

С 344.7

П-259

вып. 37



**ЛЕКЦИИ
ДЛЯ МОЛОДЫХ
УЧЕНЫХ**

Ю.Н.Пепельшев

**Регистрация нейтронов.
Современное состояние
и перспективы развития**

ДУБНА

Зил
к. 102

ЛЕКЦИИ ДЛЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Выпуск 37

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

- Д.В.Ширков — председатель
- А.Н.Сисакян — зам. председателя
- А.Т.Филиппов — зам. председателя
- Г.М.Гавриленко
- В.Б.Беляев
- В.П.Гердт
- Е.П.Жидков
- В.А.Загребнов
- Г.В.Мицельмахер
- В.А.Никитин
- Л.М.Сороко
- В.Р.Саранцева

127483

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

P13-86-719

Ю.Н.Пепельшев

РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ

Современное состояние
и перспективы развития

C 344.1
П-259

(Лекции для молодых ученых)

127483

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1986

344.7a

Пепельшев Ю.Н. P13-86-719
 Регистрация нейтронов.
 Современное состояние и перспективы развития

Лекции представляют собой краткое обзорное сообщение по современным методам и технике регистрации нейтронов. На основе конкретных достижений, полученных в этой области за последние 5-7 лет, сделана попытка выделить основные направления и оценить перспективы развития нейтронных детекторов. Особое внимание уделено позиционно-чувствительным детекторам и новым перспективным детекторам заряженных частиц и γ -квантов, пригодным для регистрации нейтронов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Перевод автора.

Реруолышев Ю.Н. P13-86-719
 Neutron Registration.
 Present State and Prospects of Development

The reports are devoted to the modern methods and neutron registration technique. On the basis of the achievements obtained in this field during the last 5-7 years the attempt was made to distinguish the main directions and estimate the prospects of the development of neutron detectors. Special attention is paid to the position-sensitive detectors, new perspective charged particles detectors and gamma-quantum detectors, suitable to the registration of neutrons.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

О г л а в л е н и е

I. Введение 4

2. Особенности регистрации нейтронов.
 Нейтронные конверторы 5

3. Тенденции в развитии традиционных методов
 регистрации нейтронов 10

3.1. Газоразрядные детекторы 11

3.1.1. Газовые детекторы в ионизационном
 режиме 11

3.1.2. Пропорциональные счетчики и камеры 13

3.1.3. Новые типы газоразрядных детекторов 15

3.2. Сцинтилляционные детекторы 18

4. Полупроводниковые детекторы 20

5. Детекторы для измерения интенсивных
 нейтронных полей 23

6. Позиционно-чувствительные детекторы (ПЧД) 26

7. Детекторы высокоэнергичных нейтронов и
 антинейтронов 33

8. Новые типы детекторов 35

9. Заключение 37

10. Литература 39

1. Введение

Методы "получения" и регистрации элементарных частиц относятся к интенсивно развивающейся области современного естествознания. Особое место в ней занимают методы и техника регистрации нейтронов. Во-первых, это связано с уникальными свойствами самого нейтрона: уточнение фундаментальных характеристик этой частицы может привести к пересмотру некоторых принципиальных положений современной физики. Во-вторых, нейтрон в настоящее время не только объект, но и универсальный инструмент исследования, используемый в широкой области прикладных задач. В-третьих, нужно отметить, что прогресс в технике регистрации нейтронов определяет не только экспериментальные возможности исследователя, но и область прикладного использования нейтронов вообще.

В более, чем полувекковой эволюции нейтронных детекторов достаточно четко выделяются несколько этапов, совпадающих по времени со сменой поколений нейтронных источников и электронных приборов:

1. 1940-1950 гг. $\varphi = 10^{12} - 10^{14}$ н/см²с^ж)

Нейтронные исследования подчинены задачам реакторостроения. Господствует ламповая электроника. Создание традиционных детекторов (газоразрядных и сцинтилляционных). Быстродействие детекторов, ограниченное возможностями электроники, не являлось определяющим. Появление первых позиционно-чувствительных детекторов (ПЧД).

2. 1960 гг. $\varphi = 10^{15}$ н/см²с

Расширение области нейтронных исследований. Появление сложных спектрометров с развитой детектирующей системой. Полупроводниковые приборы используются не только для обработки сигналов, но и для детектирования нейтронов. Повышенное быстродействие электроники ограничило применение одних детекторов, например коронных и гейгеровских, и стимулировало разработку более быстродействующих. Сцинтилляционные детекторы прочно вошли в экспериментальную практику. Интенсивное развитие ПЧД на базе детекторов традиционного типа.

ж) Средняя плотность потока нейтронов, характерная для исследовательских реакторов данного периода и источников на базе ускорителей.

3. 1970 гг. $\varphi = 10^{15}$ н/см²с

Широкое использование нейтронов в различных областях науки и техники (биологии, медицине, геологии и т.д.). Широкое использование интегральных микросхем в детекторной электронике. Существенное повышение требований к быстродействию и надёжности. Развитие ПЧД на базе не только газоразрядных, но и твердотельных приборов.

4. 1980 гг. $\varphi = 10^{16}$ н/см²с

Появление новых типов нейтронных источников на базе ускорителей протонов (например, SNS или проект SNQ /1/). Значительный прогресс микроэлектроники.

В настоящее время общий прогресс науки и техники, особенно вычислительной техники, несомненно проявляется и в области регистрации нейтронов. В данной работе на основе довольно разрозненного литературного материала, опубликованного за последние 5-7 лет, сделана попытка выделить наиболее важные, по мнению автора, особенности и направления развития нейтронных детекторов на последнем этапе ^ж.

2. Особенности регистрации нейтронов.

Нейтронные конверторы

Среди известных элементарных частиц нейтрон выделяется прежде всего отсутствием электрического заряда ($Q_n < 10^{-20} Q_e$), большим временем жизни в свободном состоянии ($T_{1/2} \approx 10,7$ мин) и наличием магнитного момента. Первое существенно ограничивает возможность его регистрации, в то время как второе способствует ей.

Практический интерес для регистрации нейтронов связан в основном с проявлениями сильного взаимодействия нейтрона (различные типы ядерных реакций), в меньшей степени - слабого взаимодействия (например, регистрация протона или электрона при распаде свободного нейтрона) и в ещё меньшей степени - электромагнитного (например, взаимодействие нейтрона с внешним магнитным полем). Из-за отсутствия электрического заряда не используются прямые электромагнитные эффекты (ионизация, переходное и черенковское излучение).

ж) Для ознакомления с принципом работы основных традиционных типов детекторов ионизирующего излучения можно рекомендовать литературу /2,3,4/.

Фактически детектирование нейтронов осуществляется в настоящее время лишь косвенным путём: по регистрации вторичных продуктов, образующихся при взаимодействии нейтрона с ядрами нейтронно-активного вещества детектора.

Несмотря на широкий возможный диапазон регистрируемой энергии нейтронов ($0 \lesssim E_n \lesssim 10^{12}$ эВ), для многих задач прикладного и фундаментального характера используются нейтроны сравнительно низких энергий ($\sim 0,10^8$ эВ) и в основном нейтроны со спектром деления ($\sim 0,10^7$ эВ). На особенностях регистрации таких нейтронов остановимся несколько подробнее.

При взаимодействии с веществом нейтрон может испытывать упругое или неупругое рассеяние на ядрах атомов или в результате электромагнитного взаимодействия спина нейтрона с магнитным моментом оболочечных электронов. Несмотря на большую информативность процессов рассеяния, для регистрации используются только процессы, идущие с достаточно большой передачей энергии; и это, в основном, рассеяние нейтронов с энергией более 0,1 МэВ на ядрах лёгких элементов, особенно на ядрах изотопов водорода или гелия.

Среди ядерных реакций в большей степени важны те, в которых при поглощении нейтронов образуются достаточно энергичные заряженные частицы. Однако в большинстве материалов захват нейтрона приводит или к эмиссии γ -квантов, или к западывающей эмиссии β -частиц. Поэтому в (n, γ)-реакциях остаётся проблема регистрации электрически нейтральной частицы, а возможность регистрации западывающей по отношению к моменту захвата нейтрона β -частицы для многих задач неприемлема. Однако для некоторых ядер, а именно тех, для которых радиационные переходы в возбужденном компаунд-ядре запрещены законами сохранения, переход в основное состояние может идти по каналу передачи энергии от ядра к электронам атомной оболочки (явление внутренней конверсии). В этом случае важно следующее: электроны - заряженные частицы, т.е. сравнительно легко регистрируются и, во-вторых, энергия конверсионных электронов вполне достаточна для их регистрации (например, для ^{157}Bd $0,07 \lesssim E_e \lesssim 0,182$ МэВ). Тем не менее, в большинстве случаев предпочтительны реакции захвата с образованием не электронов, а более тяжелых заряженных частиц, таких, например, как протонов, α -частиц, осколков деления. Эти частицы имеют малые пробеги и легко регистрируются по измерению ионизации атомов тормозящей среды. Детектирование нейтрона начинается с момента его взаимодействия с веществом и образования некоторого количества нейтральных и (или) заряженных частиц. Далее происходят разнообразные процессы превращения самих частиц и изменения их энергии. В связи с этим ре-

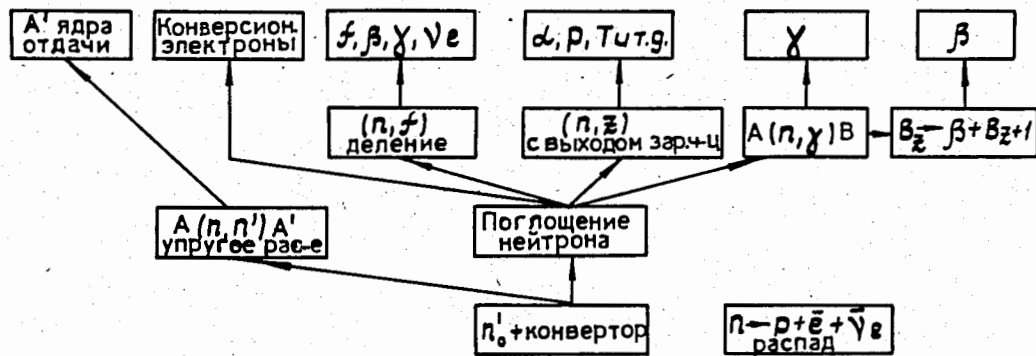


Рис. I. Схемная иллюстрация основных каналов взаимодействия нейтронов с детектором, используемых для регистрации нейтронов.

гистрация нейтрона может осуществляться на различных этапах этого процесса и даже по многоступенчатой схеме, если учесть, что отдельные этапы могут разделяться значительными пространственными и временными промежутками. Термин "нейтронный конвертор" (радиатор, эмиттер) традиционно относится к веществу, в котором произошло взаимодействие нейтрона (поглощение или рассеяние), в результате которого выделилась необходимая для регистрации энергия. На рис. 1 в качестве иллюстрации вышесказанного приведена схема основных каналов взаимодействия нейтронов с веществом, используемых в современных детекторах для регистрации нейтронов сравнительно небольших с энергией ($E_n \lesssim 100$ МэВ).

На практике для детектирования нейтронов используются сравнительно небольшое число "пригодных" типов ядерных реакций и соответственно конверторов. Применение конверторов в принципе позволяет использовать для регистрации нейтронов широкий класс детекторов ионизирующего излучения, например детекторов заряженных частиц и γ -квантов. Однако введение конверторов в рабочую область многих детекторов не всегда возможно или не даёт ожидаемого эффекта. Это обстоятельство существенно ограничивает непосредственное использование детекторов заряженных частиц и γ -квантов в нейтронных измерениях и в то же время стимулирует разработку "чисто" нейтронных детекторов. Тем не менее существующие варианты нейтронных детекторов всегда содержат какой-либо конвертор, который иногда может служить и рабочей средой детектора. Одним из главных факторов, определяющих выбор конвертора, является эффективность (вероятность) регистрации нейтронов. В газовых конверторах (в основном используется газ ${}^3\text{He}$ при $P \lesssim 15$ атм или ${}^{10}\text{BF}_3$ при $P \lesssim 3$ атм) эффективность регистрации нейтронов (ϵ) существенно выше, чем для твердотельных, толщина которых ограничена длиной свободного пробега заряженных частиц (1-15 мкм). На рис. 2 для примера представлена зависимость ϵ для ${}^3\text{He}$ и ${}^{10}\text{BF}_3$ - конверторов от величины X - давление газа (атм) \times толщина (см) \times λ_n (А) ^{15/}. Например, 80%-я эффективность в ${}^3\text{He}$ соответствует $X = 21$ и 30 для ${}^{10}\text{BF}_3$. Для сравнения приведём расчетную эффективность двух твердотельных конверторов ${}^{10}\text{B}$, ${}^6\text{Li}$, широко используемых в современных детекторах ^{15/}:

$$\epsilon = \frac{1}{2} (1 - e^{-\Sigma d}) \left(1 + \frac{1}{\Sigma r}\right) - \frac{d}{2r}, \quad d \geq r,$$

где Σ - макроскопическое сечение поглощения нейтронов,
 d - толщина конвертора. Для $\lambda_n = 1$ А:
 $\epsilon ({}^{10}\text{B}) \approx 3-4\%$ при $d = 3,8 \cdot 10^{-3}$ мм.
 $\epsilon ({}^6\text{Li}) \approx 1\%$ при $d = 10,9 \cdot 10^{-3}$ мм.

