

1.5.3. Ионизационные камеры

При прохождении заряженных частиц в газах в результате ионизации образуются электроны и ионы. Если ионизация происходит в объеме между двумя электродами, которые имеют разность потенциалов, то за счет движения электронов и ионов к электродам в электрической цепи возникнет ток.

Все газовые ионизационные детекторы представляют собой конденсаторы, в которых пространство между электродами заполнено каким-либо газом. В зависимости от величины и распределения напряженности электрического поля в газовом промежутке эти детекторы обладают разными свойствами. Так, при сравнительно малых напряженностях электрического поля ток, протекающий в электрической цепи, не зависит от напряжения на конденсаторе и равен числу пар ионов, возникающих в единицу времени в объеме детектора, умноженных на заряд электрона. Такие детекторы называют **ионизационными камерами**. При более высоких значениях напряженности поля в результате газового усиления ток в электрической цепи может быть во много раз больше, чем число зарядов, возникающих в детекторе в единицу времени. При этом ток зависит от напряжения на конденсаторе и пропорционален ионизационному эффекту, создаваемому излучением. Такие детекторы называют **пропорциональными счетчиками**. Наконец, при еще более высоких значениях напряженности поля в конденсаторе возникает разряд, если в объем детектора попадает заряженная частица. Такие детекторы называют **газоразрядными счетчиками**.

Рассмотрим подробнее устройство и принцип работы ионизационной камеры.

Ионизационная камера – детектор для исследования и регистрации ядерных частиц и излучения, действие которого основано на способности быстрых заряженных частиц вызывать ионизацию газа.

Ионизационная камера представляет собой воздушный или газовый электрический конденсатор, к электродам которого приложена разность потенциалов V (рис. 19). Величина прикладываемого напряжения (обычно сотни вольт) подбирается так, чтобы образованные в камере при пролете заряженной частицы свободные заряды максимально быстро, не успев рекомбинировать, достигли электродов.

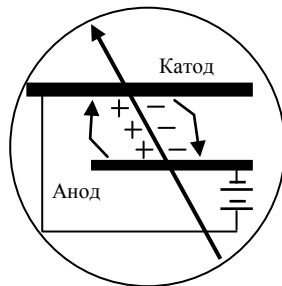


Рис. 19. Схема ионизационной камеры

Ионизационные камеры по своей конструкции представляют газовые конденсаторы. В зависимости от формы электродов ионизационные камеры подразделяются на **цилиндрические, плоские и сферические**.

Наиболее простой является ионизационная камера с параллельными плоскими электродами (дисками). Диаметр диска в несколько раз превышает расстояние между ними (рис. 20).

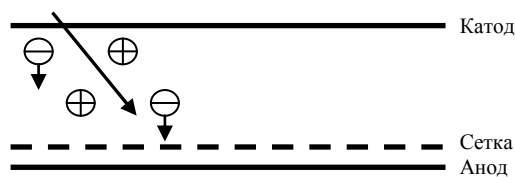


Рис. 20. Схема плоской ионизационной камеры

В цилиндрической ионизационной камере электроды – два коаксиальных цилиндра, один из которых заземлен и служит корпусом ионизационной камеры (рис. 21).

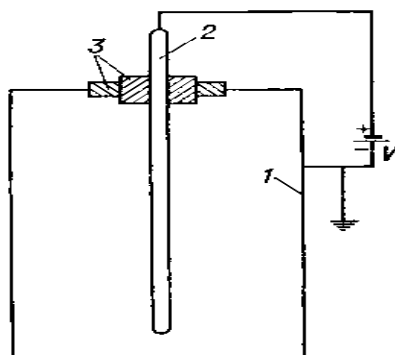


Рис. 21. Сечение цилиндрической ионизационной камеры:
 1 – цилиндрический корпус камеры, служащий отрицательным электродом;
 2 – цилиндрический стержень, служащий положительным электродом;
 3 – изоляторы

Сферическая ионизационная камера состоит из двух concentric сфер (иногда внутренний электрод – стержень) (рис. 22).

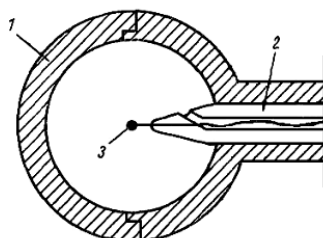


Рис. 22. Конструкция сферической ионизационной камеры:
 1 – корпус; 2 – изолятор;
 3 – электрод

При попадании ионизирующих частиц в пространство между электродами частицы ионизируют газ в рабочем объеме и образовавшиеся электроны и ионы движутся под действием постоянного электрического поля в направлении электродов, создавая ток в цепи ионизационной камеры. Ток измеряется регистрирующим устройством. Через некоторое время нарастание ионизационного эффекта в камере замедлится, а затем и прекратится совсем. Это означает, что если вначале, когда концентрация ионов и электронов была мала, ионизационный эффект только накапливался, то при больших концентрациях заметную роль начинает играть процесс, обратный ионизации, – **воссоединение ионов и электронов в нейтральные молекулы, называемое рекомбинацией**. Поэтому величина электрического поля должна быть достаточно большой для предотвращения рекомбинации электронов и ионов.

