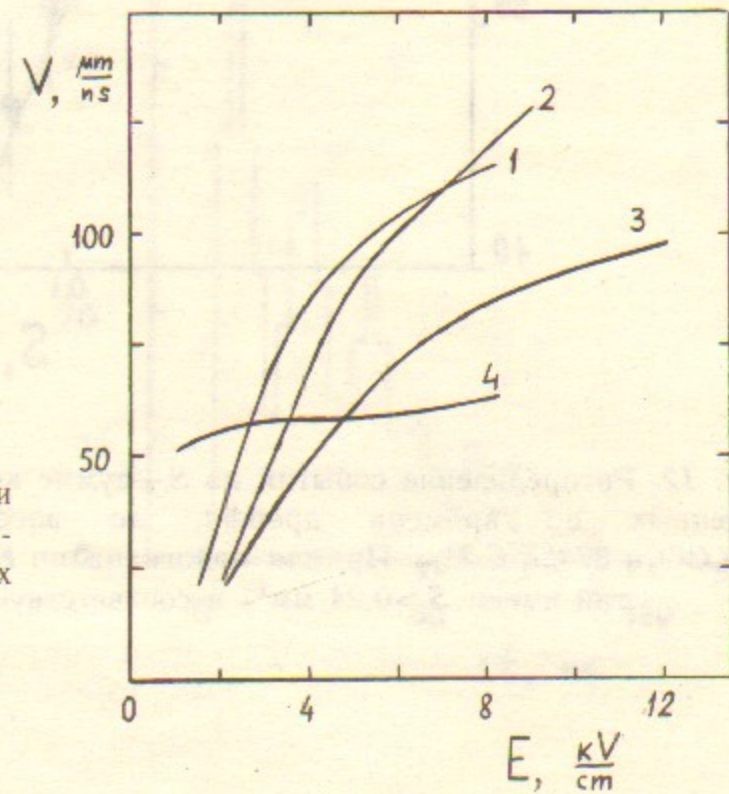


Рис. 11. Зависимость скорости дрейфа электронов от напряженности электрического поля для газовых смесей:

- 1—(50% Ar + 50% CO₂) + этил.спирт,
- 2—(20% Ar + 80% CO₂) + этил.спирт,
- 3—63% CO₂ + 37% n-C₅H₁₂,
- 4—50% Ar + 50% i-C₄H₁₀.