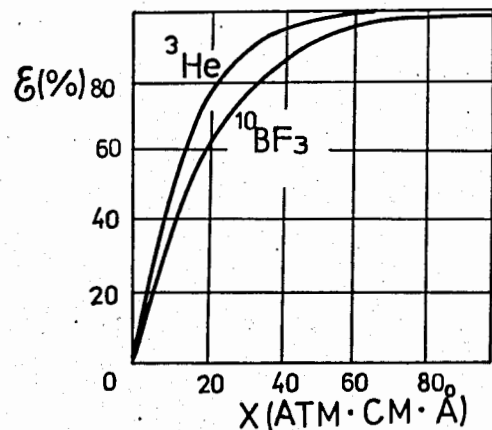


Рис. 2. Эффективность ϵ ${}^3\text{He}$ и ${}^{10}\text{BF}_3$ - газовых конверторов в зависимости от значения X , равного произведению давления газа (атм) на толщину газового слоя (см) и длину волны нейтрона (А) ^{15/}.

Отметим, что эффективность гадолиниевых конверторов ^{16/}:

$$\epsilon = \frac{1}{2} S \Sigma e^{-\alpha d} (1 - e^{-(\Sigma - \alpha)d}) / (\Sigma - \alpha),$$

где α - коэффициент экранировки, S - число конверсионных электронов, испускаемых при единичном захвате нейтрона, значительно больше типичной эффективности твердотельных конверторов и почти сравнима с эффективностью газовых. Так, для величины $\alpha = 2,07 \cdot 10^2 \text{ мм}^{-1}$, определенной в работе ^{17/}, $\epsilon ({}^{157}\text{Gd}) \approx 30\%$ при $\lambda_n = 1$ А. На возможность использования Gd -конверторов обратили внимание еще в 1939 г. ^{18/}, но практические варианты Gd -детекторов (не фотографического типа) появились только в последнее время. Преимущество Gd -конвертора особенно проявляется в позиционно-чувствительных системах, в которых кроме высокой эффективности необходимо обеспечить малые пробеги вторичных заряженных частиц.

При работе детекторов в режиме измерения среднего тока в интенсивных полях нейтронов (при $\phi \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$) большое значение приобретает делящиеся "невыгорающие" двух: ${}^{235}\text{U} - {}^{238}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu} - {}^{238}\text{U}$, ${}^{233}\text{U} - {}^{232}\text{Th}$, ${}^{235}\text{U} - {}^{232}\text{Th}$ и трехкомпонентные ${}^{235}\text{U} - {}^{232}\text{Th} - {}^{238}\text{U}$ конверторы ^{10,11/}. В таких конверторах уменьшение исходного числа атомов делящихся элементов компенсируется образованием по цепочке радиоактивных превращений новых делящихся элементов (за счет захвата ядрами нейтрона и β -распада ядер; ${}^{232}\text{Th} \rightarrow {}^{233}\text{U}$, ${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{Pu}$).

Чувствительность камеры с трехкомпонентным радиатором равна

$$\eta(t) = A \cdot (\sigma_5 N_5 + \sigma_3 N_3 + \sigma_9 N_9),$$

где индекс 5 относится к ^{235}U , а 3 и 9 - к ^{233}U и ^{239}Pu , получающимся из ^{232}Th и ^{238}U , которым соответствуют индексы 2 и 8; t - время. Задача сводится к отысканию таких отношений начальной концентрации ядер $R_2 = N_{02}/N_{05}$ и $R_3 = N_{08}/N_{05}$, при которых $\eta(t)$ наименьшим образом отличается от средней чувствительности

$$\bar{\eta} = \frac{1}{t} \int_0^t \eta(\tau) d\tau.$$

При $\varphi \geq 10^{15}$ н/см²с может быть использована, например, смесь ^{235}U : ^{232}Th : $^{238}\text{U} = 1:48:22$. Полезность таких радиаторов очевидна, но точность расчетов R_2 и R_3 в настоящее время ограничена, а практическая реализация таких конверторов затруднена, почему они и не нашли ещё широкого применения. Кроме того, исходный состав таких радиаторов зависит от спектра нейтронов.

Для детекторов с ^3He -конвертором, имеющим высокое микроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов в реакции $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ (например, при $\lambda_n = 1 \text{ \AA}$ $\sigma_a = 3000$ барн), заметное выгорание ^3He наступает уже при $\varphi \approx 10^9$ н/см²с. Частичная компенсация выгорания ^3He осуществляется "автоматически", поскольку при β -распаде трития $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \beta$ ($T_{1/2} = 12,35$ лет) число атомов ^3He частично восстанавливается, однако для полной компенсации выгорания при заданном φ требуется начальная концентрация трития $N_{^3\text{H}}$, удовлетворяющая соотношению ^{12/}:

$$\frac{N_{\text{He}}}{N_{\text{He}} + N_{^3\text{H}}} = \frac{\lambda}{\lambda + \sigma_a \varphi},$$

где λ - постоянная β -распада ^3H .

Таким образом, число типов нейтронных конверторов постепенно увеличивается, хотя и имеет естественный предел. В то же время характеристики новых конверторов отражают общую тенденцию: полнее реализовать возможности детекторов в интенсивных полях нейтронов и при этом обеспечить высокое пространственное разрешение.

3. Тенденции в развитии традиционных методов регистрации нейтронов

В 1930-50 гг. были разработаны различные типы газоразрядных детекторов, а в 40-70 гг. - сцинтилляционных. В настоящее время эти де-

текторы являются основными приборами любого экспериментатора. Какие же особенности в эволюции этих традиционных детекторов можно отметить в настоящее время?

3.1. Газоразрядные детекторы

К началу 70-х годов использовались нейтронные детекторы, работающие в ионизационном, пропорциональном, гейгеровском, искровом и коронном режимах газового разряда. Стримерный режим газового разряда, достаточно широко применяемый в трековых детекторах заряженных частиц, в нейтронных измерениях практически не используется - для непосредственной регистрации нейтронов существуют более простые, надёжные и более удобные детекторы. Однако в специальных задачах, например в задаче спектрометрии вторичных продуктов и исследовании редких реакций с нейтронами, стримерные детекторы, как показано в работе ^{13/}, могут успешно конкурировать с другими детекторами.

С повышением быстродействия малошумящей микроэлектроники наибольшее распространение получили детекторы, работающие в ионизационном и пропорциональном режимах. Они обеспечивают скорость счета до $\sim 10^7$ имп/с, хорошее энергетическое разрешение для вторичных заряженных частиц $\lesssim 5\%$ и достаточную для надёжной регистрации нейтронов амплитуду сигналов. Большое преимущество дают их относительная простота и надёжность.

3.1.1. Газовые детекторы в ионизационном режиме

Рассмотрим возможные пути совершенствования этих детекторов. В настоящее время признано, что для оптимального использования ионизационных детекторов необходимо достаточно большое давление газа и малые межэлектродные расстояния ^{*)}. Эти выводы можно получить непосредственно из известных работ Боуга ^{14/} и Лапслей ^{15/}. На практике эти условия обычно легко реализуются (особенно при регистрации осколков деления, у которых $dE_f/dx \sim v$, где v - скорость осколка). Таким образом, в качестве основного оптимизирующего параметра детектора остаётся изменение состава газовой смеси. Необходим электроположительный состав высокой электрической прочности с высокой скоростью дрейфа электронов и малым атомным номером (последнее необходимо для уменьшения чувствительности к γ -фону). В настоящее время наиболее перспективной смесью для детекторов с твердотельным

^{*)} В случае регистрации потока нейтронов. Для спектрометрии вторичных заряженных частиц критерии выбора оптимальных параметров детектора иные.

ещё возможность использования чисто электронной компоненты тока, которая согласно /25/, может достигать ~10% всего тока при длительности $\lesssim 10^{-9}$ с. Однако для многих задач, решаемых с помощью пропорциональных детекторов, такое быстрое действие обычно не требуется, т.к. неопределённость момента появления самого импульса составляет 0,2-10 мкс и более (она определяется временем дрейфа первичных электронов к аноду). Тем не менее продолжается поиск оптимальных, еще более "быстрых" газовых смесей /17/ и новых конструктивных решений.

Примером нетрадиционного подхода к конструкции счетчика может служить многопроволочный диэлектрический детектор, предложенный в работе /26/, который при наличии конвертора может использоваться и как нейтронный детектор. Принцип его работы показан на рис. 3. Пространство между мелкоструктурной сеткой (катодом) и параллельным ей анодом заполнено пористым диэлектриком из CSJ с плотностью $I-2\%$ от плотности монокристалла. Образованные в диэлектрике при взаимодействии с ним первичной заряженной частицы δ -электроны ускоряются в порах и, сталкиваясь со стенками пор, вызывают вторичную электронную эмиссию. Если коэффициент эмиссии больше единицы, достигается размножение электронов. Недостаток - стабильная работа возможна только при периодической подаче деполаризующего обратного напряжения.

Наиболее существенные достижения в развитии пропорциональных детекторов получены в физике высоких энергий. Например, в проектах детекторов /27,28/ число информационных проволочек достигает ~200 000, а площадь пропорциональных камер ~6000 м². В нейтронной физике, по традиции занимающейся нейтронами сравнительно "небольших" энергий

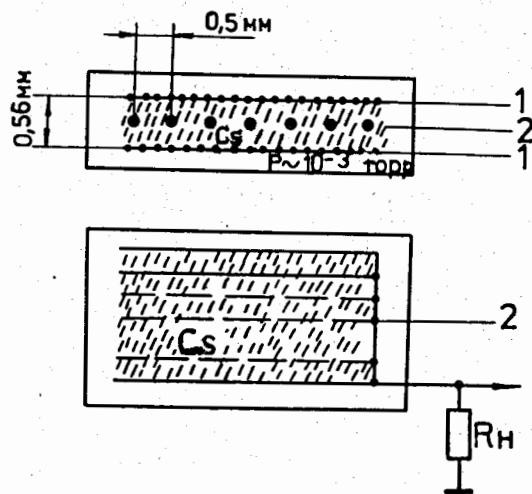


Рис. 3. Принципиальное устройство многопроволочного диэлектрического детектора /26/. 1 - катод, 2 - анод, $S = 2 \times 4 \text{ мм}^2$.

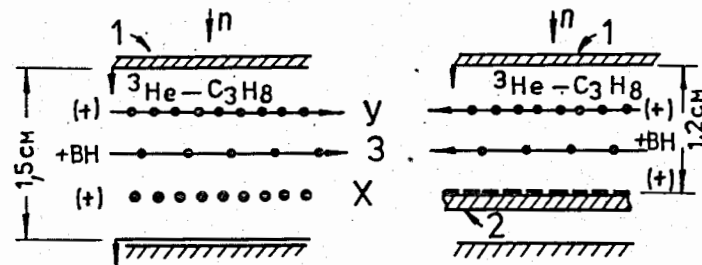


Рис. 4. Пример конфигураций электродов двух пропорциональных камер /5/: а) $18 \times 18 \text{ см}^2$, б) $50 \times 50 \text{ см}^2$.

1 - входное окно, 2 - стеклопластик, 3 - анод.

Разрешающая способность по координате равна 1,30 мм.

