



Лекция 5. РЕГИСТРАЦИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Дисциплина: Радиационные эффекты и современная спектроскопия твердого тела.

Преподаватель: Phd, и.о. доцента Мархабаева А.А.



Цель лекции: Изучить физические принципы регистрации и измерения ионизирующих излучений, рассмотреть типы детекторов, методы их работы и характеристики, а также области применения различных систем регистрации в научных, медицинских и технических целях.

Основные вопросы лекции

- Принцип регистрации ионизирующих излучений.
- Основные типы детекторов: ионизационные, сцинтилляционные, полупроводниковые.
- Газоразрядные приборы: ионизационные камеры, счетчики Гейгера–Мюллера.
- Сцинтилляционные счетчики и фотоэлектронные умножители.
- Полупроводниковые детекторы (Si, Ge, CdTe).
- Характеристики детекторов: чувствительность, эффективность, разрешающая способность.
- Системы регистрации и спектрометрии.
- Области применения методов регистрации.



Принципы работы и основные характеристики ионизационной камеры. Ионизационная камера, прибор для исследования и регистрации ядерных частиц и излучении, действие которого основано на способности быстрых заряженных частиц вызывать ионизацию газа.

Ионизационной камерой измеряют или ионизационный ток, или заряды электричества, возникающие в газовом объёме. Для разделения разноимённых зарядов к газовому объёму прикладывают определённую разность потенциалов. Электрическое напряжение подают на элементы ионизационной камеры, называемые электродами. Они ограничивают рабочий объём ионизационной камеры, т.е. тот объём газа, через который протекает ионизационный ток.



При работе ионизационной камеры под напряжением в области плато ток насыщения J_n изменяется по линейному закону в зависимости от интенсивности излучения I . Пусть за единицу времени в каждой единице объема газа образуется $N=bE/\varepsilon$ ионных пар, где E - энергия частиц, b — доля энергии частицы, поглощаемая в единице объема газа, а ε энергия образования ионной пары. Так как рабочий объем конкретной камеры постоянен, то ток насыщения пропорционален интенсивности излучения I :

$$J_n = aI \quad (1.35)$$



Прежде чем выяснить особенности газового разряда в ионизационной камере, найдем связь ионизационного тока J с плотностью ионов N . Пусть в единице объема газа каждую секунду образуется N ионных пар. Часть ионных пар, αN^2 , рекомбинирует, а другая часть, $N - \alpha N^2 = N(1 - \alpha N)$, собирается на электродах. Умножив последнее произведение на элементарный заряд e и рабочий объем V , получим связь тока J с током насыщения $J_n = eNV$, плотностью ионов N и коэффициентом рекомбинации α в областях закона Ома и тока насыщения:

$$J = J_n(1 - \alpha N). \quad (1.36)$$

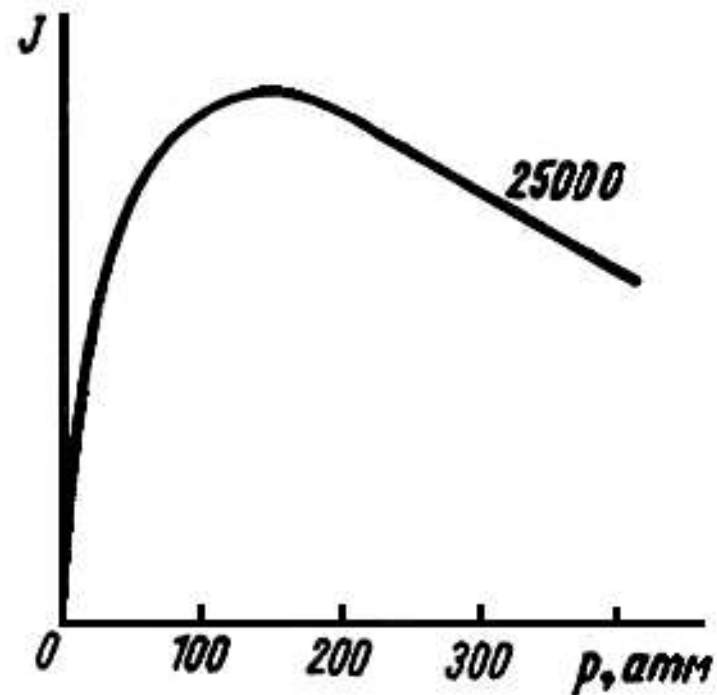


Рис. 1.5. Зависимость ионизационного тока от давления газа в ионизационной камере.