При наличии некоторой хотя бы небольшой разности потенциалов U между электродами в объеме камеры возникает упорядоченное перемещение носителей электрических зарядов и во внешней цепи появляется электрический ток. Величина тока, протекающего через какой-либо единичный элемент поверхности произвольно выбранного поперечного сечения камеры, может быть представлена в виде

$$i = e(n_+ u_+ + n_- u_-),$$

где u_+ и u_- – скорости перемещения носителей положительных и отрицательных электрических зарядов в направлении соответствующих электродов. Величину u называют обычно **скоростью дрейфа**.

Скорость дрейфа ионов u в данном газе при заданных давлении и напряженности поля является величиной постоянной. Более того, теория и эксперимент показывают, что для ионов при всех практически используемых напряженностях поля E скорость дрейфа u пропорциональна напряженности поля: $u = kE$. Коэффициент k определяется как скорость дрейфа при напряженности поля, равной 1 В/см, имеет размерность $\text{см}^2 \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$ и носит название **подвижности**. Таким образом, подвижность ионов k зависит только от природы и давления газа в камере.

В области $E < E_1$ (рис. 23) скорость дрейфа электронов мала, и часть из них рекомбинирует по дороге.

В интервале $E_1 < E < E_2$ все электроны достигают анода (режим насыщения), а при $E > E_2$ начинается процесс лавинного размножения ионов вблизи анода.

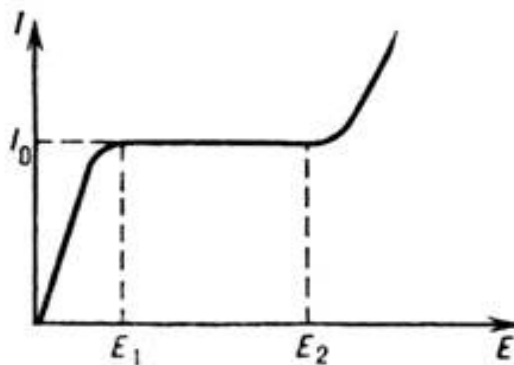


Рис. 23. Зависимость ионизационного тока I от приложенного электрического поля E

Ионизационная камера отличается от других газовых детекторов (пропорциональных камер, счетчиков Гейгера – Мюллера и др.) тем, что в ней не используется механизм газового усиления, т. е. размножение ионов за счет лавинообразного процесса вблизи анода.

Ток, проходящий через ионизационную камеру в области насыщения I_0 , пропорционален энергии E , выделяемой ионизирующей частицей в объеме ионизационной камеры, т. е. **потoku частиц Φ** , падающему на ионизационную камеру:

$$I_0 = \frac{\Phi e E}{E_0},$$

где e – заряд электрона;

Φ – поток частиц падающий на ионизационную камеру;

E – энергия, выделяемая ионизирующей частицей в объеме ионизационной камеры;

E_0 – энергия, затрачиваемая на образование одной электрон-ионной пары.

При увеличении напряжения U величина тока I_0 меняться, естественно, не будет. Значение тока I_0 называют поэтому **током насыщения**. Таким образом, при разности потенциалов U , обеспечивающей полное соби́рание электрических зарядов, сила тока, протекающего через ионизационную камеру, от величины напряжения U не зависит.

Режим насыщения достигается при достаточно большой скорости дрейфа электронов и ионов. Скорость увеличивают в 10–40 раз, добавляя к чистому аргону (Ar) 2,5–30 % многоатомных газов (H_2 , CH_4 и др.). При работе с чистыми многоатомными газами для насыщения требуются большие энергии. Ионизирующие частицы могут проникать в рабочий объем ионизационной камеры через тонкие окна либо непосредственно через стенки камеры. Иногда радиоактивный источник помещают внутрь ионизационной камеры в виде тонкого слоя на поверхности электродов или вводят в виде радиоактивной примеси к газу.

По режиму работы различают **токовые (интегральные) и импульсные ионизационные камеры**.