($E_n \lesssim 150 \text{ МэВ}$), классические ортогональные пропорциональные камеры не нашли широкого применения, хотя иногда и используются /5,29/. Некоторые варианты таких камер схематически приведены на рис. 4. В большинстве случаев, например при изучении дифракции нейтронов, а также в развивающейся области нейтронной томографии, необходимы детекторы типа "банан" или выполненные в полярной (χ, Θ) или сферической (Θ, Ψ) геометриях /5/. Ограничивающим фактором в разработке таких детекторов явилась сложность их геометрии и более сложная по сравнению с аналогичными детекторами заряженных частиц технология изготовления. В этой ситуации представляется важным результат работы /30/ по созданию детектора с анодной нитью, укрепленной непосредственно на поверхности изолятора. Открываются возможности создания пропорциональных детекторов практически любого профиля. При этом существенно повышается надёжность и технологичность такого детектора.

Расширение сферы практического применения нейтронов стимулирует разработку и исследование пропорциональных детекторов, работающих в широком диапазоне температур (от криогенных до $+150^\circ\text{C}$ /31/). Таким образом, в задаче регистрации нейтронов возможности пропорциональных детекторов далеко ещё не исчерпаны.

3.1.3. Новые типы газоразрядных детекторов

В последнее время большое значение приобретает уменьшение материальных затрат и времени, необходимых на подготовку и проведение эксперимента. Эффективность экспериментальных работ существенно повышается при использовании систем логически и функционально унифициро-

ванных приборов. Использование унифицированной системы детекторов может дать выигрыш, аналогичный применению системы КАМАК в измерительной технике. Первым шагом в этом направлении можно считать создание стримерных трубок /32,33,34/. Самогасящийся стримерный разряд был интерпретирован еще в 1937 г. /35/, но детально исследован лишь в 1969-1978 гг. /36,37/. В настоящее время он принят как еще один режим газоразрядного детектора (СГС-режим). В СГС-режиме катодонаправленные стримеры, возникающие в электроотрицательном газе, распространяются вдоль силовых линий поля и, попадая в область слабого поля вблизи катода, гасятся. Работающие в СГС-режиме счётчики (стримерные трубки) просты в изготовлении, имеют высокую стабильность, допускают любую конфигурацию катода (при постоянном сечении), позволяют на 30% уменьшить стоимость электроники и отделить элемент считывания от высоковольтной зоны, т.е. достаточно просто реализовать позиционно-чувствительный режим. Выделим главные характеристики такого счётчика:

- ток на 2 порядка выше, чем в пропорциональном режиме (10^{-3} А),
- скорость счета $3 \cdot 10^6$ имп/с,
- длительность импульса 20+200 нс,
- независимость тока от первичной ионизации.

Типичная конструкция счётчика представлена на рис. 5. Внутри полихлоридной или металлической трубки прямоугольного или иного сечения (9×9 мм²) натягивается толстая анодная нить (ρ 50-100 мкм)/28,32/. Внутренняя часть трубки покрывается резистивной краской, а считывающие электроды, они могут быть любой конфигурации, располагаются на одной из внешних сторон. Из отдельных трубок собираются детекторы большой площади. Если СГС-режим в будущем удастся реализовать с нитью,

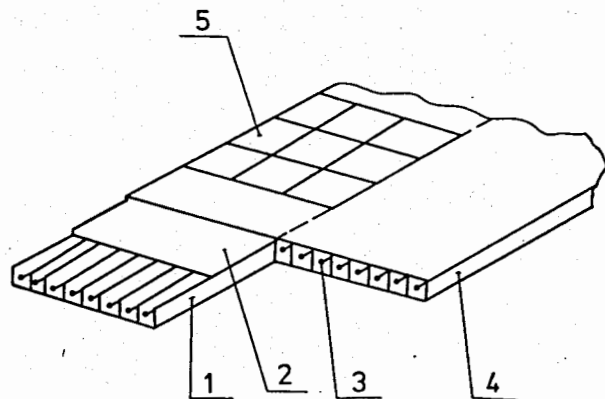


Рис. 5. Схематическое изображение стримерной трубки /34/.

1 - профиль, 2 - крышка, 3 - анодная проволока, 4 - контейнер, 5 - внешний электрод.

укреплённой на трубке (как это уже сделано для пропорционального режима /30/), тогда откроются уникальные возможности в создании простых детекторов самой сложной конфигурации.

Стримерные трубки - детекторы заряженных частиц. В их составе, так же, как и в составе используемых в них газовых смесей, отсутствуют "пригодные" нейтронно-активные элементы, а обычные фольговые конверторы имеют малую эффективность. Вероятным претендентом на конвертор стримерных трубок может быть, например, Gd ($\epsilon \sim 30\%$), если учесть, что ток стримера не зависит от начальной ионизации.

Другой интересный тип детектора заряженных частиц и γ -квантов, так называемые дрейфовые безэлектродные камеры (или дрейфовые трубки) /38/, может быть использован и для регистрации нейтронов. Достоинство этих детекторов состоит в возможности пространственно разделить область взаимодействия нейтрона от области детектирования вторичных частиц, т.е. вынести за пределы нейтронного пучка основную часть детектора. Геометрия такой камеры показана на рис. 6. В основном пространстве камеры между заземлённым катодом (пластина) и высоковольтным анодом (проволочка) создаётся дрейфовая область с однородным электрическим полем ($E_{др} \approx 200$ В/см). Распределение поля, близкое к идеальному, для которого силовые линии направлены коллинеарным "пучком"

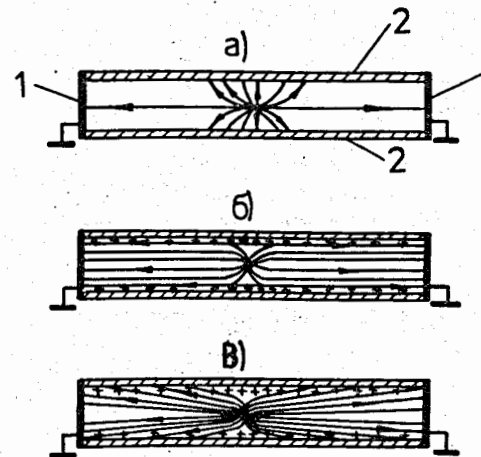


Рис. 6. Поперечное сечение безэлектродной дрейфовой камеры /38/.

а) Начальное распределение электрического поля.

б) Стационарная конфигурация электрического поля при идеальном диэлектрике.

в) Стационарное распределение электрического поля для реального диэлектрика (с небольшой проводимостью).

1 - катод, 2 - корпус из диэлектрического материала. Анодная проволока (в центре камеры) перпендикулярна плоскости рисунка.

вдоль стенок камерн независимо от конфигурации стенок, достигается за счет саморегулируемого и самостабилизирующегося процесса перераспределения положительных ионов газа, оседающих на поверхности диэлектрических стенок камерн. Свободные положительные ионы образуются в газе за счет его ионизации естественным фоном космического излучения или путём введения в дрейфовую область слабого радиоактивного источника. При прохождении в дрейфовой области ионизирующей частицы свободные электроны дрейфуют ($v_{др} \approx 40$ мм/мкс) к области газового усиления вблизи анода ($E_a \approx 8,6 \cdot 10^4$ В/см) и регистрируются, как в обычном пропорциональном счётчике.

В настоящее время принцип дрейфовой трубки пока ещё не нашёл приемлемой практической реализации в устройствах регистрации нейтронов, но может быть использован в некоторых прикладных задачах, например, в медицине, биологии. Для повншения скорости счета с газоразрядного детектора, что особенно важно при работе с импульсными источниками нейтронов, может быть использована конструкция плоского лавинного счетчика — две параллельные плоские металлических пластин, заполненные смесью Ar с 5% ацетона при атмосферном давлении ^{/39/}. В таком счетчике при межэлектродном расстоянии 6 мм достигается высокое быстродействие 10 нс, а величина газового усиления составляет $10^3 + 10^4$. При наличии соответствующего конвертора детектор такого типа может быть использован и для регистрации нейтронов.

У всех детекторов, краткое описание которых приведено в данном разделе, есть отдельные несомненные преимущества, существенно расширяющие возможности регистрации не только заряженных частиц или γ -квантов, но и нейтронов. Однако в последнем случае необходимы дополнительные исследования.

3.2. Сцинтилляционные детекторы

Сцинтилляционные детекторы (СД) относятся к классу так называемых комбинированных приборов, которые традиционно состоят из двух отдельных элементов: сцинтиллятора и фоточувствительного приёмника. В принципе вторым элементом может быть любое устройство, характеристики которого изменяются под воздействием света: ФЭУ, электронно-оптический преобразователь, полупроводниковые детекторы с p-n-переходом, поверхностно-барьерный детектор, p-i-n-детектор, фоторезистор, микроканальные пластины и т.д.

С развитием полупроводниковой техники полупроводниковые фотоприёмники начинают повсеместно вытеснять ФЭУ. При этом значительно уменьшаются габариты детекторов и отпадает необходимость использования вы-

соковольтной системы питания. Эти факторы позволяют создать удобные в обращении многоэлементные детекторные системы. Кроме того, современная технология позволяет сконструировать сцинтиллятор и фотоприёмник в одном интегральном приборе размером от нескольких микрон до десятков сантиметров. Однако по традиции СД воспринимаются именно как сцинтиллятор плюс ФЭУ, а полупроводниковые сцинтилляционные устройства относят к отдельному классу детекторов. Конечно, эта классификация довольно условна, поскольку уже существуют полупроводниковые сцинтилляторы ^{/40/}.

В данном разделе по традиции рассматривается современное состояние приборов типа сцинтиллятор + ФЭУ.

Основные преимущества ФЭУ (высокий коэффициент усиления электронов 10^7 при малом времени их собирания на анод $10^{-8} + 10^{-10}$ с) наиболее эффективно реализуются только с органическими сцинтилляторами, имеющими малый световыход и быструю компоненту высвечивания с $\tau \sim 10^{-10} + 10^{-9}$ с. Дальнейшее улучшение указанных характеристик ФЭУ, по-видимому, имеет предел, и современные разработки направлены прежде всего на удобства использования ФЭУ: прямоугольное сечение, встроенный делитель, раздельная система динодов и анода, встроенная интегральная схема предварительной электроники ^{/41,42/}. Кроме того, в однокаскадном варианте (без усиления) возможно создание ФЭУ с анодами произвольной формы большой площади 50×50 см ^{/43/} (такая разновидность ФЭУ получила название вакуумный фотодиод).

В последнее время ФЭУ нашли широкое применение в позиционно-чувствительных детекторах, построенных на основе различных принципов кодирования координат, в том числе, например, и по времени прохождения света в сцинтилляторе ^{/41/}. Отмеченные характеристики ФЭУ делают их пока незаменимым прибором при использовании пластических сцинтилляторов больших размеров (100×200 см²) ^{/41,44/}. Одновременно оптимизируются различные характеристики сцинтилляционных детекторов в различных вариантах исполнения сцинтиллятора и ФЭУ. Например, детектор нейтронов с энергией 5 кэВ + 1 МэВ по протонам отдачи ($\xi = 0,7$ для $E_n = 0,1$ МэВ и $\xi \approx 0,04$ для $E_n = 2$ кэВ ^{/45/}) или детектор нейтронов деления на гранулированной сцинтиллирующей смеси ZnS + люцит с $\xi \approx 0,1\%$ ^{/46/}. Продолжаются исследования свойств и традиционных сцинтилляторов, например NaJ, в различных условиях эксплуатации ^{/47/}, а также поиск новых типов сцинтилляторов.

Интерес в этом направлении представляет применение неорганических кристаллов высокой плотности с большим атомным номером для регистрации нейтронов по (n, γ) реакциям. Это фтористый барий (BaF_2) ^{/48/}, германат висмута ($Bi_4Ge_3O_{12}$), часто используется сокращенное обозначение "BGO" ^{/49/} и $CaWO_4$. Появился также новый интерес

к применению литиевых стёкол с Ce^{3+} -активаторами ($\epsilon = 80\%$ при $d = 2$ мм для $E_n = 0,025$ эВ) с быстрой компонентой высвечивания, равной 56 нс, и малым пробегом вторичных заряженных частиц ^{150/}. Отмеченные свойства литиевых стёкол в принципе позволяют при использовании их в позиционно-чувствительных устройствах получить высокое пространственное разрешение (мкм). Полезным оказалась слабая зависимость световыхода таких стёкол от температуры (изменяется на 7% при повышении температуры от комнатной до 550°C). Хотя "новые" неорганические сцинтилляторы имеют малый световыход (10% от NaJ ^{151/}), они, в отличие от NaJ , негигроскопичны и удобны в обработке. Для широкого класса позиционно-чувствительных детекторов наилучшим кристаллом остаётся ${}^6\text{LiJ}$, с использованием которого место попадания нейтрона можно определить с погрешностью 0,5 мм.

