

П-34



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

13 - 6904

ПИСАРЕВ Алексей Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ
НОВЫХ ПРИНЦИПОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

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

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1979

ПИСАРЕВ Алексей Федорович

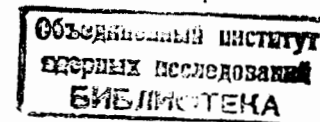
ИССЛЕДОВАНИЕ

НОВЫХ ПРИНЦИПОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

Академик	Б.М.Понтекорво
Доктор физико-математических наук	Б.А.Долгошеин
Доктор физико-математических наук	М.И.Дайон.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Ереванский физический институт.

Автореферат разослан " " 1973 года.

Защита диссертации состоится " " 1973 года в часов на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Ю.А.Батусов

Введение

Быстрый темп развития физики элементарных частиц обеспечивается непрерывным ростом энергии и интенсивности ускоряемых частиц и созданием все более совершенных методов их регистрации.

В настоящее время исследования по детекторам частиц ведутся широким фронтом, и их можно условно разбить на две категории: на исследования, которые направлены на улучшение отдельных характеристик детекторов, и на исследования поискового плана, которые преследуют цель создания детекторов на принципиально новой основе. Решению именно этой части проблемы - разработке новых детекторов - и посвящена главным образом реферируемая диссертация.

Одним из важнейших детекторов в современной экспериментальной физике является пузырьковая камера. Достоинства данного прибора исключительно велики: в нем воедино совмещены функции детектора и плотной мишени; прибор обладает высоким пространственным разрешением и способен регистрировать одновременно большое число частиц. Однако, несмотря на эти достоинства, пузырьковой камере присущи и серьезные недостатки, такие, например, как отсутствие селективной управляемости и режима непрерывной чувствительности. Эти два недостатка существенно ограничивают сферу применения камер в физических экспериментах. Поэтому с первых же шагов эксплуатации пузырьковой камеры начали предприниматься интенсивные попытки получения в этом приборе управляемого режима и режима непрерывной чувствительности. Однако по ряду физических причин данная проблема осталась не решенной и по сегодняшний день.

Возникший "тупик" в исследованиях с пузырьковой камерой и отсутствие в арсенале детекторов управляемого трекового прибора с плотной рабочей средой побудили физиков к поиску принципиально новых путей создания трековых детекторов на основе конденсированных сред. Одно из основных направлений исследований здесь заключалось в том, чтобы проанализировать теоретически и проверить экспериментально новые физические явления, которые могли бы привести к созданию трекового детектора с селективным управлением и непрерывной чувствительностью. Второе направление сводилось к поиску новых методов размножения зарядов в дискретных элементах, которые

могли бы регистрировать следы частиц в системе, содержащей плотную среду: газ под большим давлением, жидкость или твердое вещество.

В соответствии со сформулированными задачами в первой части диссертации /главы 1-7/ анализируются варианты трековых камер, основанных на газовом разряде, а также эффектах расслоения бинарного пересыщенного жидкого раствора и кристаллизации переохлажденных жидкостей на ионах. Сущность одной из этих идей заключается в том, что в растворах на ионах в следах частиц возникают микрокомплексы, состоящие из заряда и оболочки молекул компонента, обладающего большей диэлектрической постоянной. В момент пересыщения раствора такие комплексы становятся центрами роста новой фазы, т.е. элементами образующегося трека. Этот механизм позволяет создать как камеру непрерывной чувствительности, так и камеру с селективным управлением /глава 3/.

Вторая идея основывается на использовании фазового перехода в переохлажденной жидкости - кристаллизации на ионах. Камера, работающая на этом принципе, также может быть селективно управляемой или непрерывно чувствительной /глава 4/. Треки в такой камере представляют собой совокупность кристалликов, растущих на ионах, как на зародышах.

В диссертации исследуется также вариант камеры на твердом веществе, в котором вдоль следов заряженных частиц образуются F-центры /глава 5/. Последние являются носителями информации о треках частиц.

Особо рассматривается вопрос о возможности создания трековых детекторов, работающих на основе эффекта Малтера и других родственных явлений, которые возникают под действием электрического поля на гранях соприкосновения тонких диэлектрических пленок с конденсированной средой и внутри пористых полупроводников и диэлектриков /главы 6 и 7/. В местах прохождения частиц в таких комбинированных системах имеет место размножение электронов в пленках и точечные световые вспышки в среде.

Другое основополагающее направление в разработке новых принципов детектирования частиц, которому посвящена вторая половина диссертации /главы 8-11/, охватывает явления размножения зарядов вблизи тонких нитей, погруженных в жидкие среды или кристаллические диэлектрики и полупроводники. Цель этих исследований состояла в том, чтобы создать новые нитяные детекторы - камеры и счетчики частиц, которые бы органически объединяли в себе все достоинства газовых нитяных детекторов: простоту управления, легкость считывания информации и высокое временное разрешение - и дополнительно

приобрели новые качества: большую плотность рабочего вещества и высокое пространственное разрешение. Необходимость в подобных детекторах остро ощущается в технике физического эксперимента с частицами высоких энергий и особенно в опытах с нейтрино.

Первые исследования в этом плане были начаты несколько лет назад в Аргоннской национальной лаборатории и Новосибирском физическом институте, где изучалась работа нитяных счетчиков типа счетчиков Гейгера-Миуллера, заполненных жидким аргоном и ксеноном. Однако вскоре было обнаружено, что такие счетчики нестабильны в работе и имеют низкий коэффициент размножения электронов. Эти обстоятельства потребовали в дальнейшем детального исследования механизма размножения электронов в конденсированных средах. Теоретическому и экспериментальному решению данного вопроса в диссертации посвящены восьмая и девятая главы.

Автором была предложена и обоснована также новая программа физических исследований с нитяным счетчиком, изложенная в десятой главе, опирающаяся на использование в счетчиках атомно-молекулярной упорядоченной структуры - твердого кристаллического вещества. В таких веществах, как известно, высока подвижность электронов, что может обеспечивать большой коэффициент стабильного размножения электронов за счет ионизации атомов в валентной и примесной зонах.

Экспериментальному воплощению программы по созданию нового твердотельного детектора посвящена последняя - одиннадцатая глава диссертации. В ней излагаются результаты разработки и детального исследования кристаллического нитяного детектора, в качестве рабочих сред в котором использовались кристаллический аргон, ксенон и метан.

В конце одиннадцатой главы излагаются соображения о разработке крупномасштабных кристаллических детекторов.

Основные результаты исследований, изложенных в диссертации, докладывались на международных конференциях в Беркли^{13/}, Женеве^{14/}, Дубне^{15/}, опубликованы в работах^{10,11,12,16-31/} и обзорах^{32,33/}.

Ниже дается краткое изложение содержания отдельных глав диссертации. В конце автореферата приводятся основные научные результаты, полученные в диссертации и дается список цитированных работ и работ автора.

1. Исследование искровых камер

Этому вопросу посвящены первая и вторая главы. В них излагаются результаты исследований искровых камер со средним /1-5 см/ и большим />5 см/ межэлектродным промежутком.

Для камер первого типа экспериментально определялась минимальная величина промежутка в интервале значений 1-5 см, при котором надежно регистрируются одновременно до 5 и более частиц и искровые треки формируются вдоль следов частиц в широком интервале углов наклона относительно направления поля. После установления данного зазора, который оказался равным ~2 см, были выполнены подробные исследования ливневой эффективности регистрации частиц в таких камерах. Основные результаты этих исследований /10,11/ представлены на рис. 1.

Было установлено, что камеры с зазором в 2 см обладают высокой ливневой эффективностью вплоть до регистрации 8 частиц. Угол наклона разряда по следу частиц, проходящих под углом к полю, достигает 30°. Эти данные легли в основу при разработке и создании крупного магнитного искрового спектрометра частиц /12/.

Широкозазорные искровые камеры относятся к категории сравнительно новых детекторов, основные характеристики которых находятся еще в стадии интенсивных поисков и улучшений.

Одной из важнейших характеристик искровых камер является время памяти. Для камер, наполненных инертным газом, оно велико и составляет десятки микросекунд. Для сокращения времени памяти нами разработан метод, опирающийся на использование многоатомных гасящих и электроотрицательных добавок. Основные результаты этих исследований /13-17/ представлены на рис. 2. Из него, в частности, видно, что добавка четыреххлористого углерода в количестве $3 \cdot 10^{-6} \%$ приводит к уменьшению времени памяти с десятков мксек до 1,6 мксек. Такой же примерно результат дает добавка метана в количестве 0,1%.