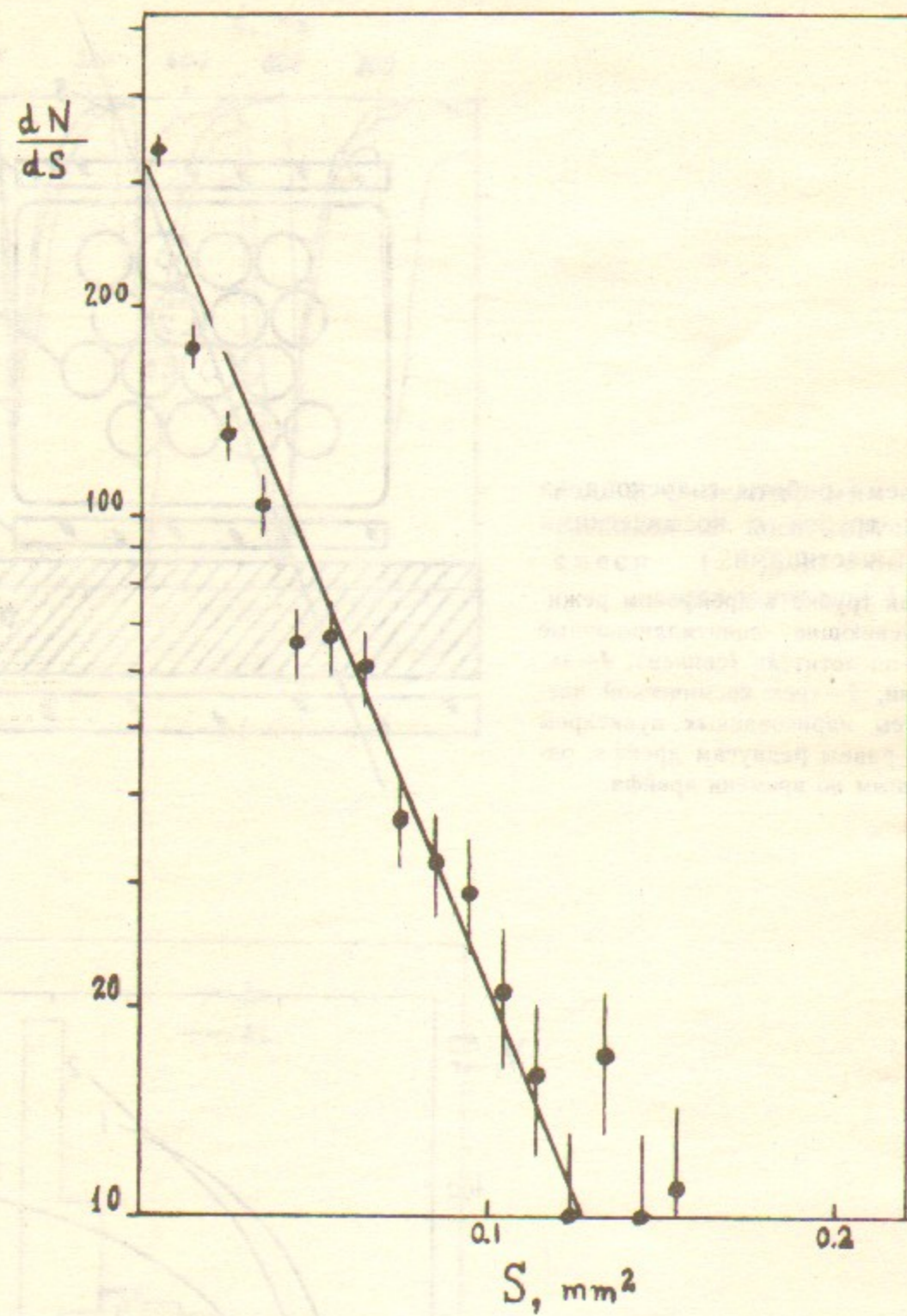


Рис. 12. Распределение событий по S —сумме квадратов отклонений от точек, определенных по времени дрейфа, до восстановленного трека для смеси $63\% \text{CO}_2 + 37\% n\text{-C}_5\text{H}_{12}$. Прямая подогнана по 85% событий (остальные 15% событий имеют $S > 0,24 \text{ мм}^2$) и соответствует разрешению $\sigma = 135 \text{ мкм}$.

Рис. 13. Осциллограммы переднего фронта сигналов, которые начинаются как пропорциональные, а затем, после некоторой задержки, перерастают в стримерные. Первичная ионизация создается электронами источника ^{90}Sr , газовая смесь (70% $\text{Ar} + 30\% \text{CO}_2$) + этил.спирт, напряжение 3.05 кВ, при этом эффективность образования стримера 16%.