4. Полупроводниковые детекторы

Для детектирования нейтронов полупроводниковые детекторы (ПД) используют ограниченно. В основном это связано с низкой эффективностью применяемых конверторов ($\lesssim 4\%$), малыми размерами ($\sim \text{см}^2$) и низкой радиационной стойкостью (предельный флюенс составляет $10^8 - 10^{14}$ частиц/ см^2). С другой стороны, ПД имеют ряд неоспоримых достоинств: на порядок меньшую, чем для газов, энергию ионизации (1,5-4 эВ), высокую подвижность электронов (100-3900 $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), хорошее энергетическое разрешение ($\sim \text{кэВ}$), а также удобство в обращении и возможность интегрального исполнения совместно с детекторной электроникой ^{152,53/}. Малые размеры детекторов в последнее время становятся не столь существенным фактором, поскольку можно создать развитую мозаичную структуру при любой геометрии, а с другой стороны, технология изготовления ПД позволяет в настоящее время иметь детекторы размером 8-13 см ^{154/}. Низкая эффективность твердотельных конверторов, используемых обычно совместно с ПД, существенно повышается в так называемой "сэндвичевой" структуре ПД с эпитаксиальным слоем p-n перехода. Однако радиационная стойкость по-прежнему остаётся основным сдерживающим фактором широкого применения ПД. В дополнение к Be - и Si -детекторам в последнее время появились новые полупроводниковые материалы, в которых удачно сочетаются полезные полупроводниковые свойства с высокой поглощающей способностью к γ -квантам или к нейтронам. Это теллурид кадмия CdTe , диодид ртути HgI_2 , а также новые полимерные полупроводники ^{155,56/}. Первые за счет высокой плотности и большого атомного номера являются наиболее перспективными ПД нейтронов по (n, γ) реакциям. Кроме того, они технологичны и могут ра-

ботать при комнатной температуре. Для сравнения приведём эффективность этих детекторов для γ -квантов с энергией 320 кэВ ^{157/}:

$d = 0,5$ мм	HgI_2	- 6%
$d = 1,5$ мм	CdTe	- 12%

В диапазоне энергий рентгеновского излучения ($E_\gamma \lesssim 125$ кэВ) эффективность HgI_2 и CdTe составляет $\sim 80\%$ уже при толщине ~ 1 мм ^{157/}. Открытие и исследование в 1979-80 гг. полупроводниковых полимеров привело к созданию т.н. композитных детекторов с высокой чувствительностью к тепловым нейтронам ^{158/}. Такой детектор представляет собой тонкий нейтронно-активный слой (например, ${}^6\text{Li}$ или ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$), с двух сторон покрытый полупроводниковой полимерной плёнкой $(\text{CH})_x$ с проводимостью p-типа. За счет действия выпрямляющего потенциала, возникающего в зоне контакта ${}^6\text{Li}$ с $(\text{CH})_x$, в тонком слое полимера образуется область, обеднённая основными носителями - чувствительный слой (см. рис. 7). Такая структура эквивалентна стандартному диодному детектору. Толщина отдельного детектора 0,1-0,3 мм. Сборка из 3-х детекторов толщиной 1 мм поглощает 85% тепловых нейтронов. Набор таких детекторов толщиной в несколько сантиметров открывает интересные возможности непосредственного наблюдения процесса замедления, диффузии и захвата нейтронов в водородосодержащей среде детектора (по регистрации спектров протонов отдачи с отдельных детекторов).

Интересно, что отличительные свойства такого нейтронного детектора явно противоречат сложившемуся представлению о полупроводниковых детекторах вообще:

- 1) высокая чувствительность на единицу объёма,
- 2) малый вес,
- 3) большая поверхность,
- 4) малая стоимость.

Из числа других полупроводниковых материалов, нашедших в последнее время применение в сцинтилляционных полупроводниковых детекторах, нужно отметить GaAs . На основе GaAs , например, создан интегральный вариант детектора (сцинтиллятор + фотодиод) с возможностью работы без внешнего источника питания ^{140/}.

Совершенствование технологии изготовления полупроводниковой микроэлектроники способствует развитию интегральных микродетекторов, сочетающих в себе детектор и электронные схемы обработки детекторных сигналов, а в некоторых случаях индивидуальную микро-ЭВМ или устройство сопряжения с внешней ЭВМ. Преимущество таких детекторов, пока разрабатываемых только для регистрации заряженных частиц или

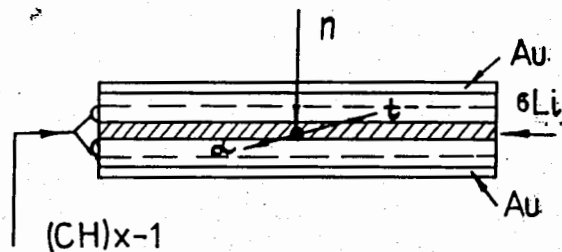


Рис. 7. Принципиальное устройство полупроводникового полимерного детектора с ${}^6\text{Li}$ -конвертором ${}^{58}/$. I - активная область. Толщина детектора - 0,3 мм.

γ -квантов, состоит в следующем:

- 1) компактность (всё в одной интегральной схеме),
- 2) высокое отношение сигнал/шум (в основном из-за малой длины соединительных линий),
- 3) малая стоимость,
- 4) возможность простым путем реализовать большую детекторную поверхность,
- 5) сокращение времени на подготовку, проведение эксперимента и обработку данных (детектор подключается к ЭВМ или непосредственно к дисплею).

Из работ, ведущихся в этом направлении, можно назвать массив 200x200 интегральных γ -детекторов с индивидуальными схемами считывания сигналов. Характерные размеры кристалла: $S = 50 \text{ нм}^2$, $d = 300 \text{ нм}$, а $\Delta E_\gamma/E_\gamma = 1\%$ при $E_\gamma \geq 10 \text{ кэВ}$ ${}^{59}/$. Аналогичного типа приборы опубликованы в работе ${}^{53}/$. Комбинация CoTe -детектора с батарейной ЭВМ ($28 \times 28 \times 8 \text{ мм}^3$, $t_{\text{рад}} = 100 \text{ ч}$) уже используется в дозиметрии в режиме реального времени ${}^{52}/$. Из нейтронных детекторов, близких по типу к вышеописанным, можно отметить интегрированный $dE-E-\beta i$ -детектор с полиэтиленовым радиатором для измерения спектра быстрых нейтронов ${}^{60}/$. Энергия нейтрона E_n вычисляется во внешней ЭВМ по формуле

$$E_n = E_p / \cos^2 \theta = [E + \Delta E (\nu/2S + 1 + Y/S)] \times \Delta E^2 / [S \cdot (dE/dx)]^2,$$

где E , ΔE - выходные сигналы счетчиков, ν , S - соответственно толщина радиатора и ΔE - счетчика, Y - толщина мертвого слоя, dE/dx - табличное изменение энергии в ΔE - счетчике.

Совершенно новым для регистрации заряженных частиц является использование в $p-i-n$ диодах эффекта запоминания заряда при криогенной температуре (4,2 К) ${}^{61}/$. Открытый в 1978 г. ${}^{62}/$ эффект заключается в том, что заряд в треке ионизирующей частицы запоминается с временем удержания $\sim 10^5 \text{ с}$, но легко "стряхивается" за время $\sim 10^{-12} \text{ с}$ при приложении обратного напряжения, т.е. диод может работать и как детектор и как элемент памяти. Массив из таких детекторов, в принципе, есть интегральный вариант позиционно-чувствительного детектора, обладающего "памятью".

Приведенные примеры отражают лишь небольшую часть наиболее интересных сторон в развитии ПД. Тем не менее, непосредственное применение ПД в нейтронных измерениях осуществляется еще довольно слабо.

5. Детекторы для измерения интенсивных нейтронных полей

В силу специфических особенностей этих детекторов рассмотрим их отдельно. Широкое применение они нашли в реакторной технике и при измерении импульсных полей нейтронов. Данная группа детекторов развивается в двух направлениях: повышение надёжности в условиях активной зоны ядерного реактора и повышение быстродействия. Интерес вызывает некоторые из последних достижений:

- 1) Нейтронный детектор с твердым диэлектриком между электродами (другие названия: коллектор, эмиссионный детектор, детектор прямой зарядки (ДПЗ)),
- 2) Детектор с вакуумированным промежутком между электродами с внешним источником питания (детектор вторичной эмиссии или вакуумная камера) и без внешнего источника питания (эмиссионный детектор или вакуумный детектор прямой зарядки).
- 3) Детектор с водородосодержащим рассеивателем.

Принцип работы ДПЗ внешне прост: создание направленного к коллектору тока электронов, генерированных при (n, γ) -поглощении нейтронов в материале эмиттера ${}^{63}/$. Хотя детекторы такого типа позволяют использовать "мгновенную" комптоновскую (n, γ) -компоненту электронного тока, наибольшее распространение получили ДПЗ с регистрацией активационной компоненты, обусловленной β -распадом дочерних элементов (n, γ) -реакций (ДПЗ с Rh , Ag , Pt -эмиттерами). При использовании частотных корректоров, компенсирующих

экспоненциальную реакцию тока ДПЗ на захват нейтрона, быстродействие ДПЗ повышается до $\sim 1 \text{ с} / 64$. Чувствительность к тепловым нейтронам, оптимизированная в кабельной геометрии детектора при $\phi \approx 1 \text{ мм}$, составляет $(4+20)10^{-20} \text{ А} \cdot \text{см}^2 / \text{нейтр. на 1 метр длины}$. По-видимому, указанные выше характеристики являются предельными для ДПЗ эмиссионного типа. Совершенствование ДПЗ имеет чисто технический аспект, направленный прежде всего на оптимизацию геометрии и технологию изготовления.

Из числа вакуумных детекторов известны вакуумные камеры деления (ВКД) /65/, работающие в режиме измерения среднего тока. Электрический сигнал формируется от электронов вторичной эмиссии, "выбиваемых" осколками деления из вещества конвертора. Несмотря на кажущуюся простоту детектора, возможность регистрации нейтронов в нём до последнего времени была не совсем очевидной. Дело в том, что при наличии

γ -фона, который всегда присутствует в реакторном излучении, χ -ток от электрон-электронной эмиссии (Э-Э) конкурирует с нейтронным током от (Э-Э) и ионно-электронной эмиссии. Поэтому конструкция нейтронного вакуумного детектора выработалась только в последнее время после многих теоретических и экспериментальных исследований. Достаточно сказать, что в ВКД основной фактор токообразования включает широкий круг физических явлений: распыление материала мишени, электронную и ионную эмиссию, процессы адсорбции и десорбции и т.д. Типичная чувствительность современных ВКД к тепловым нейтронам - $10^{-17} - 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{см}^2 / \text{нейтр.}$ Тот факт, что основную роль в токообразовании играют медленные электроны ($\text{с } E \lesssim 50 \text{ эВ}$) даёт интересные возможности регулировки тока детектора. Отметим три направления в ооздании ВКД с регулируемой чувствительностью:

- 1) введение дополнительных управляющих электродов,
- 2) регулировка чувствительности путём изменения внешнего магнитного поля,
- 3) сочетание ВКД с вторичным электронным умножителем (ВЭУ).

В первом случае используется сходство характеристик детектора - триода (тетрода, пентода) с соответствующей электронной лампой. Это позволяет использовать ВКД в качестве активного элемента устройств типа усилителя или генератора. При этом ВКД сохраняет своё главное свойство - пропорциональность выходного сигнала плотности потока нейтронов. Во втором случае используются особенности движения электронов во взаимно перпендикулярных магнитном и электрическом полях. Например, в цилиндрическом ВКД, помещённом в соленоид при определенной величине магнитной индукции B , циркуляция электронов эмиссии может стать меньше расстояния между электродами, и средний ток будет равен нулю. Таким образом, подбором B изменяется ток, а сам управляющий элемент (соленоид) вынесен за пределы детектора.