Аналогичные результаты по изучению влияния многоатомных добавок на время памяти камер были независимо получены Любимовым и др. /1/.

В настоящее время этот метод является самым эффективным способом регулирования памяти широкозазорных искровых и стримерных камер.

Проведенные исследования широкозазорных камер позволили создать устойчиво работающие камеры такого типа и впервые использовать их в эксперименте по измерению коэффициента

спиновой корреляции C_{kp} в упругом $p-p$ рассеянии при энергии 660 Мэв /34/.

2. Исследование проблемы создания прековой камеры на основе использования фазовых переходов в бинарных растворах

Решению этой проблемы посвящена третья глава. Опираясь на общие законы термодинамики, можно показать, что один из компонентов пересыщенного жидкого раствора может выделяться на ионах в следах частиц, как на зародышах расслоения; при этом термодинамический потенциал Φ изменяется на величину $\Delta\Phi$ /18-23/:

$$\Delta\Phi = -\frac{4\pi\rho}{3M} RT \frac{\Delta C}{C} r^3 + 4\pi r^2 \sigma - \frac{(Ze)^2}{2} \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1 \epsilon_2} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r} \right), \quad /1/$$

где M и ρ - молекулярный вес и плотность компонента, выделяющегося на ионах Ze ; C и ΔC - концентрация и пересыщение раствора; σ - поверхностное натяжение на границе раздела раствор-зародыш, a - радиус иона и r - радиус зародыша; ϵ_1 - диэлектрическая постоянная раствора, а ϵ_2 - диэлектрическая постоянная капли, выделяющейся на ионе. Из соотношения /1/ следует, что критическое пересыщение раствора, необходимое для проявления следов частиц, равно

$$\Delta C_k = \frac{3MC}{2\rho RT} \left(\frac{4\pi\sigma^4}{(Ze)^2} \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \right)^{1/3}. \quad /2/$$

Такое пересыщение может достигаться путем адиабатического понижения давления над раствором на величину

$$\Delta P_k = \Delta C_k \frac{\lambda}{T \cdot \Delta V} \frac{1}{\partial C / \partial T}, \quad /3/$$

где λ - теплота растворения, ΔV - изменение объема раствора при растворении исходных компонент; $\partial C / \partial T$ - производная, взятая вдоль кривой расслоения в точке $C = C_k$. Существует еще два способа пересыщения раствора - температурный и электрический. Для них соответственно

$$\Delta T_k = \Delta C_k \frac{1}{\partial C / \partial T}, \quad /4/$$

$$\Delta E_k = \left[4\pi \frac{\lambda}{T} \frac{1}{(\epsilon_2 V_2 - \epsilon_1 V_1)} \frac{\Delta C_k}{\partial C / \partial T} \right]^{1/2} \quad /5/$$

В качестве иллюстраций развитых здесь положений на рис. 3 представлены результаты расчета расслоения на ионах, как на зародышах, в зависимости от перепада давления. Видно, что все кривые с $Z \neq 0$ идут ниже кривой спонтанного зарождения центров расслоения ($Z=0$). Это указывает на повышенную вероятность зарождения капелек на ионах и ионных комплексах.

На основе теории расслоения раствора на ионах в диссертации анализируются два варианта камеры постоянной чувствительности. В одной из них используется раствор метилового спирта в гексане, в другой - раствор воды в бензоле. Результаты анализа зоны насыщения и зоны чувствительности в камере представлены на рис. 4 и 5. Из этих рисунков видно, что зона чувствительности раствора к ионам простирается на большую глубину камеры.

В реферируемой главе описываются также два эксперимента по расслоению пересыщенных растворов на ионах, подтвердившие основные положения разработанной теории ^{/18,19/}.

3. Исследование проблемы создания трековой камеры на основе использования фазовых переходов в переохлажденных жидкостях

Вероятность появления устойчивого зародыша кристаллизации в переохлажденной жидкости равна ^{/22,23/}

$$W = n n^* \sqrt{\sigma k T} \left(\frac{2V}{9\pi} \right)^{1/3} \cdot \frac{1}{h} \exp\left(-\frac{U + \Delta\Phi}{kT}\right), \quad /6/$$

где n - плотность молекул в жидкости, n^* - число молекул в поверхностном слое зародыша, U - энергия активации для собственной диффузии молекул, h - постоянная планка, V - объем молекулы вещества. Остальные обозначения те же, что и в формулах /1/-/5/. Анализ формулы /6/ показывает, что отношение вероятности появления кристалликов в переохлажденной жидкости на ионах $W(Ze)$ к вероятности зарождения центров кристаллизации на флуктуациях плотности $W(0)$ в случае дипольных жидкостей /за исключением воды/ $W(Ze)/W(0) \approx 1$. То есть вероятности этих двух процессов приблизительно равны. Для слабополярных или бездипольных жидкостей $W(Ze)/W(0) > 1$, т.е. образование в этих жидкостях кристал-

лических зародышей на электрических зарядах имеет заметно большую вероятность, нежели на флуктуациях плотности.

Переохлаждение жидкости, необходимое для зарождения и роста кристаллов на ионах, характеризуется величиной

$$\Delta T_k = \frac{3}{2} \frac{TM}{\rho q} \left(\frac{4\pi\sigma^4}{(Ze)^2} \frac{\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \right)^{1/3}, \quad /7/$$

где q - теплота плавления. На рис. 6 дана расчетная зависимость необходимого переохлаждения жидкого аргона от радиуса зародыша и величины заряда.

Основные выводы данной теории нашли хорошее подтверждение в опытах по регистрации следов частиц космического излучения в переохлажденной воде ^{/2/} и в экспериментах по кристаллизации переохлажденных жидкостей в неоднородном электрическом поле ^{/3/}, эквивалентном полю ионов.

В настоящее время разработка детекторов на основе переохлажденных жидкостей ведется во многих лабораториях /см., например, ^{/2,9/} /.

4. Трековые камеры на основе использования люминесценции и-сцинтилляции веществ

Возможность создания таких приборов обсуждается в главе 5. Один из вариантов детектора базируется, как уже упоминалось во введении, на использовании F -центров, образующихся по следу частиц в кристалле. Быстрая частица создает до $3 \cdot 10^3$ ⁻¹ устойчивых F -центров, которые могут жить продолжительное время подобно тому, как живут центры скрытого изображения в фотоэмульсиях. Освещая F -центры в полосе поглощения, можно получить от них люминесцентный свет другой длины волны. В работе ^{/24/} показано, что если использовать ЭОП в качестве приемника светового излучения F -центров, то следы частиц в кристалле могут быть надежно зарегистрированы.

В пятой главе обсуждается также сцинтилляционная нитяная камера ^{/25/}, представляющая собой комбинацию сцинтилляционных нитей или капилляров, заполненных сцинтиллирующей жидкостью, и фотодиодов, оптически сопряженных с торцами отдельных нитей или капилляров. Определены условия оптимального сбора света из нитей на фотодиоды и дана оценка точности регистрации следов частиц в таких системах.

Интересная возможность для разработки сцинтилляционной трековой камеры открывается с использованием эффекта Мал-

тера. Практическая реализация этой возможности сводится к разработке специальной конструкции электродов^{/26,28/}, размещаемых в сцинтиллирующей среде. Такие электроды представляют собой трехслойную композицию, состоящую из металлической подложки, пористого диэлектрика и очень тонкой проводящей пленки. При наложении поля на слой диэлектрика и облучении его быстрыми частицами в диэлектрике вдоль следов частиц возникает внутреннее размножение первичных электронов, которое сопровождается интенсивным выходом их из пленки в сцинтиллирующую среду, возбуждением и свечением последней.