Токовые ионизационные камеры дают сведения об общем интегральном количестве ионов, образовавшихся в 1 с. Они обычно используются для измерения интенсивности излучений и для дозиметрических измерений. Так как ионизационные токи в ионизационных камерах обычно малы (10^{-10} – 10^{-15} А), то они усиливаются с помощью усилителей постоянного тока.

К группе интегральных камер относятся собственно токовые камеры и интегрирующие камеры. Токовые камеры применяют для измерения активности α -, β - и γ -препаратов, интенсивности α -излучения и мощности дозы от потока нейтронов, а также γ - и рентгеновского излучения. С помощью интегрирующих камер определяют мощности дозы γ -, рентгеновского и жесткого β -излучения, а также потока нейтронов. Схема включения интегральной ионизационной камеры представлена на рис. 24.



Рис. 24. Схема включения токовой ионизационной камеры: U – напряжение на электродах камеры; G – гальванометр, измеряющий ионизационный ток

Импульсные ионизационные камеры служат для регистрации отдельных импульсов, вызываемых каждой ионизирующей частицей.

Амплитуда импульса пропорциональна энергии частицы. Однако это условие выполняется только тогда, когда амплитуда импульса не зависит от направления движения частицы в газе. Данное затруднение

снимается в камере с сеткой (рис. 25).

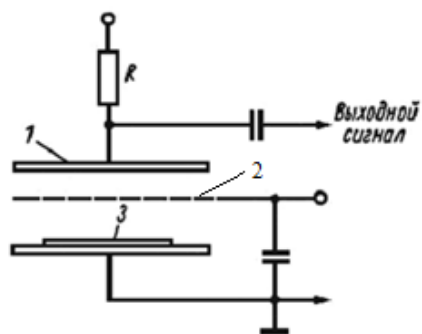


Рис. 25. Ионизационная камера с сеткой:
1 — собирающий электрод; 2 — сетка;
3 — радиоактивный источник

Вблизи собирающего электрода помещают сетку из тонких проволок. На сетку подается отрицательный потенциал, немного меньший потенциала высоковольтного электрода. Сетка имеет большую проницаемость для электронов, и практически все электроны попадают в объем газа между сеткой и собирающим электродом. Одновременно сетка экранирует собирающий электрод от воздействия положительных ионов, которые и влияют на амплитуду импульсов в камере без сетки. Вследствие этого амплитуда импульсов в камере с сеткой зависит только от энергии частиц.

В импульсных ионизационных камерах регистрируются и измеряются импульсы напряжения, которые возникают на сопротивлении R при протекании по нему ионизационного тока, вызванного прохождением каждой частицы. Амплитуда и длительность импульсов зависят от величины сопротивления R , а также от емкости конденсатора C . Для импульсной ионизационной камеры, работающей в области тока насыщения, амплитуда импульса пропорциональна энергии E , потерянной частицей в объеме ионизационной камеры. Схема включения импульсной ионизационной камеры представлена на рис. 26.

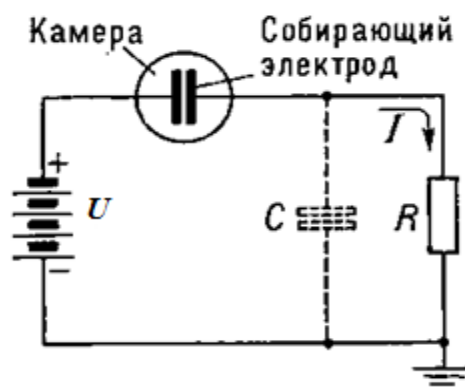


Рис. 26. Схема включения импульсной ионизационной камеры: C — емкость собирающего электрода; R — сопротивление

Обычно объектом исследования для импульсных ионизационных камер являются сильно ионизирующие короткопробежные частицы, способные полностью затормозиться в межэлектродном пространстве (α -частицы, осколки делящихся ядер). В этом случае величина импульса ионизационной камеры пропорциональна полной энергии частицы и распределение импульсов по амплитудам воспроизводит распределение частиц по энергиям, т. е. дает энергетический спектр частиц. Действительно, если частица полностью останавливается в объеме камеры, то по величине собранного заряда (количеству электронов, пришедших на анод) легко определить энергию частицы. Эта энергия равна произведению числа электронов n на среднюю энергию ϵ , необходимую для образования частицей одной пары электрон-ион (для газа $\epsilon \approx 30$ – 40 эВ).

Важная характеристика импульсной ионизационной камеры — ее **разрешающая способность**, т. е. точность измерения энергии отдельной частицы. Для α -частиц с энергией 5 МэВ разрешающая способность достигает 0,5 %.