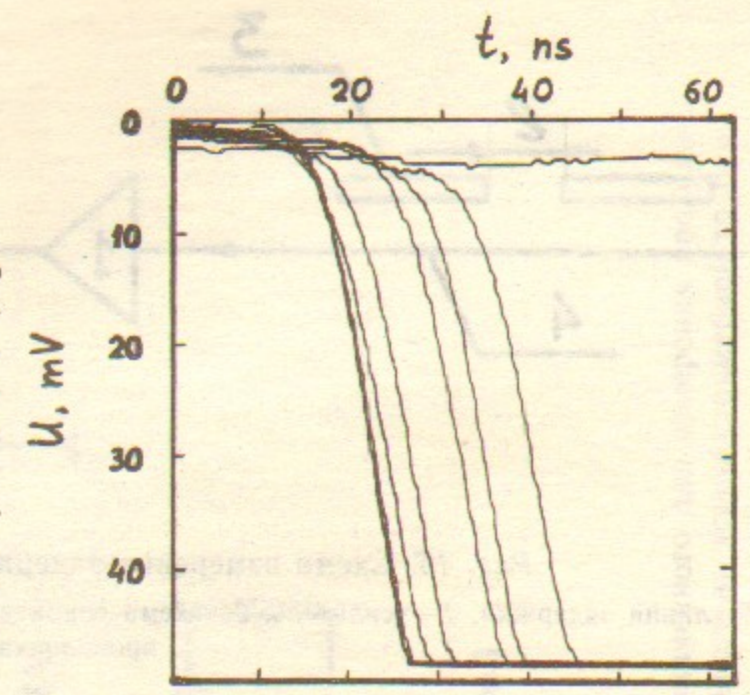
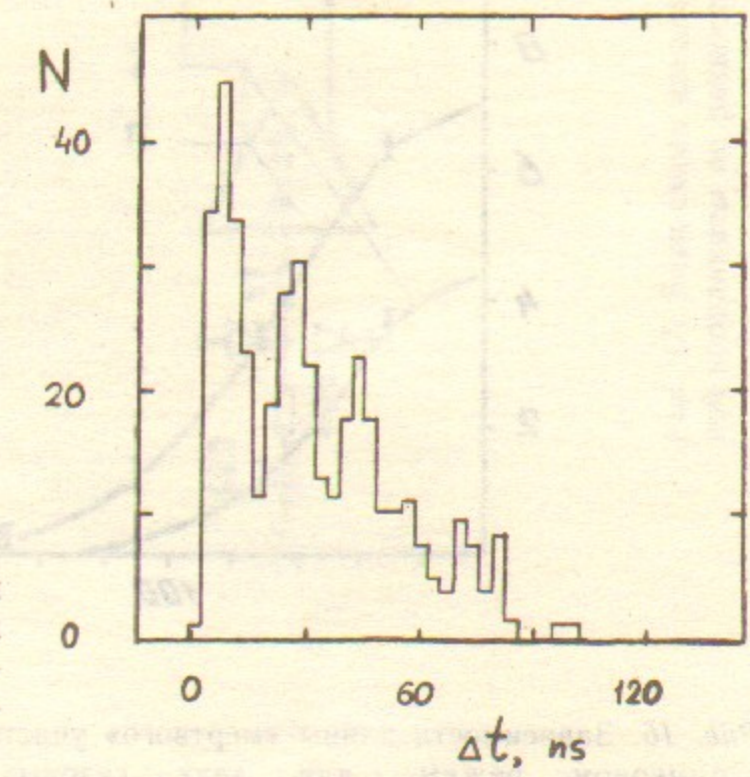


Рис. 14. Распределение времен между пересечением сигналом двух порогов (1 мВ и 20 мВ), полученное при обработке цифровых осциллограмм (см. рис. 13)