5. Трековая камера с размножением зарядов внутри пленочных электродов

Этому вопросу посвящена шестая глава. В настоящее время в практике физического эксперимента остро ощущается отсутствие специального класса трековых приборов, которые могли бы эффективно работать при любой окружающей их среде - газовой или конденсированной. Речь идет о необходимости разработки автономных координатных детекторов. Одно из предложений по разработке такого детектора обсуждается в работе^{/28/}. Сущность этого предложения заключается в следующем: на металлическую подложку /фольгу/ с двух сторон наносятся слои из рыхлого диэлектрика, на поверхность которых, в свою очередь, наносятся в один ряд узкие проводящие полоски. Причем системы полосок на противоположных поверхностях делают ортогональными друг другу для образования координатной сетки $x-y$ /см. рис. 7/. Электроны, образуемые проходящей частицей, размножаются в порах диэлектрика и поступают на соответствующие проводящие полоски, формируя на них сигналы. Рост электронных лавин в пористом диэлектрике обычно подчинен экспоненциальному закону. Поэтому величина возникающих импульсов пропорциональна ионизирующей способности частиц.

6. Трековые камеры с электрическим пробоем паро-газовых пузырьков

В работе^{/4/} была предложена оригинальная идея создания нитяного пузырькового годоскопа, которая заключается в том, что на проволочках, погруженных в жидкость, путем подвода тепла непрерывно генерируются пузырьки пара и в них происходит размножение первичных электронов ионизации. Такой прибор прошел первую экспериментальную проверку и дал

хорошие счетные и амплитудные характеристики. Однако данному детектору, как выяснилось, присуща определенная нестабильность в работе, порождаемая непрерывным подводом тепла к нити.

Для устранения этого недостатка было предложено создавать газовые каналы^{/7/} или пузырьки газа^{/25/} в диэлектрическом твердом веществе вблизи поверхности проволочек. Детальный анализ предложения^{/25/}, выполненный в главе 7 диссертации, показал практическую целесообразность его разработки. К настоящему времени модель однонитяного твердотельного пузырькового годоскопа прошла экспериментальную проверку^{/37/}. В качестве рабочей среды использовался аргон, который замораживался в момент закипания при быстрой откачке его паров в тройной точке. Твердый аргон содержал множество пузырьков различного диаметра. Детектор облучался γ -квантами от источника ^{60}Co . При напряжении на детекторе около 1 кв амплитуда импульсов на нити достигала 0,1 в.

7. Работа нитяных счетчиков с жидкостным и газовым заполнением под большим давлением

Исследование данной проблемы составляет содержание восьмой и девятой глав. Как уже отмечалось, при экспериментальном изучении нитяного жидкоаргонового и жидкоксеронового счетчиков в их работе были обнаружены^{/5,6/} различные нестабильности. Анализ этих нестабильностей, выполненный в главе 8, показал, что они возникают преимущественно на микрошероховатостях проволочек, так как поле в этих местах^{/29/}

$$E = E_0 \left[1 + \left(\frac{1}{g} - 1 \right) \frac{h^3}{r^3} \right] \quad /8/$$

существенно превышает поле E_0 на "идеальной" поверхности нити. Здесь h - высота микровыступов, r - переменный радиус $\geq h$ и g - геометрический фактор формы выступов. Так, при $h = 1 \text{ мкм}$ $E = 10 E_0$.

Для снижения роли микровыступов в образовании разрядов предлагается покрывать проволочку тонким слоем диэлектрика со слабой проводимостью. Каждый участок такой нити, в том числе и микровыступы, будут работать в режиме самоограничения тока в разряде, как это имеет место, например, в несамогасящихся счетчиках с большим нагрузочным сопротивлением.

Второе предложение, рассмотренное в восьмой главе, сводится к использованию в жидкостном счетчике многоатомных добавок, способных гасить разряд. И, наконец, третье предложение состоит в том, чтобы питать счетчик биполярными импульсами или высокочастотным полем, удовлетворяющим

условию $f \geq \frac{1}{2\tau}$, где f - частота поля и τ - время дрейфа

электронов между нитью и корпусом счетчика. Коэффициент усиления электронов в этом случае может достигать величины

$$M = \exp z \left[1 + \frac{\gamma \exp(2z) [\gamma^N \exp(2Nz) - 1]}{\exp(2z) - 1} \right], \quad /9/$$

$$z = \int_{r_0}^r a \, dr.$$

Здесь a - первый коэффициент Таунсенда, N - число циклов поля, γ - коэффициент воспроизводимости электронов за счет фотоэффекта, нейтрализации и дезактивации возбужденных атомов у поверхности нити, r_0 - радиус нити, $r < R$ - радиуса катода. Анализ формулы /9/ показывает, что коэффициент усиления может достигать большой величины при сравнительно низких напряжениях питания.

В девятой главе излагаются результаты подробного экспериментального исследования счетчика с жидким и газовым заполнением при большом давлении^{/30/}. В качестве рабочих сред в счетчике использовались аргон, ксенон, метан и их смеси. Цель экспериментов с жидкими смесями состояла в том, чтобы проверить влияние многоатомной добавки - метана на характеристики счетчика. Цель же экспериментов с чистыми газами и газовыми смесями заключалась в нахождении закономерностей характеристик счетчика с ростом плотности рабочей среды. Такие закономерности, экстраполированные к плотности жидкости, позволяли глубже понять особенности работы жидкостного счетчика. Опыты с газом представляли и самостоятельный интерес для получения новой информации о работе счетчиков с предельно большим давлением газа.

Для проведения этих исследований была разработана специальная аппаратура /рис. 8/, включающая в себя систему охлаждения и термостатирования счетчика, а также систему глубокой очистки газа и измерительную электронную аппаратуру высокой чувствительности.

Счетчик /см. рис. 9/ имел цилиндрический катод диаметром 6 мм и анод-нить из вольфрама диаметром 10 мкм, покрытую

тонкой пленкой золота. Рабочий объем счетчика через торцовые окна хорошо просматривался визуально. Основные результаты исследований амплитудной и счетной характеристик счетчика, облучаемого γ -квантами, представлены на рис. 10-13.

Ошибка измерения амплитудной характеристики составляет около 10%. В экспериментах было установлено, что стабильная работа аргонового и ксенонового газовых счетчиков простирается лишь до давления 50 атм. При больших давлениях счетчик работает нестабильно. Лучшие результаты были получены при работе с метаном и особенно с газовыми смесями аргона с метаном. Коэффициент усиления $\sim 10^4$ сохранялся вплоть до давления 100 атм, однако счетное плато во всех газовых счетчиках при больших давлениях практически исчезало.

Исследования с жидким аргоном и ксеноном /кривые 9 и 10 на рис. 10; 7,8 и 9 - на рис. 11/ показали, что амплитуда импульсов в широком диапазоне значений напряжения на счетчике не превышает величины 10^{-4} в и эффективность регистрации частиц является чрезвычайно низкой. В жидком метане вообще не удалось зарегистрировать импульсы от γ -квантов. В жидких смесях аргона с метаном γ -кванты регистрировались только тогда, когда содержание метановой добавки в смеси оставалось ничтожно малым /кривая 8 на рис. 11/.

Основной результат исследований как с однокомпонентными, так и многокомпонентными жидкими средами, полученный в диссертации и в работах^{/5,6/}, сводится к признанию того факта, что жидкостным счетчикам присуща большая нестабильность в работе. Дальнейшие исследования таких счетчиков должны опираться, по-видимому, на использование в них нитей, покрытых слоем диэлектрика со слабой проводимостью.

8. Кристаллический нитяной счетчик частиц

Разработке и всестороннему экспериментальному исследованию этого счетчика посвящены десятая и одиннадцатая главы диссертации. В первой из этих глав дается физическое обоснование программы разработки различных методов быстрой регистрации следов частиц в твердых кристаллических и полупроводниковых средах^{/26/}.

Один из предлагаемых в этой работе трековых детекторов представляет собой систему проволочек, покрытых полупроводниковым слоем. Каждая нить с таким покрытием может работать как пропорциональный детектор частиц. Физической основой для этого служит известный эффект ударной ионизации зарядов во многих полупроводниках, особенно в так называемых

скомпенсированных полупроводниках. Для нормальной работы таких детекторов необходима низкая температура $/2-10^{\circ}\text{K}/$, при которой подавлены процессы теплового заброса электронов из валентной зоны и примесных уровней в зону проводимости. Практическая реализация обсуждаемого детектора пока затруднена, так как отсутствует технология нанесения полупроводниковых слоев на тонкие нити.