В импульсном режиме работы важно максимально сократить время срабатывания ионизационной камеры. Подбором величины R можно добиться того, чтобы импульсы ионизационной камеры соответствовали сбору только электронов, гораздо более подвижных, чем ионы. При этом удается значительно уменьшить длительность импульса и достичь время около 1 мкс.

Импульсные ионизационные камеры делятся на **пропорциональные**, у которых импульсы напряжения

на выходе пропорциональны энергии излучения, и **счетные**, у которых импульсы не строго пропорциональны энергии излучения. Счетные камеры применяют для определения числа α -частиц (а также протонов и дейтронов), испускаемых препаратом в единицу времени, а также для измерения в отдельных случаях нейтронов и γ -излучения пульсирующих источников (например, бетатронов). Для счета β -частиц счетные камеры не применяют (наиболее удобными являются пропорциональные счетчики). Пропорциональные камеры используют для определения энергии и энергетического спектра α -частиц, протонов, дейтронов, быстрых нейтронов (водородное наполнение камеры), а также для счета β -частиц.

Варьируя форму электродов ионизационной камеры, состав и давление наполняющего ее газа, обеспечивают наилучшие условия для регистрации определенного вида излучения. Для исследования короткопробежных частиц источник помещают внутрь камеры или в корпусе делают тонкие входные окошки из слюды или синтетических материалов. В ионизационной камере для исследования гамма-излучений ионизация обусловлена вторичными электронами, выбитыми из атомов газа или стенок камеры. Чем больше объем ионизационной камеры, тем больше ионов образуют вторичные электроны. Поэтому для измерения γ -излучения малой интенсивности применяют ионизационные камеры большого объема (несколько литров и более).

Ионизационная камера может служить не только счетным, но и спектрометрическим детектором, т. е. позволяет определять энергию частицы. Это возможно вследствие независимости средней энергии, затрачиваемой в газе на образование одной пары электрон–ион, от энергии ионизирующей частицы и от производимой ею удельной ионизации, определяющейся зарядом и скоростью частицы. Поэтому величина заряда, образованного частицей в рабочем объеме камеры, пропорциональна энергии, потерянной частицей в газе, а в случае полного поглощения частицы в рабочем объеме камеры – ее энергии.

Преимуществами ионизационной камеры является простота устройства, широкий диапазон измеряемых активностей любого типа излучения, высокая чувствительность к α -излучению, хорошая воспроизводимость результатов и возможность определения активности препаратов больших размеров.

Недостатком ионизационной камеры являются очень низкие токи, что требует применения очень чувствительной аппаратуры. Этот недостаток преодолевается в ионизационных детекторах с газовым усилением.

Ионизационная камера может быть использована и для измерений нейтронов. В этом случае ионизация вызывается ядрами отдачи (обычно протонами), создаваемыми быстрыми нейтронами, либо альфа-частицами, протонами или гамма-квантами, возникающими при захвате медленных нейтронов ядрами ^{10}B , ^3He , ^{113}Cd . Эти вещества вводят в газ или стенки ионизационной камеры. Для исследования частиц, создающих малую плотность ионизации, используются ионизационные камеры с газовым усилением. Ионизационные камеры применяют также при исследовании космических лучей.

Импульсные ионизационные камеры широко используются в ядерной физике. Импульсные ионизационные камеры также применяются при исследовании альфа-распада ядер (измерение энергетических спектров альфа-частиц, детектирование слабых альфа-активностей) и при исследовании деления ядер (измерение энергетического распределения осколков спонтанного или вынужденного деления ядер, поиск новых спонтанно делящихся ядер).

Эффективность регистрации. Ионизационные камеры регистрируют заряженные частицы, попавшие в рабочий объем камеры, со 100%-ной эффективностью, если амплитуда импульса превышает порог регистрирующего устройства. Несколько сложнее определить эффективность, когда ионизационные камеры используются для регистрации гамма-квантов и нейтронов. Гамма-кванты можно зарегистрировать в камере по электронам, образующимся в результате рассеяния и поглощения гамма-квантов. Пробеги электронов в газе велики (средний пробег электрона с энергией 0,5 МэВ в воздухе при нормальных условиях составляет около 1,5 м), и поэтому камеры практически не используют для определения энергии гамма-квантов по электронам отдачи. При регистрации гамма-квантов чаще используют камеры в токовом режиме, где при определенных условиях ток оказывается пропорциональным энергии, поглощаемой в стенках камеры. При расчете эффективности основная сложность заключается в определении числа электронов, попадающих в рабочий объем камеры из ее стенок. Число электронов отдачи, которое образуется при взаимодействии γ -квантов с атомами газа, наполняющего камеру, обычно гораздо меньше.