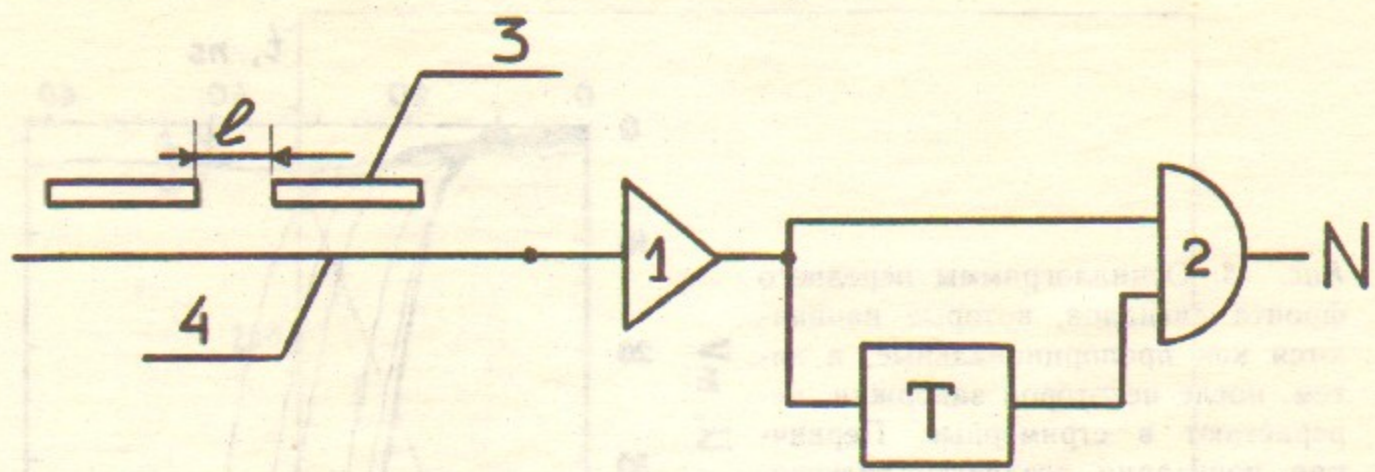


Рис. 15. Схема измерения задержанных самосовпадений:
 T—линия задержки, 1—усилитель, 2—схема совпадений, 3—коллиматор ширины l , 4—анодная проволочка.

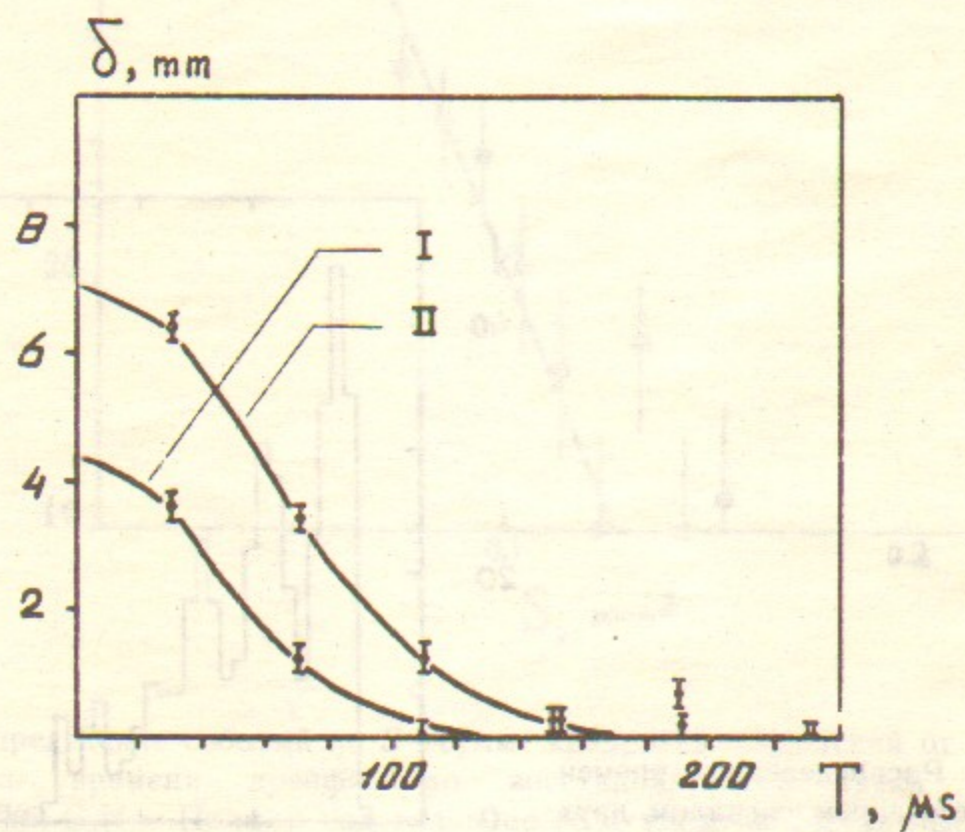


Рис. 16. Зависимость длины «мертвого» участка анодной проволочки от времени в стримерном режиме для двух газовых смесей: I—50% Ar + 50% i-C₄H₁₀, II—(20% Ar + 80% CO₂) + этил.спирт.