В некоторых задачах для повышения чувствительности ВКД эмиссионные электроны размножаются в ВЭУ (вторичном электронном умножителе), который выполняет функции коллектора и усилителя с коэффициентом умножения 10^5 и более. По быстродействию все вакуумные детекторы превосходят газонаполненные и успешно конкурируют со сцинтилляционными (время собирания электронов в них составляет $1+10 \text{ нс}$), а ВКД + ВЭУ могут использоваться также и в счетном режиме. Таким образом, последовательный переход от нейтронных ионизационных детекторов к вакуумным и далее к ВЭУ или ФЭУ практически замыкается на некотором варианте гибридного детектора. Эмиссионная способность этих детекторов слабо зависит от углового распределения падающих на детектор нейтронов: анизотропия нейтронного поля в данном случае сказывается только на некотором изменении эффективности детектора.

В детекторах же с водородосодержащим рассеивателем /66,67/ появление тока возможно именно при наличии угловой анизотропии нейтронного поля. Ток нейтронов создает в водородосодержащем конверторе протонный "ветер" (см. рис. 8). Коэффициент пропорциональности составляет $6 \cdot 10^{-23} + 2 \cdot 10^{-22} \text{ Кл/нейтр.}$ Подбор нагрузочных сопротивлений позволяет скомпенсировать электронную компоненту от γ -квантов /67/. В данном случае используется различие в угловом распределении электронов, генерированных γ -квантами, и протонов отдачи от упругого рассеяния нейтронов на водороде.

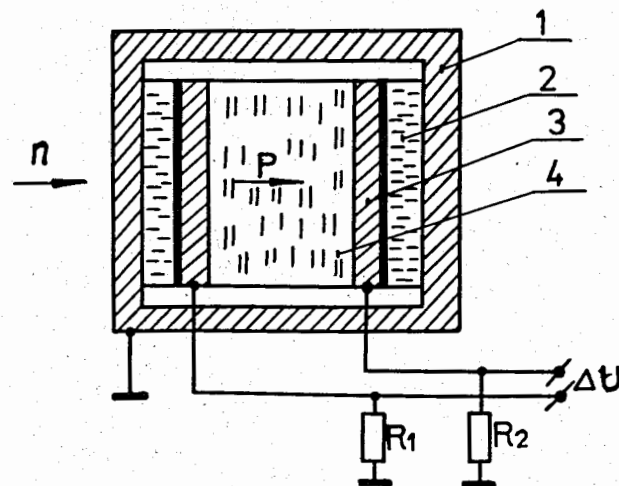


Рис. 8. Принципиальное устройство детектора с водородосодержащим конвертором /66/. 1 - алюминиевый корпус, 2 - тефлоновый изолятор, 3 - алюминиевые электроды, 4 - полиэтилен толщиной 0,3 мм.

6. Позиционно-чувствительные детекторы (ПЧД)

ПЧД включают различные детекторы, регистрирующие координату взаимодействия нейтрона в детекторе. Основная область применения – нейтронная радиография, томография и исследование структуры вещества с помощью рассеяния нейтронов. Интерес к ПЧД за последние 5–7 лет значительно вырос. Многие создающиеся детекторы становятся более универсальными и, как правило, имеют позиционно-чувствительный режим. Нейтронный ПЧД регистрирует не координату отдельного столкновения нейтрона с веществом детектора, а только координату центра тяжести ионизации, т.е. поглощенной в детекторе энергии вторичных частиц. Поэтому любой ПЧД имеет принципиальную погрешность (см. рис.9), величина которой зависит от dE/dx вторичных частиц.

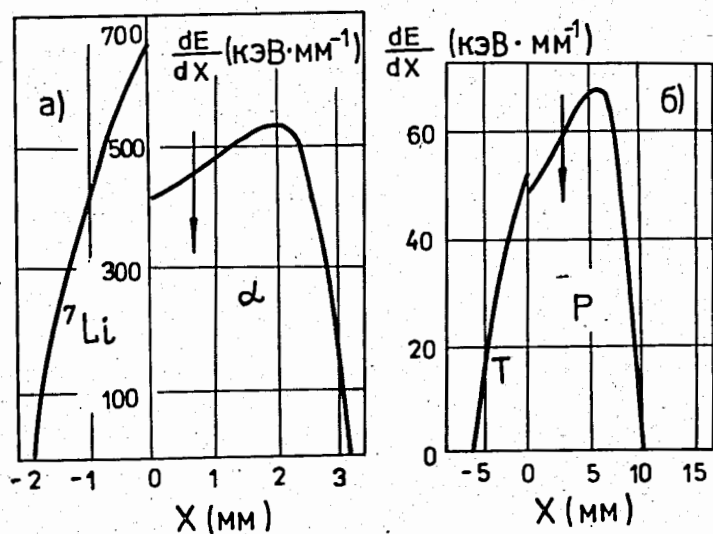


Рис. 9. Удельные потери энергии заряженных частиц dE/dx как функция расстояния от точки взаимодействия нейтронов (x)^{1/5}.
 а) ${}^7\text{Li}$ и α -частицы в BF_3 при атмосферном давлении,
 б) протон (p) и тритон (T) от реакции ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$ в смеси ${}^3\text{He} + 35\% \text{CF}_4$ при атмосферном давлении.
 Стрелками отмечено положение центра тяжести ионизации.

Несомненно, что прогресс ПЧД связан с появлением быстрой и точной аналоговой и дискретной микроэлектроники, особенно специализированных микропроцессоров и ЭВМ, используемых для предварительной обработки информации. Всё многообразие ПЧД основано всего на трех методах кодирования координат, которым соответствует аналогичный тип декодирующей электроники: дискретный, аналоговый и фотографический. В "чистом" виде первый тип представляет собой, например, массив отдельных счетчиков, газовую мультиэлектродную систему или однокристалльное полупроводниковое устройство с массивом изолированных p-n переходов. Во втором – два или более чувствительных элемента детектируют результат захвата нейтрона и выдают аналоговые сигналы, по которым определяется координата. Различные комбинации этих методов позволяют сочетать их выгодные свойства и создавать детекторы с самыми разнообразными характеристиками. Как правило, нейтронные ПЧД имеют соответствующие позиционно-чувствительные аналоги для регистрации заряженных частиц или γ -квантов.

Большинство новых разработок нейтронных ПЧД отличается от прежних вариантов более высоким пространственным (ΔX) или временным (Δt) разрешением, более развитой чувствительной поверхностью, повышенной надёжностью и удобством в обращении, повышенной эффективностью и лучшей дискриминацией γ -фона, более гибкой возможностью использования детектора на линии с ЭВМ. Типичная величина пространственного разрешения нейтронных ПЧД находится в миллиметровой области. Для достижения субмиллиметрового диапазона (что особенно необходимо, например, в широкой области нейтронной радиографии) обычно, независимо от типа самого детектора, необходим твердотельный конвертор, выполненный, например, на основе Gd, ${}^{235}\text{U}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{239}\text{Pu}$ и т.д. Это в значительной степени снижает неопределённость ΔX , обусловленную пробегом вторичных заряженных частиц. Однако при использовании твердотельного конвертора, особенно в газонаполненных детекторах, существует общая проблема исключения влияния на величину ΔX разброса в ориентации треков и разброса в длине пробега вторичных заряженных частиц при прохождении ими чувствительного объёма детектора.

Для широкого класса газонаполненных ПЧД приоритет в выборе того или иного типа детектора во многом зависит от решения именно данной задачи. Ниже, на примере некоторых новых детекторов, отметим основные направления в развитии современных нейтронных ПЧД. Большинство современных газонаполненных ПЧД в той или иной степени являются вариациями многопроводочных пропорциональных или дрейфовых камер, мультidetекторных ионизационных камер и различных счетчиков с высокоомным электродом или с электродом, выполненным в виде линии задержки. Такие детекторы подробно описаны, например, в литературе 74, 68, 69, 70 и

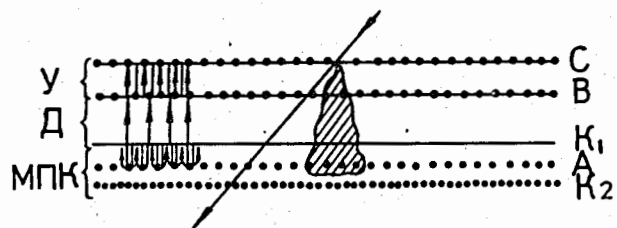


Рис. 10. Схематическое изображение многоступенчатой лавинной камеры низкого давления ^{/71/}. С, В – сеточные электроды, К₁, К₂, А – катоды и анод многопроводочной пропорциональной камеры МПК, У, Д – предусилительный и соответственно дрейфовый промежутки.

здесь не рассматриваются. Отметим только, что технология изготовления таких детекторов для регистрации нейтронов значительно сложнее технологии изготовления аналогичных детекторов заряженных частиц.

Интересный тип нового газонаполненного ПЧД – многоступенчатая лавинная камера низкого давления (МЛК) ^{/71/}. Такой детектор при пространственном разрешении $\sim 0,5$ мм позволяет обеспечить высокий коэффициент газового усиления $((5+6)10^6)$ и тем самым приблизиться к режиму одноэлектронного детектирования ^{/72/}. Для сравнения отметим, что коэффициент усиления пропорциональных камер обычно не превышает $\sim 10^4$ ^{/73/}. Принципиальная конструкция МЛК приведена на рис. 10. В камере, заполненной чистыми углеводородами (метан, изобутан и др.), при давлении 6 торр, выделены три области: промежутков предварительного усиления (У), дрейфовая область (Д) и область многопроводочной пропорциональной камеры (МПК). В отличие от соответствующей камеры, работающей при нормальном давлении, газовое усиление в МПК осуществляется по двухступенчатой схеме: сначала в однородном поле, а затем вблизи анодных проводочек. Координатная информация снимается с катодов с помощью линии задержки. Пространственная привязка осуществляется по вершине экспоненциальной лавины электронов к точке вылета заряженной частицы в предусилительный промежуток. При наличии твердотельного конвертора МЛК могут быть использованы в двумерных нейтронных позиционно-чувствительных системах большой площади

Сравнимые с параметрами нейтронных МЛК могут иметь и дрейфовые нейтронные камеры (одна из разработок описана в ^{/74/}). Но при высоком пространственном разрешении (0,3 мм) дрейфовые нейтронные камеры ориентированы на работу совместно с ЭВМ, поэтому по быстродействию существенно уступают МЛК и пропорциональным камерам.

При использовании сцинтилляционных детекторов в мультidetекторном направлении развития нейтронных ПЧД выделились оригинальные детекторы с оптической кодировкой координаты ^{/75,76/}. В литературе эти ПЧД известны еще с 1973 г. ^{/76/} как нейтронные камеры Энгера ^{*} (Anger-Camera; Anger-type neutron-position detector). Однако, несмотря на сравнительно давнюю историю, такие детекторы стали интенсивно развиваться начиная только с 1981 г. ^{/77/}.

Сцинтилляционная вспышка, проходя через дисперсную оптическую среду, "размазывается" по всем (или многим) ФЭУ (см. рис. 11).

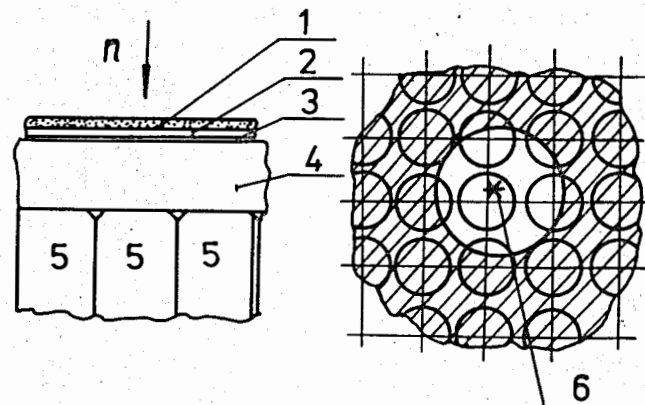


Рис. 11. Принципиальные компоненты нейтронной Anger-камеры. 1 – отражатель, 2 – сцинтиллятор, 3 – воздушный зазор, 4 – световой рассеиватель, 5 – фотоэлектронный умножитель, 6 – координата центра сцинтилляции. Незаштрихованная область справа – область светового излучения на фотокатоде.