Существует и вторая возможность создания аналогичного счетчика, в котором нить покрывается тонкой пленкой из халькогенидного стекла. Такое покрытие толщиной $10^{-5} - 10^{-4}$ см в поле $10^5 - 10^6$ в/см скачкообразно изменяет свою проводимость в $10^5 - 10^7$ раз. Поэтому при сбросе зарядов из следа частицы на данный слой в нем происходит усиление внутреннего поля и, как следствие, должно наступать "переключение" слоя и формирование сигнала на нити. Практическая разработка такого счетчика сопряжена в настоящее время с исключительно сложной технологией создания переключающих слоев на тонких нитях.

✓ Наконец, в десятой главе обосновывается новое, наиболее важное для практики предложение о размножении электронов непосредственно в кристаллах вблизи замороженных тонких нитей. Для такой цели могут подойти любые кристаллы, обладающие электронной и дырочной проводимостью. Было показано, что существуют две возможности размножения электронов: прямая - за счет ионизации атомов кристалла в валентной зоне - и косвенная - за счет ионизации примесных уровней, заселяемых электронами. Первая возможность не нуждается в особых пояснениях, т.к. она связана с известным механизмом ударного размножения электронов, ускоренных в сильных электрических полях. Второй способ размножения электронов заключается в том, что вещество перед началом регистрации частиц искусственно активируется, т.е. в нем заселяются электронами все уровни захвата и затем на этих уровнях производится размножение электронов ионизации. Активация вещества может достигаться либо путем холодной инъекции электронов из нити, либо путем внутреннего фотоэффекта.

Идея создания нитяного кристаллического детектора частиц прошла в настоящее время всестороннее экспериментальное исследование^{/31/}, результаты которого изложены в одиннадцатой главе. В исследованиях применялась та же аппаратура, что и в опытах с газами и жидкими средами. В качестве рабочих сред в счетчике использовались кристаллические аргон, ксенон и метан. Сначала в опытах обрабатывались температурные режимы получения из жидкой фазы кристаллов, совершенных по структуре /с хорошей прозрачностью/, и затем производи-

лось исследование характеристик счетчика при облучении его γ -квантами от ^{60}Co .

Полученные в экспериментах амплитудные и счетные характеристики нитяных кристаллических аргонового и ксенонового счетчиков представлены соответствующими графиками на рис. 14 и 15. С кристаллическим же метаном удовлетворительных результатов не получено. Заштрихованные на рис. 14 и 15 зоны означают следующее. В каждом опыте с кристаллическим ксеноном получались вполне определенные счетная и амплитудная характеристики, однако от опыта к опыту /от замораживания к замораживанию/ эти характеристики точно не воспроизводились. Большая совокупность таких характеристик, полученных во многих опытах с ксеноном, и составила данные зоны.

Из амплитудных характеристик видно, что счетчик имеет три типичных участка: ионизационный, пропорциональный и участок насыщения. В пропорциональной области коэффициент усиления электронов составляет ~ 150 . Счетные характеристики имеют пологое плато большой протяженности, на котором эффективность регистрации частиц составляет 100%. Кристаллические счетчики с совершенными кристаллами аргона и ксенона работают исключительно стабильно и обладают хорошей воспроизводимостью характеристик.

В совершенных по структуре кристаллах аргона обнаружена подвижность дырок, составляющая 10^{-1} см² в⁻¹ сек⁻¹. В кристаллическом ксеноне подвижность дырок лежала в диапазоне значений $10^{-1} - 10^{-2}$ см² в⁻¹ сек⁻¹, что близко к величине $2 \cdot 10^{-2}$ см² в⁻¹ сек⁻¹, приведенной в работе^{/8/}.

В ряде опытов специально получали несовершенные кристаллы /с плохой прозрачностью/, и в них также наблюдалось размножение электронов. Однако такие кристаллы быстро заряжались положительным объемным зарядом, и амплитуда импульсов заметно падала. Для восстановления чувствительности счетчика после регистрации большого числа импульсов требовалось кратковременное наложение на него поля обратной полярности небольшой амплитуды.

В опытах с несовершенными кристаллами ксенона и аргона исследовался также механизм заселения уровней захвата холодными электронами, инжектированными на нити. На этих уровнях наблюдалось дополнительное усиление электронных лавин.

В свете предложения Долгошвенна и др.^{/4/} по разработке двухфазной камеры с переносом электронного следа из одной фазы в другую представляется весьма перспективным создать подобную камеру с одной лишь фазой - кристаллической.

Сейчас представляется, что твердотельная нитяная камера может быть разработана также на кристаллическом гелии, в котором электроны и дырки обладают большой подвижностью.

Основные выводы

1. Исследованы характеристики искровых камер с большим межэлектродным промежутком ^{/12,13,14,16,17/}. Впервые эти камеры были успешно использованы в опытах по изучению протон-протонного взаимодействия ^{/34/}.

Предложен и изучен метод "регулирования" времени памяти широкоазорных искровых камер путем введения в рабочий объем гасящих и электроотрицательных добавок ^{/14,18/}. Данный способ нашел широкое применение в современной методике искровых и стримерных камер.

Экспериментально определена величина оптимального межэлектродного промежутка искровых камер и изучена ливневая эффективность камер с таким промежутком. На основе данных исследований осуществлена разработка и создание крупномасштабного искрового спектрометра частиц ^{/10,11,12/}.

2. Развита теория фазового перехода в пересыщенных конденсированных растворах на ионах и сформулированы условия образования и "проявления" треков частиц в таких растворах ^{/18,19/}. Эксперименты подтвердили основные положения этой теории ^{/20,21/}.

3. Развита теория кристаллизации переохлажденных жидкостей на ионах как на центрах кристаллизации ^{/22/}. Эксперименты хорошо подтвердили основные выводы этой теории ^{/2,3/}. На ее основе в ряде лабораторий были предложены и сейчас исследуются различные варианты трековых детекторов ^{/2,3,9/}.

4. Предложены и проанализированы возможности создания трековых детекторов на основе использования люминесценции F-центров ^{/2,4/}, а также на основе применения эффекта Малтера и других пограничных явлений ^{/25,26,28,29,33/}.

5. Предложен новый класс трековых приборов, основанных на применении эффекта лавинного размножения электронов в рыхлых диэлектрических и полупроводниковых пленках ^{/28/}. Расчеты показывают, что такие детекторы могут обладать высоким коэффициентом пропорционального усиления электронов и высокой временной и пространственной точностью.

6. Предложены два варианта пузырьковых годоскопических систем, содержащих твердую среду ^{/25/}. Выполнен эксперимент с однопнитяным годоскопическим элементом, содержащим твердый аргон и замороженные в нем пузырьки газа. Опыт качест-

венно подтвердил возможность регистрации частиц в таких годоскопах ^{/31/}.

7. Проанализированы физические причины возникновения особенностей в разряде в нитяных жидкостных счетчиках и предложен способ стабилизации разряда путем покрытия нитей тонким слоем диэлектрика со слабой проводимостью ^{/29/}. Предложен новый режим питания нитяных счетчиков биполярными импульсами и высокочастотным полем ^{/29/}.

8. Экспериментально исследован нитяной счетчик частиц с газовым и жидкостным наполнением. Установлены основные закономерности работы счетчика при изменении в нем плотности среды от плотности газа до плотности жидкости ^{/30,31/}.

9. Сформулирована физическая программа разработки новых диэлектрических и полупроводниковых кристаллических нитяных счетчиков частиц ^{/26/}. Определены условия лавинного размножения электронов в таких счетчиках.

10. Разработан и экспериментально исследован новый нитяной счетчик частиц кристаллического типа ^{/31/}. Установлено, что амплитудные характеристики аргонового и ксенонного счетчиков имеют три типичных участка: ионизационный, пропорциональный и участок насыщения. Коэффициент размножения электронов на пропорциональном участке составляет ~150. Счетное плато имеет слабый наклон и большую протяженность. Кристаллический нитяной счетчик работает стабильно.

11. Установлено, что "неидеальность" структуры кристалла в счетчике слабо отражается на его характеристиках. Поляризация частично несовершенного кристалла объемным положительным зарядом легко устраняется путем кратковременной подачи на счетчик обратного поля небольшой амплитуды ^{/31/}.

В кристаллах аргона впервые обнаружена и определена подвижность положительных зарядов /дырок/, составляющая $\sim 10^{-1} \text{ см}^2 \text{ в}^{-1} \text{ сек}^{-1}$, и подтверждены известные данные о подвижности зарядов в кристаллическом ксеноне ^{/31/}.