Количество ионов, образующихся в 1 см³ рабочего объема при прочих равных условиях (давлении, интенсивности излучения и т. д.), зависит от природы газа (от плотности атомных электронов газа, равной числу атомных электронов в 1 см³ газа, и от энергии образования ионной пары). При одних и тех же давлении и объеме газа ионизационный ток в ионизационной камере, наполненной аргоном ($Z=18$, $\epsilon=27$ эВ), выше, чем в ионизационной камере, наполненной азотом ($Z = 7$, $\epsilon = 32$ эВ). Средняя скорость теплового движения молекул и ионов в газе пропорциональна температуре. Нагревание газа вызывает более интенсивное тепловое движение ионов, и рекомбинация ионов возрастает. В режиме насыщения этот эффект мал, так как скорости движения ионов в направлении электрического поля намного превышают скорость теплового движения.

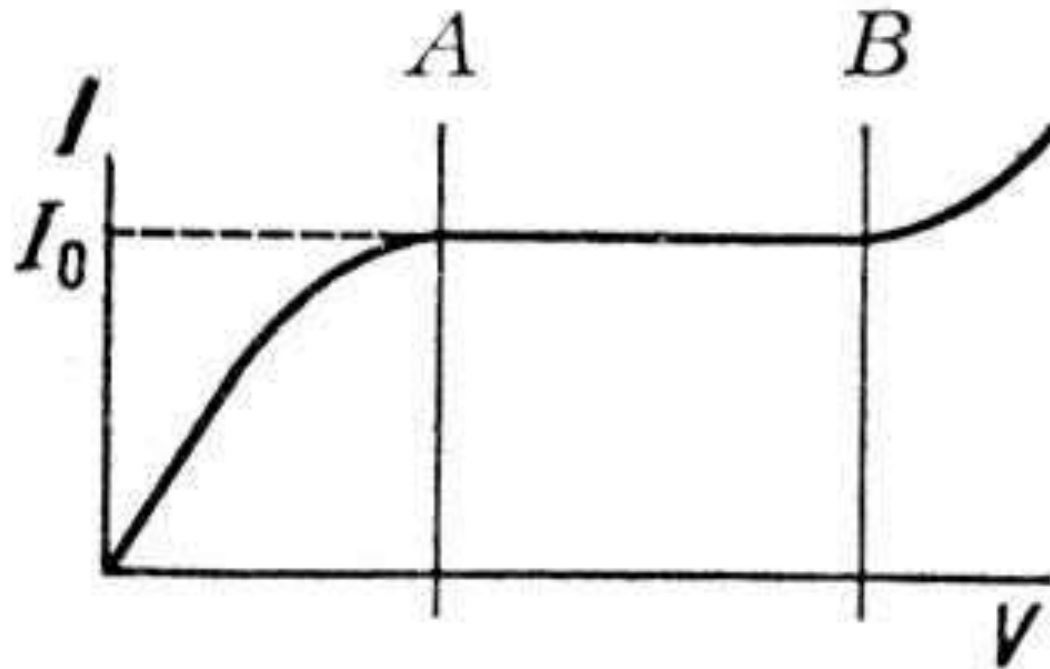


Рис. 1.6. Вольтамперная характеристика ионизационной камеры



В интегрирующих камерах при больших потоках частиц импульсы сливаются, и регистрируется ток пропорциональный среднему энерговыделению. В токовых ионизационных камерах гальванометром измеряется сила тока I , создаваемого электронами и ионами. Зависимость I от V — вольтамперная характеристика импульсной камеры - имеет горизонтальный участок AB , где ток не зависит от напряжения (ток насыщения I_0) (Рис. 1.6). Это соответствует полному собиранию на электродах ионизационной камере всех образовавшихся электронов и ионов. Участок AB обычно является рабочей областью камеры. Токовые ионизационные камеры дают сведения об общем интегральном количестве ионов, образовавшихся в 1 сек. Они обычно используются для измерения интенсивности излучений и для дозиметрических измерений. Так как ионизационные токи в камере обычно малы (10^{-10} — 10^{-15} а), то они усиливаются с помощью усилителей постоянного тока обеспечивают наилучшие условия для регистрации определённого вида излучения.



Пропорциональный счётчик.

Пропорциональный счётчик, газоразрядный прибор для регистрации ионизирующих излучений, создающий сигнал, амплитуда которого пропорциональна энергии регистрируемой частицы, теряемой в его объеме на ионизацию.

Недостатком ионизационной камеры являются очень низкие токи. Этот недостаток ионизационной камеры преодолевается в ионизационных детекторах с газовым усилением, что даёт возможность регистрировать частицы с энергией <10 кэВ, в то время как сигналы от частиц таких энергий в ионизационных камерах «тонут» в шумах усилителя. Работа пропорционального счётчика основана на явлении газового усиления.



Газовое усиление это увеличение количества свободных зарядов в объёме детектора за счёт того, что первичные электроны на своём пути к аноду в больших электрических полях приобретают энергию достаточную для ударной ионизации нейтральных атомов рабочей среды детектора. Возникшие при этом новые электроны в свою очередь успевают приобрести энергию достаточную для ионизации ударом. Таким образом, к аноду будет двигаться нарастающая электронная лавина. Это «самоусиление» электронного тока (коэффициент газового усиления) может достигать 10^3 - 10^4 . Такой режим работы отвечает *пропорциональному счётчику (камере)*.