* Детектор такого типа впервые был создан Энгером Н.О. в 1958 г. для регистрации γ -квантов.

Декодирующая электроника выделяет координату центра тяжести сцинтилляции:

$$X_c = \sum X_i N_i / \sum N_i ;$$

при этом пространственное разрешение (ширина на половине высоты) определяется из выражения

$$\Delta X = \frac{2,35}{\sqrt{\sum N_i}} \sqrt{\sum (X_i - X_c)^2 \frac{N_i}{\sum N_i}} ,$$

где X_i - координата i -го ФЭУ, N_i - сигнал с i -го ФЭУ. Основное преимущество камер Энгера: при небольшом числе ФЭУ можно получить 2-мерный детектор с разрешающей способностью $\Delta X = (0,06 + 0,12) \phi$ ФЭУ. Типичное значение ΔX таких детекторов составляет 1-3 мм. ПЧД на основе камер Энгера широко распространены в двумерных системах сравнительно небольших размеров до $\sim (50 \times 50) \text{ см}^2$ /41, 78, 79/. Система считывания обычно требует использования ЭВМ. В более сложных детекторах аналогичного типа используется не один сплошной - как в камере Энгера - сцинтиллятор, а некоторая мозаичная система отдельных сцинтилляторов, соединённых в определённой комбинации с ФЭУ /80/. Например, в одной из таких систем свет, производимый захватом нейтрона в некотором сцинтилляторе, делится на 3 оптических канала (3 световода) и распределяется на комбинацию фоточувствительных приёмников (ФЭУ). Тройное совпадение сигнала с полного массива ФЭУ определяет адрес детектируемого нейтрона. Массив m сцинтилляторов можно закодировать с помощью n ФЭУ: $m = n! / 3!(n-3)!$. Например, 20 ФЭУ кодирует 1140 элементов. Эта величина является практическим пределом отдельного модуля, т.к. при большем n число световодов $s = (n-1)(n-2)/2$ для каждого ФЭУ получается слишком большим. Например, в указанном примере нужно 171 соединение для каждого ФЭУ. В другом варианте детектора совпадение сигналов с двух ФЭУ (вместо трех), включенных в определённой комбинации, отличной от комбинации 1-го варианта, позволяет упростить детектор, но в то же время кодирует от $2n$ ФЭУ только n^2 элементов /81/. Принцип камеры Энгера используется уже при создании ФЭУ, непосредственно являющихся двумерным ПЧД /42/ (диаметр ФЭУ ~ 50 см).

С развитием микроэлектроники появилась возможность создания ПЧД, составленных из отдельных мини-детекторов. При этом сам мини-детектор совместно с детекторной электроникой выполнен в одном интегральном исполнении. Вместо ФЭУ и полупроводниковых элементов-детекторов используются и микроканальные пластины, на выходе которых пучок размноженных электронов может регистрироваться любой декодирующей системой.

Совершенствование ПЧД шло параллельно развитию и совершенствованию декодирующих систем. Если в 70-х годах основным методом двумерной

кодировки являлась система скрещенных электродов или RC-аналоговая кодировка, то с развитием камер Энгера добавилась двумерная (4-х или более электродная) кодировка. С повышением быстродействия детекторной электроники (10^{-10} - 10^{-11} с) получают признание методы времяпролетной техники кодирования. Приведём в качестве примера некоторые варианты декодирующих систем современных ПЧД. На рис. 12 показаны два традиционных метода аналоговой декодировки координаты. Сочетание дискретного и аналогового методов позволяет приблизительно в 3 раза уменьшить ошибку считывания координаты. В последнее время в детекторах с дискретными электродами вместо RC-линии с распределёнными параметрами стали использоваться дискретные RC-элементы /82/.

Система считывания для камер Энгера зависит от числа токочувствительных элементов (ФЭУ или просто электродов). При малом числе электродов известны две системы считывания /83/:

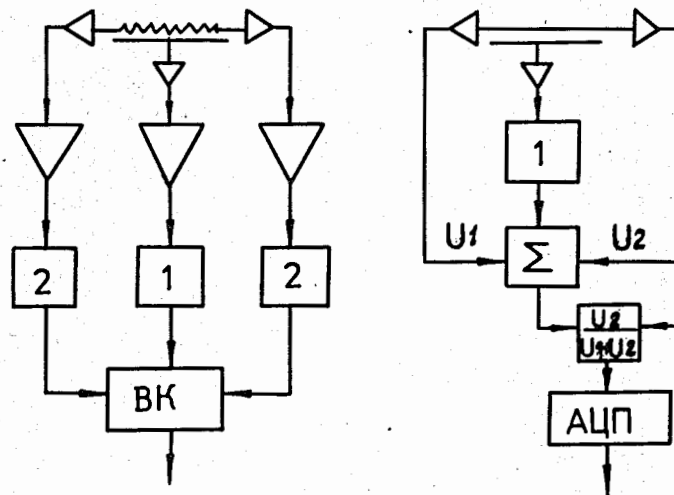
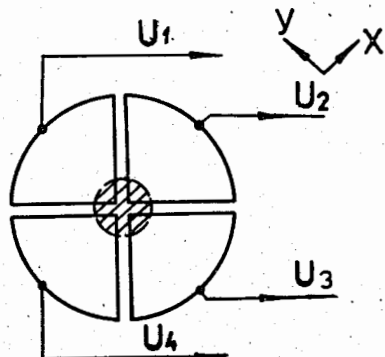


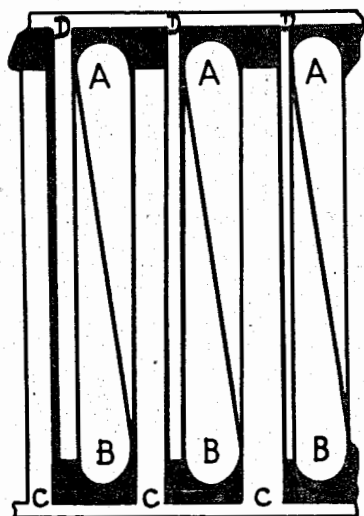
Рис. 12. Принципиальная схема считывания координаты с одномерных аналоговых ПЧД: слева - с электродом в виде RC-линии задержки; справа - с резистивным анодом; 1 - дискриминатор, 2 - детектор положения максимума импульса на временной оси, ВК - временной кодировщик, АЦП - аналого-цифровой преобразователь.



$$X = \frac{U_2}{U_2 + U_4}$$

$$y = \frac{U_1}{U_1 + U_3}$$

а)



$$X = \frac{C}{C + D}$$

$$y = \frac{A}{A + B}$$

б)

Рис. 13. Некоторые варианты системы считывания координаты центра в 4-электродной позиционно-чувствительной двумерной системе /83/. а) Квадрантная система электродов, б) клиновидная система электродов.

- 1) для квадратной геометрии электродов,
- 2) для клиновидной 4-электродной системы (см. рис. 13).

Существуют и более сложные системы считывания координаты, одна из которых, например, требует 30 усилителей на каждый массив, состоящий из 1024 нейтронно-чувствительных элементов. Примером использования времяпролетной техники декодировки являются 2-мерный сцинтилляционный счетчик быстрых нейтронов ($E_n = 10-300 \text{ МэВ}$) /41/ или детектор 20-150 МэВных нейтронов /42/. Характерные размеры сцинтиллятора обычно составляют $1+2 \text{ м}^2$ при пространственном разрешении 5 см. Система двух таких счетчиков позволяет измерять энергию и угловое распределение протонов отдачи (по их времени пролёта и координатам - прохождения обоих сцинтилляторов).

7. Детекторы высокоэнергичных нейтронов и антинейтронов

Взаимодействие нейтронов (и антинейтронов) высокой энергии ($E \gtrsim 10^9 \text{ эВ}$) с веществом сопровождается каскадными процессами с образованием большого количества нейтральных и заряженных частиц. Детектирование таких нейтронов принципиально отличается от детектирования нейтронов более низких энергий ($E \lesssim 10^8 \text{ эВ}$) /84/. Основная задача детектирования состоит в идентификации нейтрона (выделение факта его регистрации от регистрации других нейтральных частиц) и измерение энергии нейтрона. В настоящее время такая задача может быть реализована на основе адронных калориметров. Конструктивно адронный калориметр представляет собой сложную сегментированную систему чередующихся поглотителей (Fe , ^{238}U) и детекторов /20/. Взаимодействие первичного адрона с веществом калориметра приводит к развитию ядерного каскада с энергией, зависящей от энергии первичного адрона. Основная доля электромагнитных и адронных составляющих ядерного каскада поглощается в распределённой системе поглотителей. В детекторе, в качестве которого обычно применяются пластические сцинтилляторы, проволочные пропорциональные камеры или жидкостные LAr -ионизационные камеры, выделяется лишь небольшая доля энергии ($10^{-1}-10^{-4}$). Поэтому энергетическое разрешение адронного калориметра, ограниченное флуктуациями большой доли нерегистрируемой и малой доли регистрируемой энергии, невелико:

$$\frac{\Delta E}{E} \approx (0,6-0,9)E^{-1/2}; \text{ где } [E] = \text{ГэВ}.$$

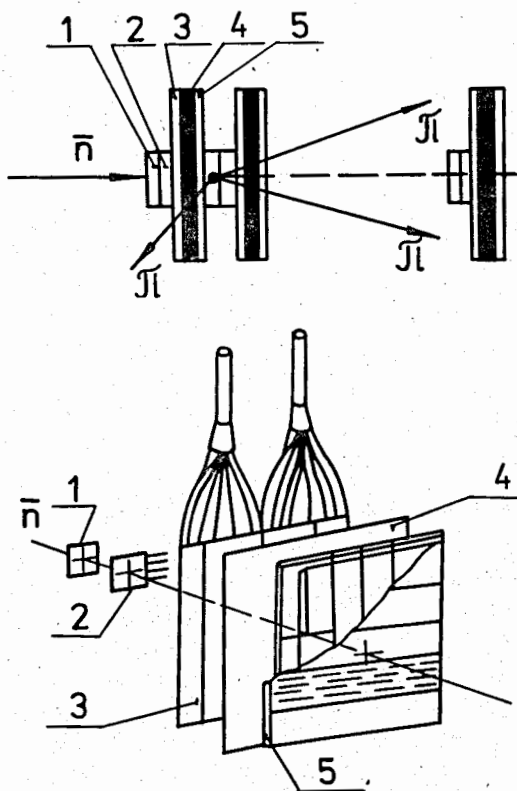


Рис.14. Принципиальная конструкция детектора антинейтронов /84/.

Внизу показаны компоненты одной из 10 секций:
 1 - блок железа $20 \times 20 \times 1 \text{ см}^3$,
 2 - сцинтилляционный детектор $20 \times 20 \times 1 \text{ см}^3$,
 3 - сцинтилляционный детектор $100 \times 100 \times 1 \text{ см}^3$,
 4 - поглотитель частиц низкой энергии,
 5 - стримерные трубки $96 \times 100 \text{ см}^2$.

Это приводит к тому, что при регистрации разнотипных нейтральных адронов сравнимой энергии адронный калориметр позволяет выделить лишь факт регистрации адрона, но не его тип. Обычно для дискриминации и отбора фоновых событий детектирующая система калориметра включает различные дополнительные устройства, учитывающие особенности проводимого эксперимента. В принципе это позволяет с определённой степенью достоверности идентифицировать и нейтронные взаимодействия /27/.

В целом такие устройства сложны и уникальны (полное число информационных каналов достигает 10^6). В качестве примера приведём характеристики детектора антинейтронов сравнительно низких энергий (с импульсом до 1 ГэВ/с) /85/, изображенного на рис.14. Антинейтроны, образующиеся в реакции перезарядки антипротона $\bar{p} + p \rightarrow n + \bar{n}$, регистрируются по продуктам аннигиляции антинейтрона - заряженным пионам. Определяются координаты пересечения пионами отдельных секций и время

пролёта антинейтрона до взаимодействия в какой-либо из секций. Задача детектора - выделить события регистрации антинейтрона на фоне регистрации других нейтральных частиц (K^0, π^0, γ, n) и определить начальную энергию антинейтрона.