Исследования, составившие диссертацию, охватывают, как видим, широкий круг вопросов, связанных с разработкой новых детекторов частиц. В практическом плане наиболее важные результаты получены в исследованиях с искровыми камерами /главы 1 и 2/ и с нитяным счетчиком, заполняемым газом под большим давлением, жидкостью или кристаллическим веществом /главы 9,10 и 11/. Результаты исследований с кристаллическим счетчиком открывают широкие перспективы для создания пропорциональных нитяных камер большого размера, нити в которых будут жестко фиксированы в пространстве благодаря их замораживанию в кристалле. Большая удельная ионизация частиц в кристаллах позволит размещать нити на

малом расстоянии друг от друга, что обеспечит камерам высокое пространственное и временное разрешение.

Литература

1. В.А.Любимов, Ф.А.Павловский. ЖЭТФ, 46, 1142 /1964/.
2. N.C. Vashneya. Nucl. Instr. and Meth., 92, 147 (1971).
3. M.A. Abbas, J.Lathwan. J.Meteorol.Soc. Japan, 47, 65 (1969).
4. Б.А.Долгошеин, А.А.Крузлов, В.Н.Лебедеенко, В.П.Мирошниченко, Б.У.Родионов. Препринт ОИЯИ, P1-6245, Дубна, 1972.
5. S.E.Derenzo, R.A.Muller, R.G.Smits, D.B.Smith, H.Zaklad, G.Smadi, L.W.Alvarez. Preprint UCRL-20118, 1970. Phys.Rev.Lett., 27, 532 (1971).
6. Е.А.Кушниренко, А.Г.Чилингаров. В сб. "Международная конференция по аппаратуре в физике высоких энергий". Дубна, 1970, 1, 297, 1971.
7. А.А.Тяпкин. В сб. "Международная конференция по аппаратуре в физике высоких энергий". Дубна, 1970, 2, 859, 1971.
8. L.S.Muller, S.Howe, W.E.Speer. Phys.Rev., 166, 871 (1968).
9. В.С.Дронов. ЖЭТФ, 58, 1784 /1970/.
10. Б.З.Копелиович, А.Ф.Писарев, А.И.Сарайкин, В.М.Шешунов. Препринт ОИЯИ, P13-4369, Дубна, 1968.
11. К.А.Байчер, Ю.Н.Зыкин, И.Х.Ноздрин, А.Ф.Писарев, В.Ф.Писарев, В.Н.Филиппов, В.М.Шешунов. Препринт ОИЯИ, P13-4191, Дубна, 1968.
12. Р.Анжеяк, Е.М.Андреев, А.П.Бирюков, И.М.Василевский, В.В.Вишняков, Ю.Н.Зыкин, З.Женчикевич, Н.Д.Крахопин, В.Н.Никаноров, А.Ф.Писарев, Н.С.Толстой, А.А.Тяпкин, В.М.Шешунов. Препринт ОИЯИ, P13-3588, Дубна, 1967.
13. В обзорном докладе А.И.Алиханяна и М.С.Козодаева. Proc. of the 1960 Intern. Conf. Instr. High Energy Phys. at Berkeley, p. 174, 1960.
14. Г.Петер, А.А.Тяпкин, А.Ф.Писарев, Цзоу Чжу-лянь. Nucl.Instr.Meth., 20, 201 (1963); Proc. of the 1962 Conf. Instr. High Energy Phys. at CERN, p. 201, 1962.
15. А.Ф.Писарев. Труды рабочего совещания по пузырьковым камерам. Дубна, P13-4466, 159, Дубна, 1969.
16. А.М.Говоров, В.И.Никаноров, Г.Петер, А.Ф.Писарев, Х.Позе. ПТЭ, 6, 49 /1961/.
17. И.И.Громова, В.И.Никаноров, Г.Петер, А.Ф.Писарев. ПТЭ, 1, 64 /1965/.
18. А.Ф.Писарев, В.А.Бирюков. ЖЭТФ, 54, 469 /1968/.
19. А.Ф.Писарев. ЖЭТФ, 56, 370 /1969/.
20. Л.К.Лыткин, А.Ф.Писарев, А.П.Сумбаев, С.Ф.Чалкин. ЖЭТФ, 56, 73 /1969/.
21. Л.К.Лыткин, В.И.Никаноров, А.Ф.Писарев, А.П.Сумбаев, С.Ф.Чалкин. ЖЭТФ, 57, 22 /1969/.
22. А.Ф.Писарев. Препринт ОИЯИ, P1-3360, Дубна, 1967; ЖЭТФ, 54, 463 /1968/.
23. А.Ф.Писарев, Л.К.Лыткин, Н.С.Толстой. Препринт ОИЯИ, P13-4807, Дубна, 1969.

24. Б.М.Головин, В.И.Никаноров, А.Ф.Писарев. Препринт ОИЯИ, P13-4848, Дубна, 1969.
25. В.И.Никаноров, А.Ф.Писарев, Г.И.Селиванов. Сообщение ОИЯИ, P13-5782, Дубна, 1971.
26. А.Ф.Писарев. Сообщение ОИЯИ, P13-5623, Дубна, 1971.
27. А.Ф.Писарев, Г.И.Селиванов, М.П.Баландин, Л.К.Лыткин. Сообщение ОИЯИ, P13-5277, Дубна, 1970.
28. В.И.Никаноров, А.Ф.Писарев, Г.И.Селиванов. Сообщение ОИЯИ, P13-5780, Дубна, 1971.
29. А.Ф.Писарев. Сообщение ОИЯИ, P13-5838, Дубна, 1971.
30. А.Ф.Писарев, В.Ф.Писарев, Г.С.Ревенко. Препринт ОИЯИ, P13-6450, Дубна, 1972; ЖЭТФ, 63, 1562 /1972/.
31. А.Ф.Писарев, В.Ф.Писарев, Г.С.Ревенко. Препринт ОИЯИ, P13-6449, Дубна, 1972; Письма в ЖЭТФ, 16, 86 /1972/; ЖЭТФ, 63, 1562 /1972/.
32. А.Ф.Писарев. Обзор. Тезисы докладов школы молодых физиков ОИЯИ. Препринт ОИЯИ, P13-5057, Дубна, 1970.
33. А.Ф.Писарев. Обзор в сб. "Проблемы физики элементарных частиц и атомного ядра", 3, 650 /1972/.
34. В.И.Никаноров, Г.Петер, А.Ф.Писарев, Х.Позе. ЖЭТФ, 42, 1209 /1962/.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 января 1973 года.

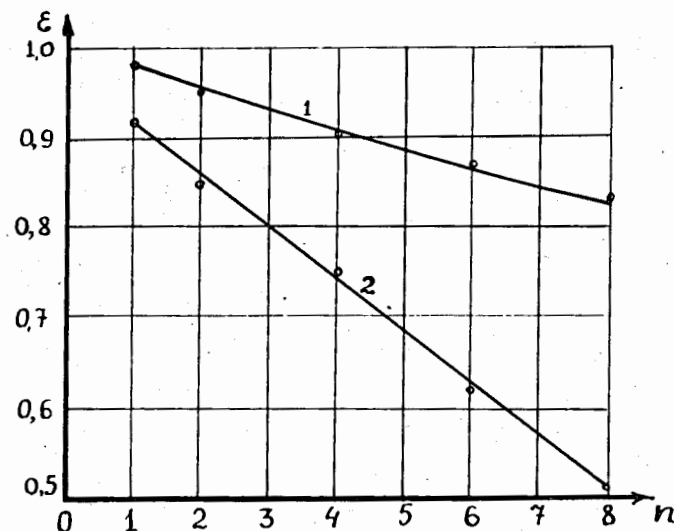


Рис. 1. Ливневая эффективность камеры на один промежуток. Зазор 2 см; газ неон, 760 тор; ϵ - эффективность регистрации, n - число частиц; 1 - очищающее поле $U = 0$; 2 - $U = 20$ в.