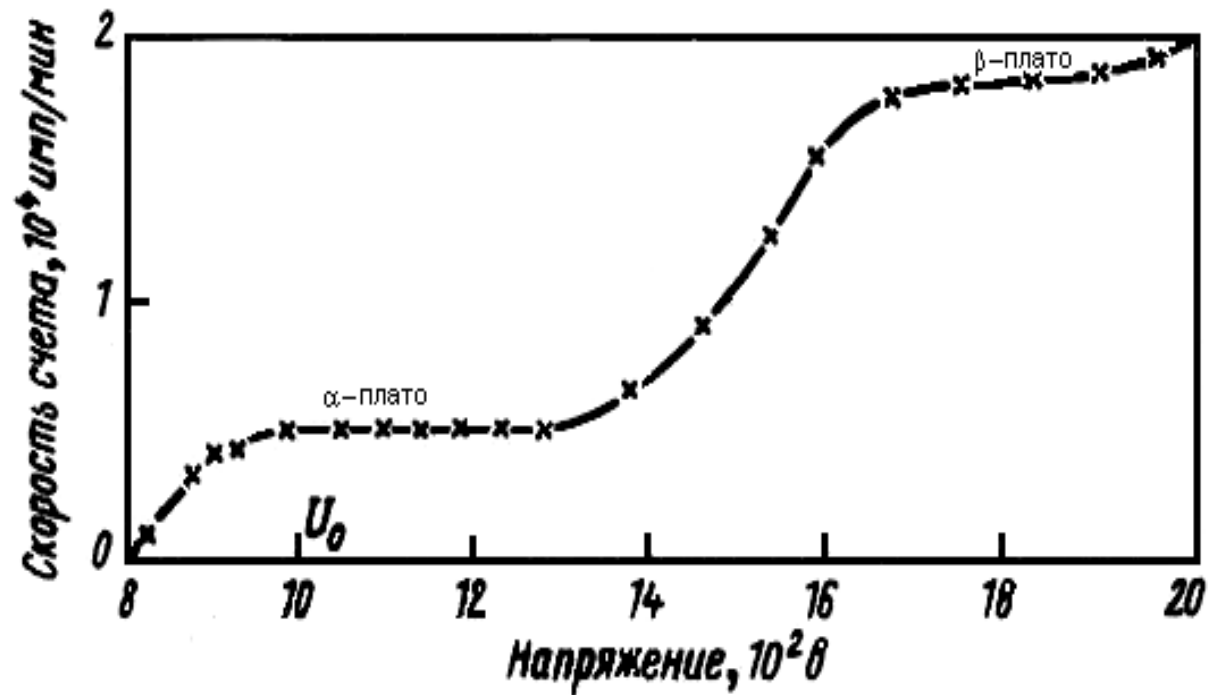


Рис.1.7. Счётная характеристика пропорционального счётчика, полученная с комбинированным источником β и α -частиц.



Отношение числа ионов n , образовавшихся в результате газового усиления, к первоначальному числу ионов n_0 , образованных частицей, называется коэффициентом газового усиления M

$$M = \frac{n}{n_0} \quad (1.37)$$

Для практических целей значение коэффициента газового усиления варьируется в пределах $10 \leq M \leq 10000$. Коэффициент M выбирается в зависимости от энергии частицы, рода работы (счёт или измерение энергии) и оптимального соотношения сигнал-шум. При измерении энергии величину M стремятся брать по возможности меньше, т.к. в этом случае напряжение на счётчике соответствует более пологому участку его вольт-амперной характеристики и не требуется слишком высокая стабильность напряжения от источника питания. При счёте частиц высокая стабильность напряжения не нужна, и можно использовать высокие значения M , включая и область ограниченной пропорциональности.