Основные параметры детектора:

- 1) чувствительная поверхность - $100 \times 100 \text{ см}^2$;
- 2) разрешающая способность по координатам X и Y - $0,5 \text{ см}$, по времени пролёта - 1 нс ;
- 3) скорость счета - 50 соб./с ;
- 4) эффективность - $0,6$.

8. Новые типы детекторов

Отметим новые возможности в технике регистрации элементарных частиц, потенциально пригодных для создания нейтронных детекторов нового типа.

Регистрация фазового перехода в сверхпроводнике

Известно, что гранулы ($\delta \sim \text{мкм}$) сверхпроводящего материала (например, Sn, In) при температуре ниже критической находятся в метастабильном сверхпроводящем состоянии, если значение напряженности внешнего магнитного поля находится внутри диапазона, ограниченного некоторыми критическими значениями. В 1978 г. Друкер (Druker) и др. /86/ зарегистрировали переход отдельных гранул In из состояния сверхпроводимости в нормальное состояние при облучении их нейтронами от Pu-Be -источника. Аналогичных переходов от γ -квантов ^{57}Co практически не наблюдалось. Гранулы In находились в парафиновой диэлектрической матрице в компаунде с гранулами карбида бора ($\delta 20+60 \text{ мкм B}_4\text{C}$). При торможении заряженных частиц, образующихся в реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li} + 2,3 \text{ МэВ}$ (93%), температура гранулы In повышается, и при достижении критической температуры гранула переходит в основное состояние. Необходимый рост температуры достигается благодаря малому объёму и низкой удельной теплоёмкости гранулы.

Для регистрации перехода использовался эффект Мейсснера - выталкивание магнитного поля из сверхпроводника, т.е. момент перехода фиксировался по изменению магнитного поля. Указанное свойство сверхпроводника позволяет создать нейтронный детектор типа ПЧД, обладающий пространственной памятью высокого разрешения ($\Delta X \sim \text{мкм}$). Информация легко стирается магнитным полем.

Полимеризация мономеров

В 1983 г. Скотт /87/ нашёл среду, непосредственно меняющую свои оптические свойства под действием тепловых нейтронов. Такое свойство обнаружено у полидиацетилена. Этот материал получается полимеризацией диацетилена $R-C \equiv C-C \equiv C-R'$ в твердое состояние. Радикалы R и R' могут быть выбраны из нейтронно-активного материала, эмитирующего протон или α -частицу. Во время полимеризации исходный прозрачный материал получает плотную цветовую окраску. Диацетилен удобен при фоновой регистрации нейтронов.

Полупроводниковые устройства промышленного изготовления

Известно, что некоторые кремниевые полупроводниковые устройства высокой степени интеграции, например динамическая память типа R A M, чувствительны к внешнему ионизирующему излучению. При этом пространственная локализация места прохождения заряженной частицы в таком устройстве намного лучше, чем в мультieleктродных позиционно-чувствительных детекторах. Для проверки возможности изготовления промышленных полупроводниковых устройств, чувствительных к тепловым нейтронам в 1983 г. Черофилини (Cerofilini) и др. был создан диод с имплантированными в p^+ -область диода (область вблизи поверхности обеднённой зоны) ионами ^{10}B . При захвате теплового нейтрона проводимость диода резко возрастала. Вероятность срабатывания диода при попадании в него одного нейтрона составляла $8 \cdot 10^{-6}$ при концентрации ионов ^{10}B , равной $4 \cdot 10^{15}$ ион/см².

Из таких приборов могут быть составлены большие поверхности, информация с которых может поступать непосредственно в ЭВМ. Более того, такие устройства могут быть элементами оперативной памяти ЭВМ и непосредственным образом использоваться, например, для накопления и обработки экспериментальной информации или для управления работой ЭВМ с помощью нейтронного поля.

Радиационные электромагнитный (РАМ) и пьезоэлектрический (ПЭ) эффекты в полупроводниках

Эти два новых и близких по своей природе класса явлений исследованы сравнительно недавно, в 1977-80 гг. /88-91/. Происхождение РАМ-эффекта следующее. При облучении тяжелыми заряженными частицами (α , p и др.) кристалла германия вблизи его поверхности (по трекам, например, α -частиц) образуются электронно-дырочные пары. Вследствие этого вдоль оси, перпендикулярной к облу-

чаемой поверхности, возникает градиент концентрации носителей и диффузия носителей вглубь образца. Под влиянием внешнего магнитного поля, направленного вдоль облучаемой поверхности, электроны и дырки отклоняются в противоположные стороны и создают электрическое поле. На контактах разомкнутого образца возникает ЭДС. Таким образом, в РАМ-эффекте разделение носителей и возникновение ЭДС связано с магнитным полем. При этом магнитное поле делает кристалл анизотропным с параметром анизотропии, равным сумме холловских углов для электронов и дырок.

Но анизотропия диффузии в кубическом кристалле германия может быть вызвана и одноосной упругой деформацией кристалла. Разделение носителей в этом случае происходит благодаря различной степени анизотропии подвижностей электронов и дырок (ПЭ-эффект). Поскольку особенности диффузии избыточных носителей для обоих эффектов близки, зависимости ЭДС ПЭ-эффекта от потока, энергии и флюенса ионизирующих частиц близки к соответствующим зависимостям для РАМ-эффекта. Отличительной чертой детектора, реализованного на использовании РАМ или ПЭ-эффекта, является уменьшение ЭДС с ростом энергии частиц. Механизм этого явления связан с возрастанием ЭДС при уменьшении проводимости всего кристалла. В свою очередь, проводимость кристалла определяется проводимостью области поглощения заряженной частицы. Таким образом, при уменьшении энергии падающих частиц их пробег в кристалле уменьшается, падает проводимость кристалла, и ЭДС растёт. При наличии (n, α) или (n, p)-конвертора детектор такого типа может быть использован для измерения потока нейтронов.

З а к л ю ч е н и е

Развитие методов и техники регистрации нейтронов связано с общим прогрессом науки и техники. В настоящее время лидирующее влияние на совершенствование нейтронных детекторов в основном оказывают следующие факторы:

1. Прогресс в технике регистрации заряженных частиц и γ -квантов;
2. Развитие микроэлектроники и совершенствование методов обработки цифровых и аналоговых сигналов;
3. Повышение интенсивности нейтронных источников;
4. Расширение области прикладного использования нейтронов.

Преимущество в развитии получают прежде всего наиболее быстродействующие методы регистрации нейтронов. Однако для многих типов детекторов, особенно газонаполненных и даже сцинтилляционных, быстро-

действие уже не ограничивается быстроедействием детекторной электроники и в настоящее время находится вблизи предела принципиальных возможностей этих детекторов.

Важно отметить, что характерными требованиями, предъявляемыми к современным детекторам, становятся (кроме быстроедействия) надёжность, технологичность, удобство в обращении, низкая стоимость и возможность регистрации координаты регистрируемого нейтрона. Если еще лет 10 тому назад эти требования были только желательными, то в настоящее время они подчиняют разработку практически всех типов новых детекторов.

Совершенствование технологии изготовления интегральных схем привело к выделению нового направления в создании полупроводниковых и других типов детекторов - создание функционально законченных детекторных устройств, имеющих встроенные ЭВМ или возможность подключения к внешней ЭВМ. В то же время развитие газонаполненных и сцинтилляционных детекторов идет (по крайней мере это становится всё заметнее) по пути повышения технологичности их изготовления и возможности выработки некоторых типовых детекторных устройств. Указанные факты можно интерпретировать как некоторый стихийный шаг в создании унифицированной системы отдельных детекторов, позволяющий качественно изменить характер экспериментальных работ и интенсифицировать научные исследования. Однако в настоящее время основная масса нейтронных детекторов представляет собой не связанные друг с другом отдельные разработки, существенно отличающиеся по своим основным параметрам.

В новых разработках становится всё заметнее доля "гибридных" детекторов, сочетающих в одном детекторе лучшие свойства нескольких разнотипных детекторов. Если представить себе детектор, сочетающий в себе лучшие реально достижимые характеристики отдельных детекторов разного типа, то этот детектор будет выглядеть приблизительно так:

быстроедействие ^{ж)}	- 10^9 имп/с
пространственное разрешение	- 10^{-2} мм
эффективность к тепловым нейтронам	- 100%
геометрия	- любая
технологичность	- машинное производство
требование к детекторной электронике	- стандартное подключение к внешней ЭВМ или непосредственно к дисплею

^{ж)} При отсутствии ограничений со стороны электронных систем отбора событий, с учетом которых быстроедействие может уменьшиться на несколько порядков.

С другой стороны, если исключить некоторые экзотические типы детекторов, характеристики которых, как правило, не лучше характеристик детекторов традиционного типа, то в практике экспериментатора попрежнему останутся газонаполненные, сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы. Отмеченная группа детекторов эволюционирует в основном в сторону количественного совершенствования своих параметров, которые, по-видимому, в недалёком будущем достигнут естественного предела, определяемого возможностями используемых принципов регистрации.

Произойдёт ли затем заметный качественный скачок в структуре и возможностях нейтронных детекторов, способный принципиально изменить практику нейтронных исследований, покажет будущее.

Литература

1. Realisierungstudie zur Spallations-Neutronenquelle. Teil 1, Jul-Spez-113, КРК3175, Juni 1981, с. 1-179.
2. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. "Энергоатомиздат", М., 1985.
3. Росси Б., Штауб Г. Ионизационные камеры и счетчики. Изд. иностранной литературы, М., 1951.
4. Заневский Ю.В. Многопроволочные детекторы элементарных частиц. Атомиздат, М., 1982.
5. Position-Sensitive detection of Thermal Neutrons, edited by P.Convert, Academic Press, 1983.
6. Jeavons A.P. et al. NIM, 1978, v.148, 29.
7. Rauch M. et al. NIM, 1967, v.46, p. 153.
8. Amaldi E., Rasetti F. Ricerca Sci., 1939, v.10, p.115.
9. Jeavons A.P. et al. NIM, 1978, v.148, p.29.
10. Дмитриев А.Б., Малышев Е.К. Нейтронные ионизационные камеры для реакторной техники. М., Атомиздат, 1975.
11. Щегляин О.И. и др. АЭ, 1970, т.28, вып. 2, с. 164.
12. Буланенко В.И. и др. В сб. Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. Труды II Всесоюзного совещания, т.1, Стандартгиз, М., 1974, с.65.
13. Михайлов М.Н. и др. ОИЯИ, 13-80-627, Дубна, 1980.
14. Boag J. et al. Brit.Journ.Appl.Phys., 1952, v.3, p.222.
15. Lapsley A.C. Rev.Scient.Instrum., 1953, v.24, No 8, p.602.
16. Peisert A., Fabio S. CERN 84-68, Experimental Physics Div., 13 July 1984.

17. Valentine K.H. et al. IEEE Trans. on Nucl.Sci.1983, NS-30, No 1, p. 795.
18. Willis W.J. et al. NIM, 1971, v.120, p.221
19. Richard A. NIM, 1985, A236, p.294-299.
20. Алексеев Г.Д. и др. В сб.: Рабочее совещание по программе экспериментов на встречных пучках. ОИЯИ, ДИ-83-541, Дубна, 1983.
21. Valentine K.H. et al. IEEE Trans. on Nucl.Sci. 1985, NS-32, No.1, p.384.
22. Valentine K.H. et al. Trans.AmSoc., 1981, v.39, p.631.
23. Valentine K.H. IEEE, Trans. on Nucl. Scien., 1983, NS-30, No.1, p.795.
24. Hanna G. et al. Phys.Rev., 1949, v. 75, p. 985.
25. Nenert M. Kernphysikalische Meßfahren. Karlsruhe: G.Braun, 1966.
26. Лорикян Н.П., Наргарян К.Ж. и др. ПТЭ, 1984, № 5, с.45.
27. Fabian C.W., Ludlam T. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 1982, v.32, p.335.
28. Golovatyuk W.M. NIM, 1981, v.185, p.300.
29. Ананьев Б.Н. и др. ОИЯИ, Р13-81-857, Дубна, 1981.
30. Стрелков А.В. ОИЯИ, Р13-81-857, Дубна, 1981.
31. Sakai E. et al. IEEE Trans.on Nucl.Sci. 1983, NS-30, No.1, p.802.
32. Алексеев Г.Д. и др. ЭЧАЯ, 1982, т.13, вып.3, стр. 703.
33. Battistoni G. et al. NIM, 1979, v. 164, p. 57.
34. Алексеев Г.Д. и др. ОИЯИ, Р13-85-361, Дубна, 1985.
35. Loeb L.B., Leight W. Phys.Rev., 1937, v.51, p. 149.
36. Brechin S. et al. NIM, 1975, v.125, p.225.
37. Sharpak G. et al. IEEE Trans.on Nucl.Sci., 1978, NS-25,p.122.
38. Alison J. et al. NIM, 1982, v.201, p. 341.
39. Gordon H.A. IEEE Trans. Nucl.Sci., 1982, NS-29, No.1, p.343.
40. Rühle et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1983, NS-30, No.1, p.436.
41. Cierjacks S. et al. NIM, 1985, A238, No.1.
42. Kume M. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, NS-32, No.1,p.448.
43. Kononenko W. et al. NIM, 1981, v.186, No.3, p.586.
44. Rokutaro K. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1981, NS-28, No.1, p. 875.
45. Mill N.W. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, NS-32, No.1,p.366.
46. Fink C.L. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1982, NS-29, No.1, p.718.
47. Schweitzer J.S. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1983, NS-30, No.1, p.380.
48. Schatams P. et al. NIM,1985, A238, No.1, p. 564.