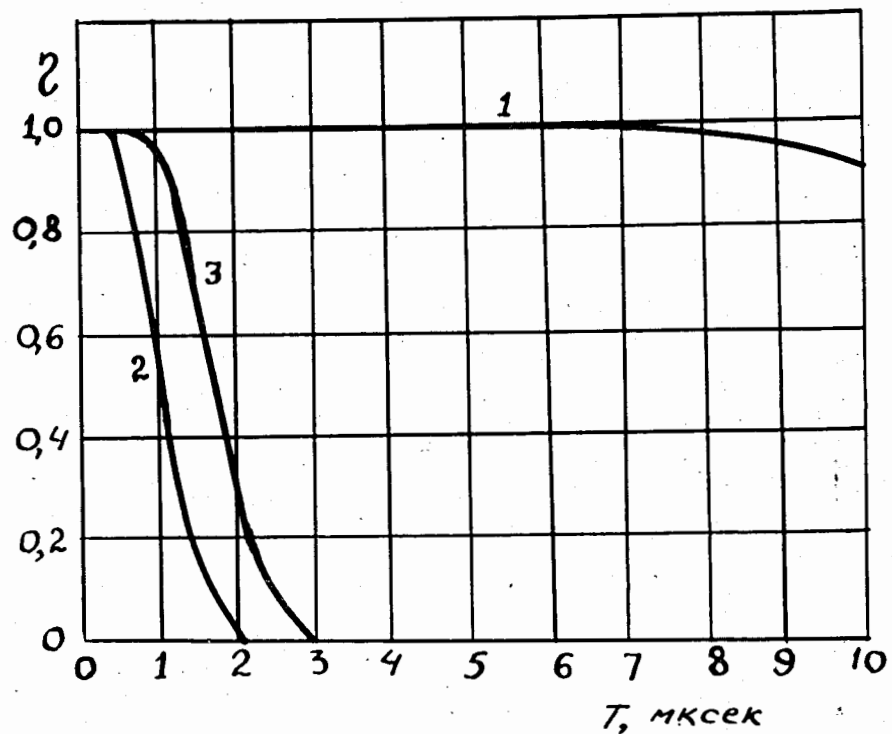


Рис. 2. Эффективность регистрации частиц в камере при наполнении неона с добавкой аргона, метана и четыреххлористого углерода. η - эффективность регистрации; τ - время задержки импульса относительно момента прохождения частицы через камеру; 1 - стандартная смесь /с.с./, состоящая из 99,6% Ne и 0,4% Ar; 2 - с.с. + 0,1% CH_4 ; 3 - с.с. + $3 \cdot 10^{-6}$ % CCl_4 .

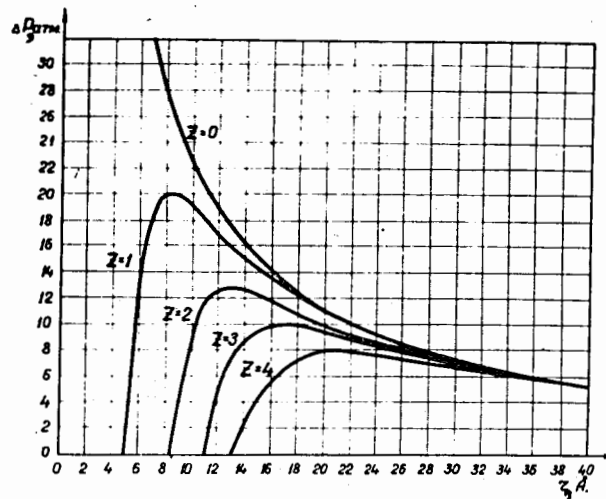


Рис. 3. Зависимость перепада давления ΔP над раствором от радиуса равновесного зародыша r и величины заряда Z .

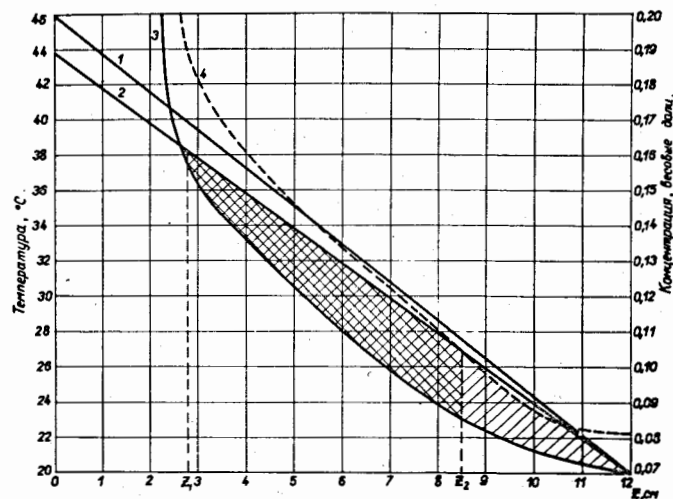


Рис. 4. Распределение температуры и концентрации метилового спирта в гексане по глубине раствора в камере. 1 - температура, 2 - концентрация, 3 - граница насыщения, 4 - граница допустимого пересыщения. Двойной штриховкой указана зона чувствительности, косой штриховкой - зона пересыщения.

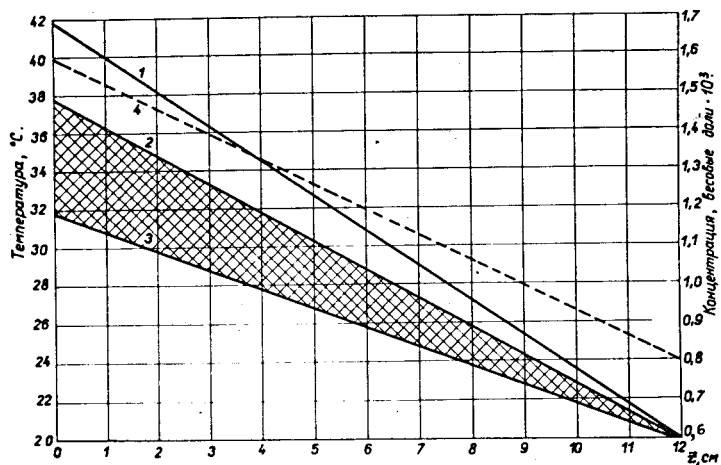


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но для раствора воды в бензоле.

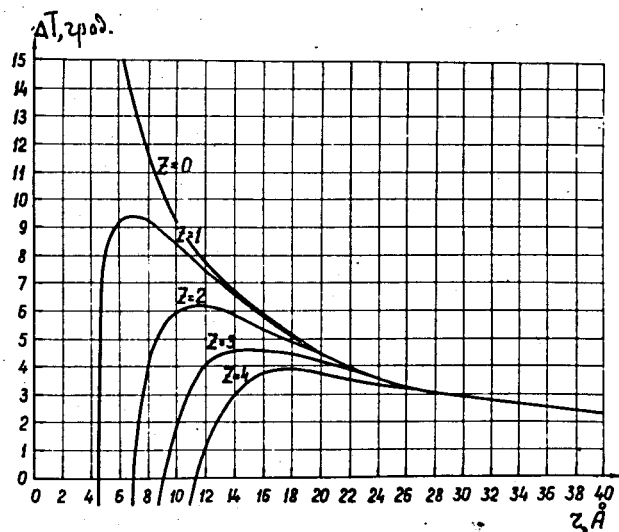


Рис. 6. Зависимость равновесного переохлаждения ΔT жидкого аргона от радиуса зародыша r и величины заряда Z .

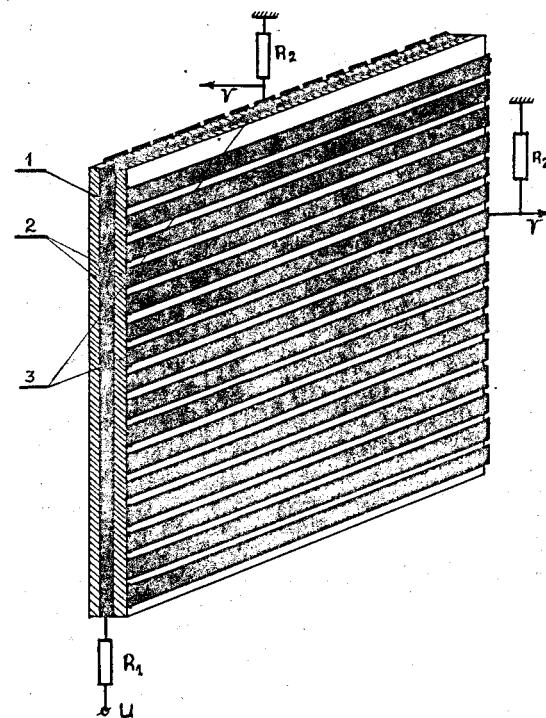


Рис. 7. Конструкция электрода координатной камеры. 1 - проводящая подложка, 2 - пористые диэлектрические или полупроводниковые слои, 3 - проводящие узкие полоски, U - внешнее напряжение, R_1 - ограничивающее сопротивление, R_2 - нагрузочное сопротивление.