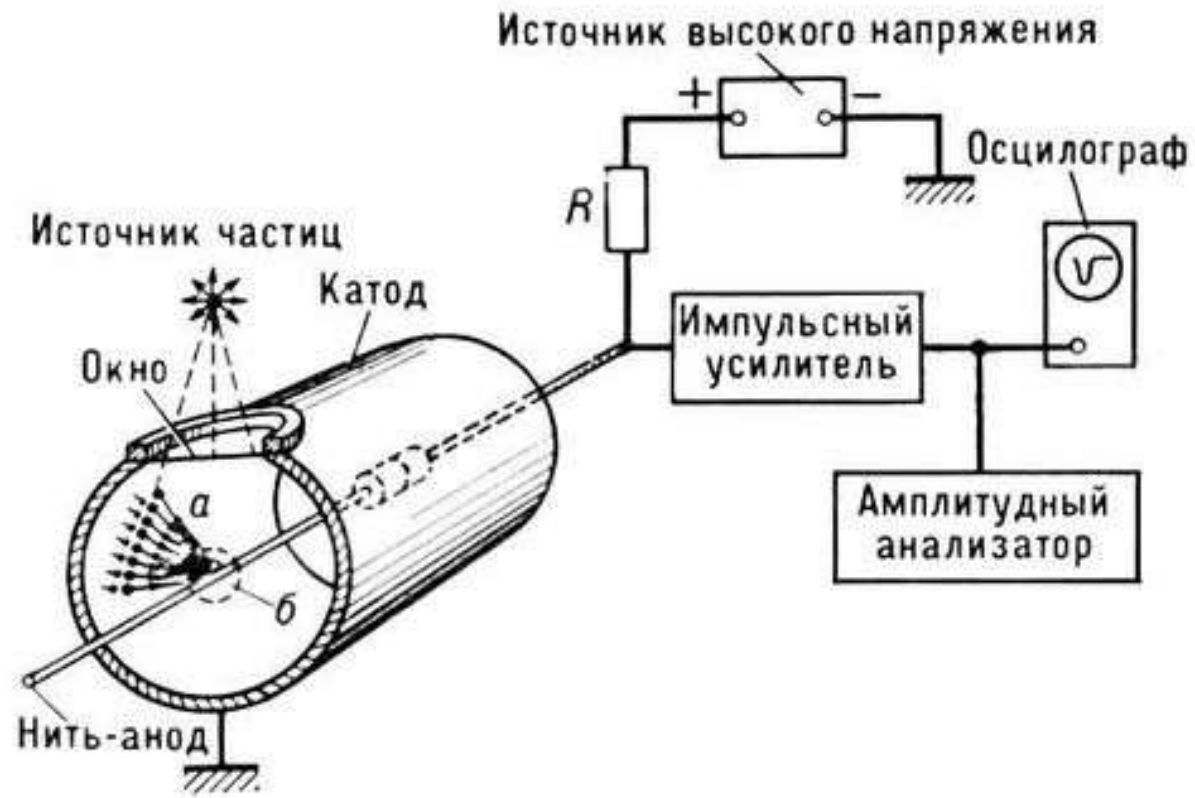


Рис. 1.8. Схема пропорционального счетчика:
а — область дрейфа электронов; б — область газового усиления.



При прохождении гамма-кванта через рабочий объем счетчика он создает вторичный электрон в результате фотоэффекта и эффекта образования пар. Однако для гамма-квантов малых энергий имеет значение только фотоэффект (пороговая энергия для эффекта образования пар равна 1.01 МэВ). Сечение фотоэффекта увеличивается с увеличением атомного номера вещества как Z^5 . Поэтому, для увеличения эффективности регистрации фотонов, необходимо счетчик наполнять газом с большим Z (криптон или ксенон).

Поскольку пропорциональные счетчики используются в основном для измерения излучения малых энергий (порядка десятков килоэлектронвольт), то определенные требования предъявляются к материалу окна, пропускающего излучение в рабочий объем счетчика. Материал окна выбирается таким, чтобы поглощение в нем для исследуемого диапазона энергий было минимальным. Типичным пропорциональным счётчиком является детектор с бериллиевым окном толщиной 70 мкм, наполненный смесью газов 90% Хе + 10% СН₄ до общего давления $P = 0,8$ атм. Такой счётчик имеет почти 100% эффективность при энергии γ -квантов 10 кэВ.

При регистрации нейтронов пропорциональные счетчики заполняются газами He^3 или BF_3 .



Эффективное сечение последней реакции для тепловых нейтронов очень велико.