49. Derenzo S.E. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1983, NS-30, No.1, p. 665.
50. Soussaline F. In: Position Sensitive Detection of Thermal Neutron, Academic Press, 1983, p.161.
51. Lavab M. NIM, 1984, v.227, p.91.
52. Wolf M.A. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1982, NS-29, No.1, p. 773.
53. Bedrich J. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, NS-32, No.1,p.402.
54. Kim Y. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, NS-32, No.1, p.476.
55. Scharager C. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1980, NS-27, No.1, p.276.
56. Friant A. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1980, NS-27, No.1,p.281.
57. Синьков М.В., Сапрыкин В.Р., Чалая В.Г. Многоэлементные детекторы ионизирующего излучения, "Техника", Киев, 1985.
58. Kress K.A. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1981, NS-28, No.1, p.807.
59. Gaalema S. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, NS-32, No.1, p. 417.
60. Shiraishi F. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, NS-32, No.1, p. 471.
61. Chaudhuri S. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1982, NS-29, No.1, p. 728.
62. Banavar J.R. et al. Phys.Rev. Lett., 1978, v.41, p.576.
63. Al-Dabach D. Jül-1728, 1981.
64. Андреев Л.Г. и др. АЭ, т.40, вып.4, 1976, с.335.
65. Кулаков Г.В., Малышев Е.К., Цетинин О.И. Вакуумные детекторы излучения. М., Энергоатомиздат, 1982.
66. Бакулин Ю.П., Чулкаев С.В., ПТЭ № 4, 1983.
67. Ивашкина М.П. и др. АЭ, т.58, вып.6, 1985.
68. Деше Ш., Пепельшев Ю.Н., ПТЭ, 1973, № 2.
69. Allemand, Thomas G. Note Technique Lett/McTE, No.1056, 1974
70. Jacobs J., Convert P., Grenoble, ST-71/240, 1971.
71. Заневский Ю.В. и др. ОИЯИ, Р13-84-563, Дубна, 1984.
72. Breskin A. et al. CERN-EP/83-121
73. Абдушукуров Д.А. и др. ПТЭ, 1983, № 6, с. 37.
74. Моучка Л. и др. ОИЯИ, I3-II-873, Дубна, 1978.
75. Anger M.O. Rev.Sci., Instr., 1958, v.29, p.27.
76. Reichelt J.M.A. AWRE Report N 057/73, 1973.
77. Strans M.G. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1981, NS-28
78. Roche C.T. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, NS-32, No.1, p.373.
79. Kurs R. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, NS-32, No.1,p.453.

80. Davidson P.L. Wroe M. Proc.ICANS IV, KENS Report II, 1981, p.642.
81. Kurz R. et al. NIM, 1982, v.196, p.279.
82. Gordon J.S. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1983, NS-30, No.1.
83. Gethyn J. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, NS-32, No.1, p.427.
84. Шафранов М.Д. ЭЧАЯ, 1975, т.6, вып. 3, с. 776-819.
85. Bressani T. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, NS-32, No.1, p. 733.
86. Drukier A.K. et al. NIM, 1978, v.154, p.91.
87. Convert P. et al. In: Position Sensitive detection of Thermal Neutrons, Academic Press, 1983, p.18.
88. Kikoin I.K. et al. J.Phys.C.: Sol.Stat.Phys., 1977, v.10, No.22, p. 1653.
89. Кикоин И.К. и др. ФТП, 1980, т.14, вып.10, с.1991-2000.
90. Кикоин И.К. и др. ФТП, 1977, т.11, вып. 6, с. 1147.
91. Каган Ю.М., Собакин В.М. ФТТ, 1969, т.11, вып. 4, с. 1018.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 октября 1986 года.

ПЕРЕЧЕНЬ
лекций, вышедших с 1974 по 1986 гг.

- Фаустов Р.Н. Связанная система частиц в квантовой электродинамике. Вып.1. ОИЯИ; Дубна, 1974.
- Синаев А.Н. Современные аппаратные системы модульной структуры, используемые при создании измерительно-вычислительных комплексов /КАМАК, ВЕКТОР/. Вып.2. ОИЯИ, 8507, Дубна, 1975.
- Волков Д.В. Кварки как следствие дуальности. Вып.3. ОИЯИ, P2-8765, Дубна, 1975.
- Пальчик М.Я., Фрадкин Е.С. Введение в теорию конформно-инвариантных квантовых полей. Вып.4. ОИЯИ, 2-8874, Дубна, 1975.
- Замори Э. Микропроцессоры. Вып.5. ОИЯИ, P10-8852, Дубна, 1975.
- Биленький С.М. Вопросы физики нейтрино высоких энергий. Вып.6. ОИЯИ, 2-9026, Дубна, 1975.
- Малкин И.А., Манько В.И. Инварианты, когерентные состояния и динамические симметрии квантовых систем. Вып.7. ОИЯИ, P2-9228, Дубна, 1975.
- Волков М.К., Первушин В.Н. Квантовая теория поля с киральным лагранжианом и физика мезонов низких энергий. Вып.8. ОИЯИ, P2-9390, Дубна, 1976.
- Басиладзе С.Г. Интегральные схемы с эмиттерной связью и их применение в наносекундной ядерной электронике. Вып.9. ОИЯИ, 13-9744, Дубна, 1976.
- Аникин С.А. и др. Перенормированные составные поля в квантовой теории поля. Вып.10. ОИЯИ, P2-10528, Дубна, 1977.
- Щяпников П.В. Множественные процессы и инклюзивные реакции. Вып.11. ОИЯИ, P2-10681, Дубна, 1977.
- Капусцик Э. Галилеева инвариантность в теории поля. Вып.12. ОИЯИ, P2-10677, Дубна, 1977.
- Бутцев В.С. Явление возбуждения высокоспиновых ядерных состояний и механизм поглощения отрицательных π -мезонов. В. 13, ОИЯИ, P15-10847, Дубна, 1977.
- Валуев Б.Н. Применение алгебры Клиффорда к решению задачи Изинга - Онсагера. Вып.14. ОИЯИ, P17-11020, Дубна, 1977.
- Капусцик Э. Нестандартные алгебры квантово-механических наблюдаемых. Вып.15. ОИЯИ, P4-11497, Дубна, 1978.

Блохинцев Д.И. Квантовая механика. Лекции по избранным вопросам. Вып.16. ОИЯИ, P2-11728, Дубна, 1978.

Ширикова Н.Ю. Начинаям работать на ЭВМ CDC-6500. Вып.17. ОИЯИ, P11-11739, Дубна, 1978.

Барбашов Б.М., Нестеренко В.В. Непрерывные симметрии в теории поля. Вып.18. ОИЯИ, P2-12029, Дубна, 1978.

Некоторые проблемы физики высоких энергий /сборник/. Вып.19. ОИЯИ, P2-12080, Дубна, 1978.

Басиладзе С.Г. Электронная регистрирующая аппаратура физического эксперимента. Вып.20. ОИЯИ, P13-12151, Дубна, 1979.

Ефремов А.В., Радюшкин А.В. Партоны, жесткие процессы и квантовая хромодинамика. Вып.21. ОИЯИ, P2-12803, Дубна, 1979.

Говорков А.Б. Введение в теорию кварков. Вып.22, ОИЯИ, P2-12803, Дубна, 1979.

Говорков А.Б. Цветные кварки и глюоны. Вып.23. ОИЯИ, P2-80-6, Дубна, 1980.

Исаев П.С. Глубоконеупругое рассеяние лептонов на нуклонах. Партонная модель нуклона. Вып.24. ОИЯИ, P2-80-325, Дубна, 1980.

Казаков Д.И., Щирков Д.В. Суммирование асимптотических рядов в квантовой теории поля. Вып.25. ОИЯИ, P2-80-462, Дубна, 1980.

Ососков Г.А. Применение методов распознавания образов в физике высоких энергий. Вып.26. ОИЯИ, P10-83-187, Дубна, 1983.

Мальшев В.А. Элементарное введение в математическую физику бесконечно-частичных систем. Вып.27. ОИЯИ, P17-83-363, Дубна, 1983.

Савушкин Л.Н., Фоменко В.Н. Введение в мезонную теорию ядерных взаимодействий и ядерных систем. Вып.28. ОИЯИ, P4-83-369, Дубна, 1983.

Биленький С.М. Осцилляции нейтрино. Вып.29. ОИЯИ, P2-83-441, Дубна, 1983.

Бужек В. Введение в метод стохастического квантования. Вып.30. ОИЯИ, P2-84-419, Дубна, 1984.

Шумовский А.С., Юкалов В.И. Фазовые состояния и переходы. Вып.31. ОИЯИ, P17-85-676, Дубна, 1985.

Владимиров А.А. Введение в квантовые интегрируемые системы. Метод R-матрицы. Вып.32. ОИЯИ, P17-85-742, Дубна, 1985.

Осипов В.А., Федянин В.К. Полиацетилен и двумерные модели квантовой теории поля. Вып. 33, ОИЯИ, P17-85-809, Дубна, 1985.

Шуан Ш. Стохастичность в динамических системах. Вып. 34, ОИЯИ, P17-86-211, Дубна, 1986.

Ефремов А.В. Введение в квантовую хромодинамику. Вып. 35, ОИЯИ, P2-86-212, Дубна, 1986.

Нестеренко В.В., Червяков А.М. Сингулярные лагранжианы. Классическая динамика и квантование. Вып. 36, ОИЯИ, P2-86-323, Дубна, 1986.

Требования, предъявляемые к серии брошюр
"Лекции для молодых ученых ОИЯИ"

Серия брошюр "Лекции для молодых ученых ОИЯИ" издаётся с целью повышения научно-профессионального кругозора и уровня молодых ученых и специалистов ОИЯИ в актуальных областях исследований, ведущихся по тематике Института. Выпуски должны представлять собой законченные циклы лекций, прочитанные в ОИЯИ и ориентированные прежде всего на молодых сотрудников Института.

Лекции должны иметь характер учебного пособия, предназначенного для первого ознакомления с рассматриваемой проблемой, а также содержать обзор её современного состояния. Они должны быть снабжены подробным оглавлением и основной литературой. Большие параграфы рекомендуется разбивать на подпараграфы с вынесенными в оглавление подзаголовками.

Весь текст, включая отдельные главы и параграфы, следует печатать, заполняя каждую страницу целиком.

Рукопись должна быть напечатана на специальных бланках, предназначенных для прямого репродуцирования, которые можно получить в издательском отделе. Все формулы и схемы должны быть вписаны аккуратно и ясно тушью или чернилами черного цвета. Разметка формул не производится, их нумерация должна находиться в конце строки справа в круглых скобках. Текст лекций печатается на машинке с черной (не серой) лентой через 1,5 интервала. Объем лекций не должен превышать 100 страниц машинописного текста.

Рукопись представляется в Редакционный совет серии брошюр "Лекции для молодых ученых ОИЯИ" Советом молодых ученых и специалистов ОИЯИ и Советами молодых ученых и специалистов лабораторий Института. Редакционный совет принимает окончательное решение о целесообразности ее публикации.

Редакционный совет