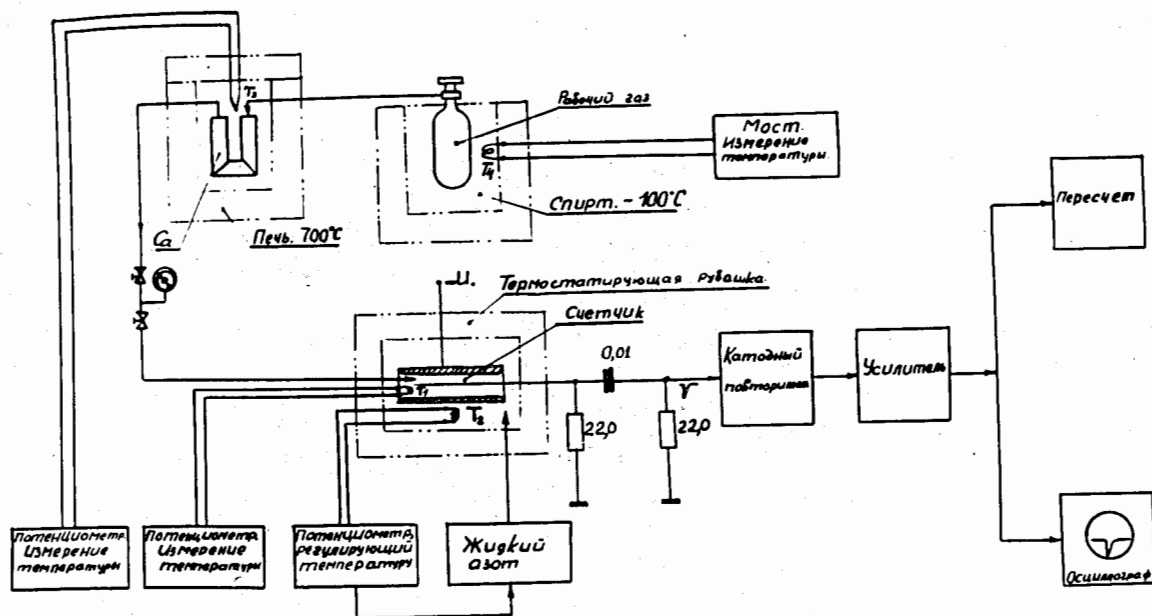


Рис. 8. Блок-схема экспериментальной аппаратуры. T_1 , T_2 , T_3 , T_4 - термодатчики.

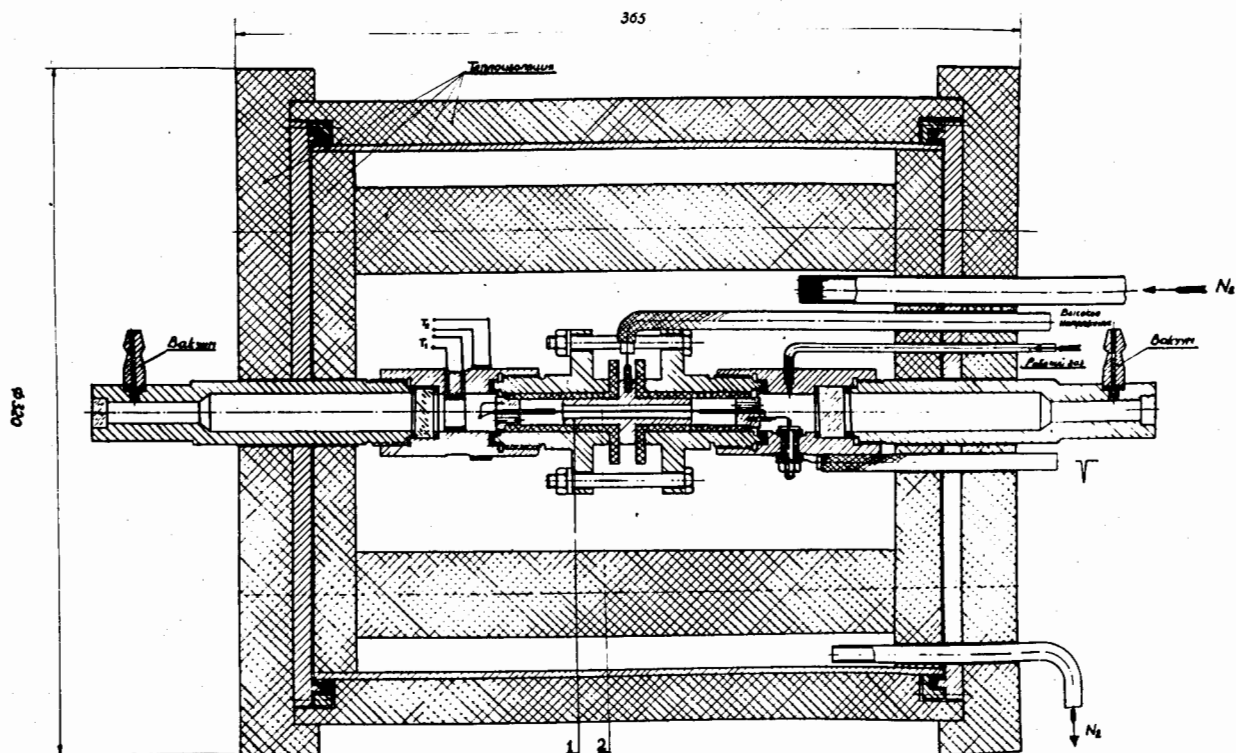


Рис. 9. Конструкция счетчика и термостатирующей рубашки. 1 - катод, 2 - анод, T_1 и T_2 - наружный и внутренний датчики температуры.

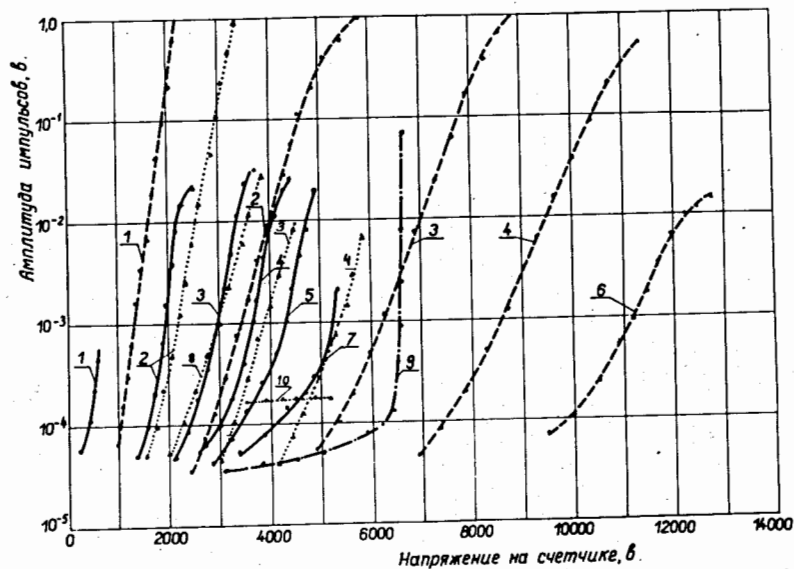


Рис. 10. Амплитудные характеристики счетчика. ———— - аргон; - - - - - метан; ······ - ксенон; 1-8 соответственно давления газа 1, 10, 30, 50, 70, 75, 100, 25 атм; 9 - жидкий аргон; 10 - жидкий ксенон.