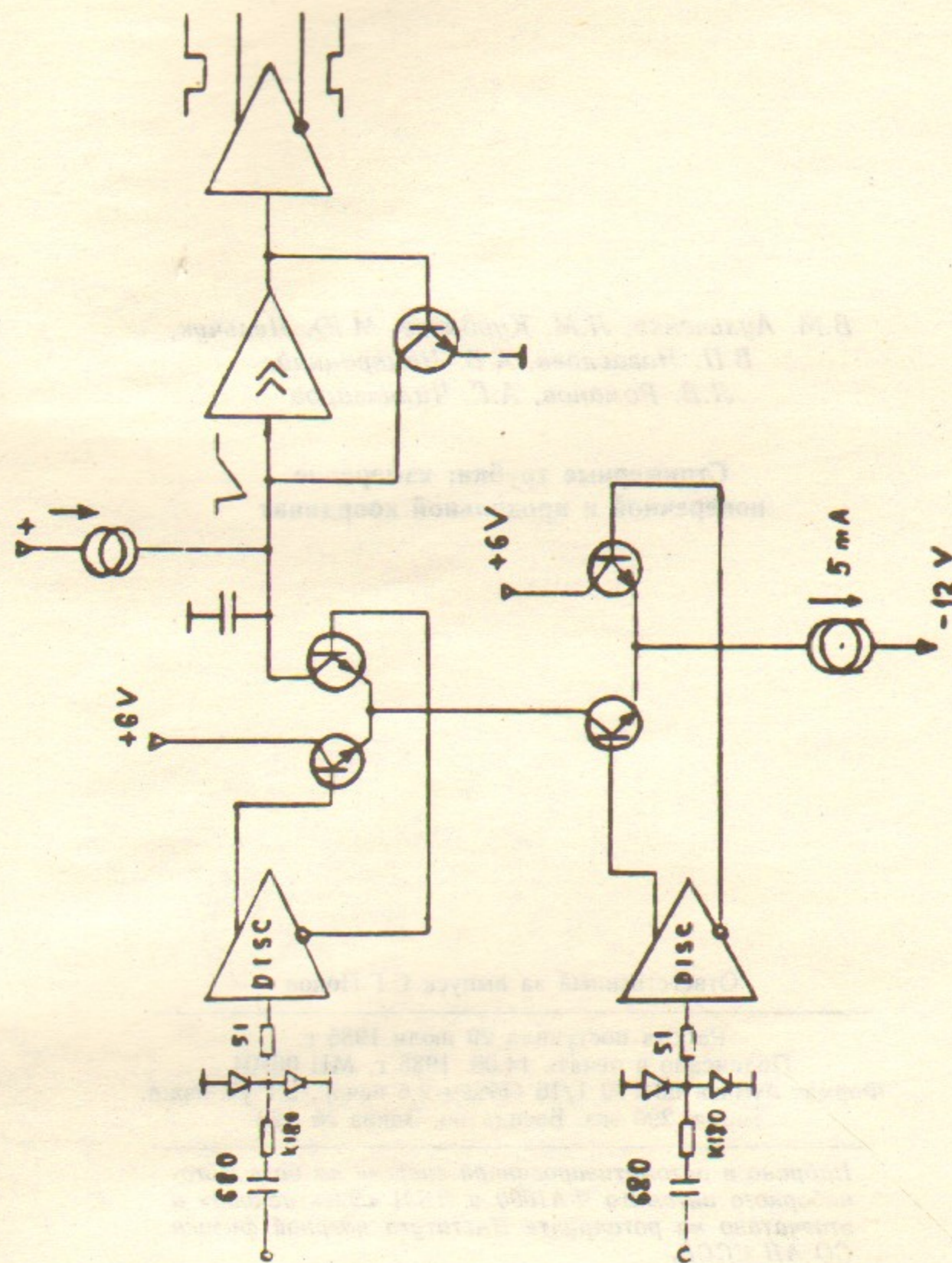
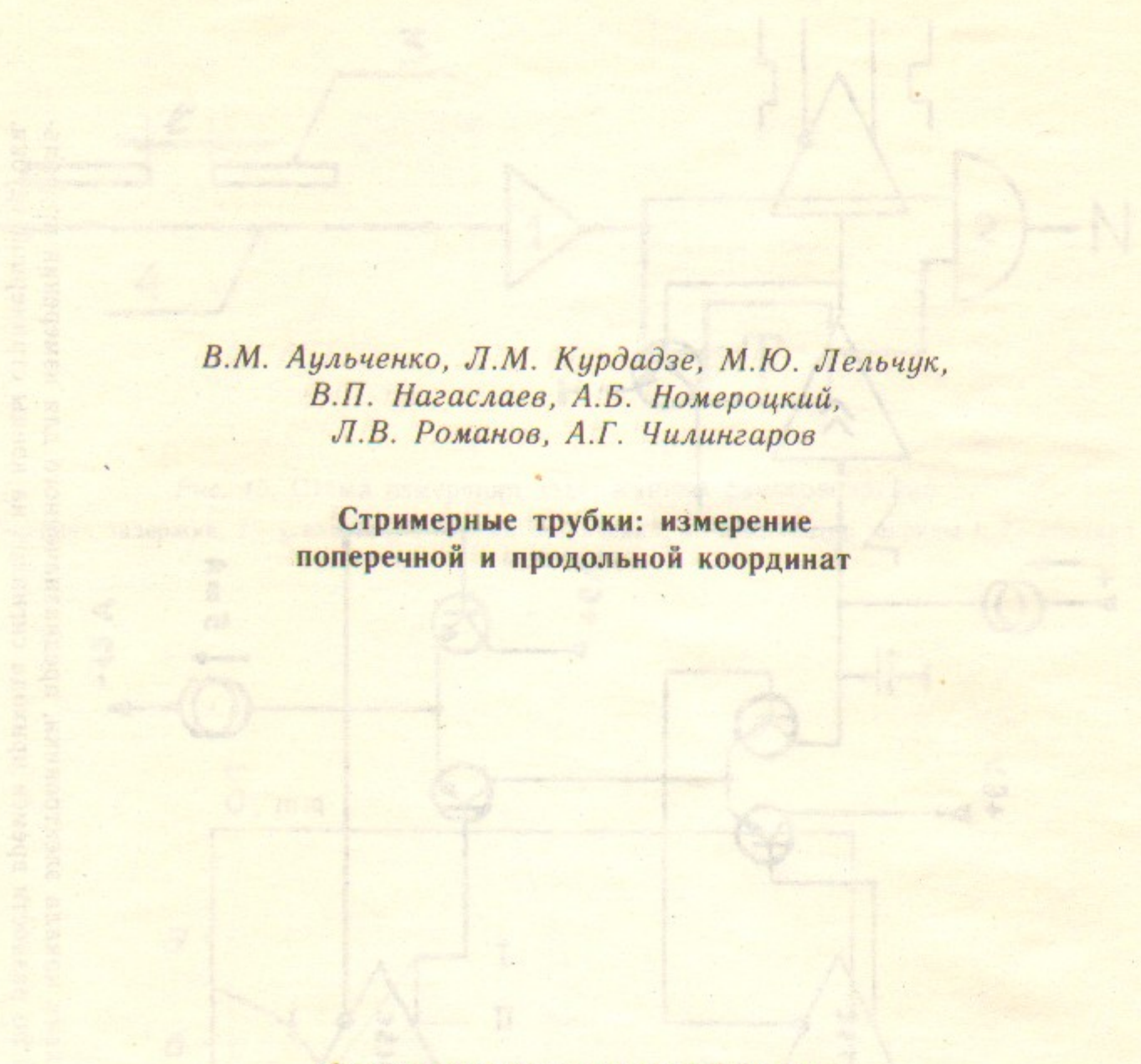


Рис. 17. Блок-схема канала электроники, предназначенного для измерения продольной координаты по разности времен прихода сигналов на концы стримерной трубки.



*В.М. Аульченко, Л.М. Курдадзе, М.Ю. Лельчук,
В.П. Нагаслаев, А.Б. Номероцкий,
Л.В. Романов, А.Г. Чилингаров*

**Стримерные трубки: измерение
поперечной и продольной координат**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 29 июля 1985 г.
Подписано в печать 14.08. 1985 г. МН 06704
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2,6 печ.л., 2,1 уч.-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 122

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*