Нейтроны регистрируются с помощью заряженных частиц, возникающих в результате этих реакций и вызывающих ионизацию в счетчике. Вероятность регистрации быстрых нейтронов значительно меньше, чем медленных, и эффективности счетчиков быстрых нейтронов не превышают долей процента.



Вопросы для контроля изучаемого материала

1. Что такое ионизационная камера и за счёт какого явления она регистрирует излучение?
2. Что называется рабочим объёмом ионизационной камеры и как он формируется электродами?
3. Объясните смысл тока насыщения. Почему рабочую точку выбирают на «плато» вольт-амперной характеристики?
4. Как связаны ток насыщения и интенсивность излучения I (укажите пропорциональность)?
5. Почему при повышении напряжения рекомбинация ионов уменьшается?
6. Выведите физический смысл множителей в выражении $J = J_n(1 - \alpha N)$
7. Как давление газа влияет на положение и ширину области насыщения и форму J - V характеристики?
8. Почему зависимость тока от давления имеет максимум; чем он обусловлен?
9. Как природа газа (Z , энергия образования пары ϵ) влияет на чувствительность камеры (пример: Ar vs N_2)?
10. Как температура газа влияет на рекомбинацию и почему эффект мал в режиме насыщения?



Рекомендуемая литература:

1. Михайлов М. Н. Основы радиационной физики и дозиметрии. СПб.: БХВ-Петербург, 2013.
2. Кузнецов С. В. Физика ионизирующих излучений. М.: Академия, 2018.
3. Тихонов В. Н. Детекторы ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 2007.
4. Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement, 4th ed. Wiley, 2010.
5. Leo W. R. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. Springer, 1994.