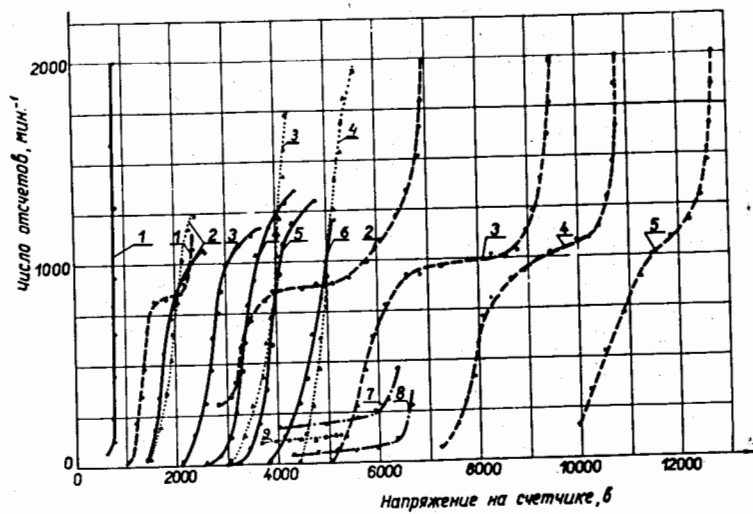


Рис. 11. Счетные характеристики. 1-6 - соответственно давления 1, 10, 30, 50, 75, 100 атм; 7 - жидкий аргон; 8 - жидкий аргон со следами примеси метана; 9 - жидкий ксенон. Остальные обозначения те же, что на рис. 10.

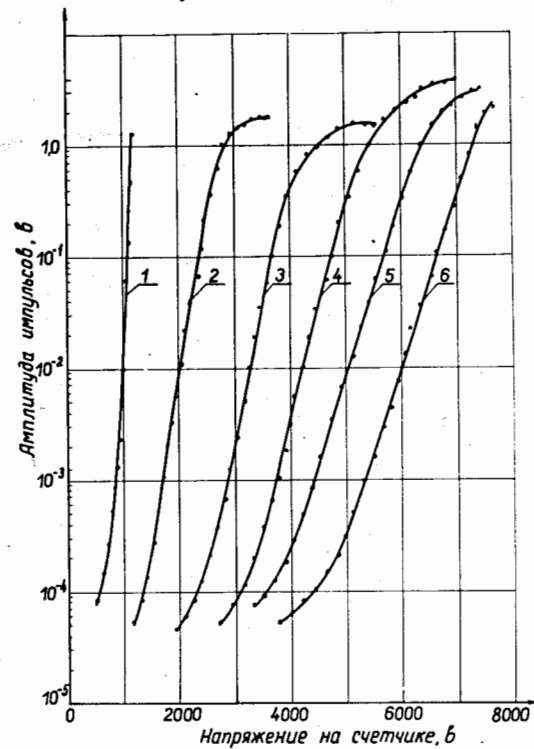


Рис. 12. Амплитудные характеристики счетчика, наполненного смесью 95% Ar и 5% CH₄. 1-6 - соответственно давления газа 1, 10, 30, 50, 70, 100 атм.

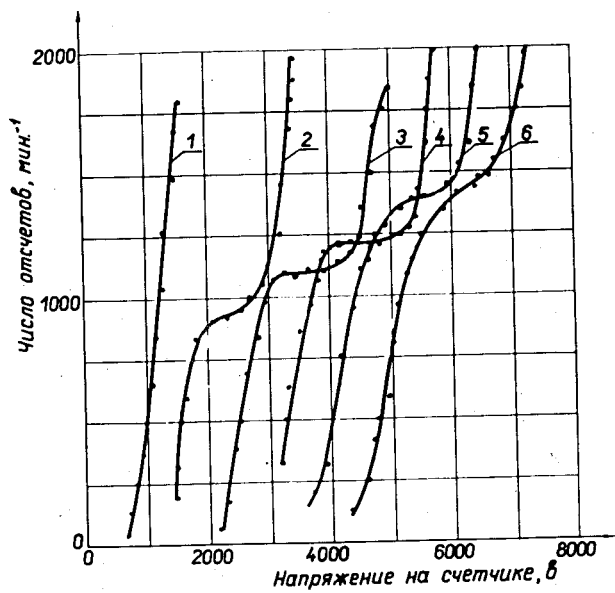


Рис. 13. Счетные характеристики. Наполнение счетчика 95% Ar и 5% CH₄; 1-6 - соответственно давления газа 1, 10, 30, 50, 70, 100 атм.

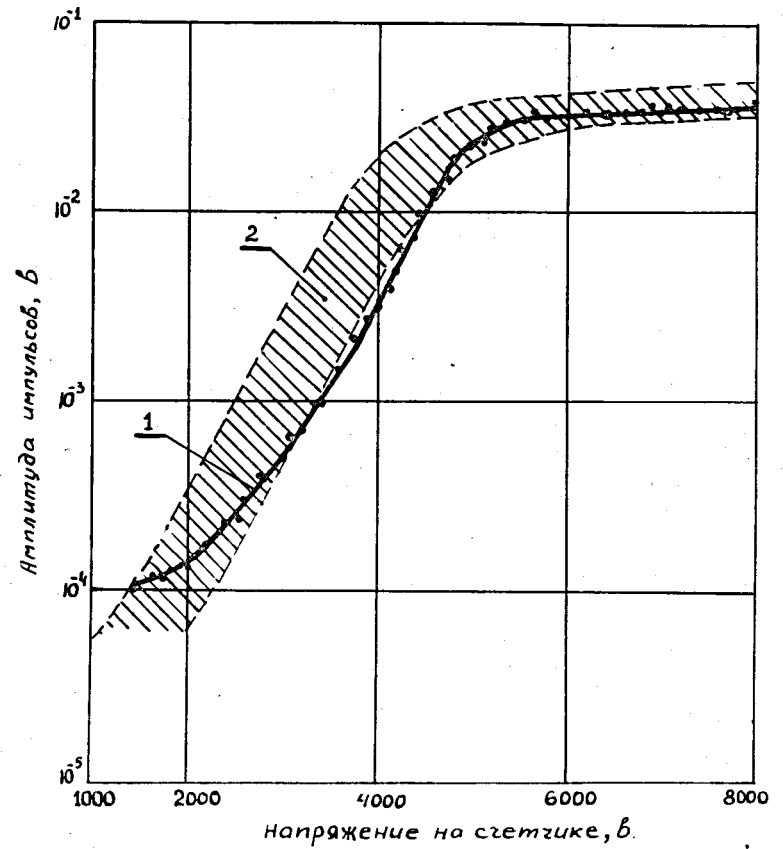


Рис. 14. Амплитудные характеристики кристаллического счетчика. 1 - характеристика аргонового счетчика, 2 - область значений амплитудных характеристик ксенонового счетчика.

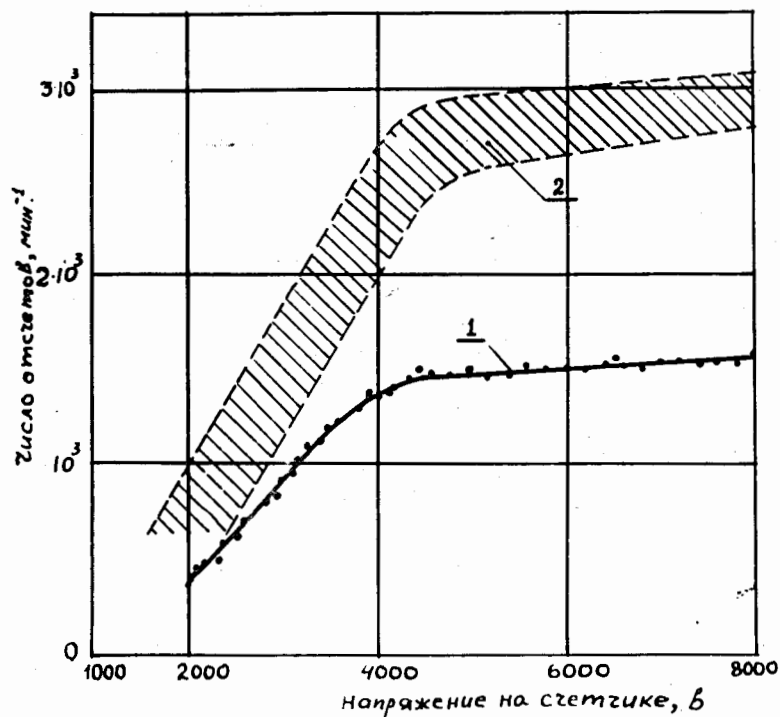


Рис. 15. Счетные характеристики кристаллического счетчика. 1 - характеристика аргонового счетчика, 2 - область значений счетных характеристик ксенонового счетчика.