

1.5. Ионизационный метод регистрации ионизирующего излучения

1.5.1. Физические основы обнаружения излучений

Методы обнаружения излучения, которым сопровождаются естественная или искусственная радиоактивность и ядерные реакции, а также космических лучей основаны на явлениях взаимодействия излучения с облучаемым веществом. Различаются **первичные** и **вторичные** взаимодействия. **Первичные взаимодействия** вызываются частицами, обладающими электрическим зарядом, **вторичные** – нейтральными частицами и гамма-излучением.

Причиной первичного взаимодействия могут быть, таким образом, альфа- и бета-излучения природных или искусственных радиоактивных веществ, протоны, дейтроны и позитроны, испускаемые искусственными радиоактивными изотопами, и заряженные частицы космических лучей. Эти частицы при прохождении через вещество отдают свою кинетическую энергию непосредственно электронам облучаемого вещества (вторичные электроны).

Вторичные взаимодействия вызываются γ -лучами природных или искусственных радиоактивных веществ, нейтронным излучением, сопровождающим ядерные реакции, а также нейтральными частицами космических лучей. Гамма-лучи в зависимости от их жесткости приводят к образованию фотоэлектронов, комптоновских электронов или электронно-позитронных пар. Нейтральные частицы, обладающие высокой кинетической энергией, при столкновении с ядрами атомов передают часть своей энергии этим ядрам (ядра отдачи). Для их обнаружения особенно пригодны водород и его соединения; быстрая нейтральная частица, сталкиваясь с ядром атома водорода (протоном), выбивает его из атома. Нейтральные частицы (особенно нейтроны) могут также вызывать различные ядерные реакции, первичные продукты которых содержат по меньшей мере одну заряженную частицу или же распадаются с образованием вторичных продуктов, содержащих заряженные частицы. Вторичные заряженные частицы вызывают такое же взаимодействие, как и первичное излучение; эти частицы передают свою кинетическую энергию электронам облучаемого вещества (третичные электроны).

В зависимости от физических и физико-химических свойств облучаемого вещества вторичные электроны (при первичных взаимодействиях) или третичные электроны (при вторичных взаимодействиях) характеризуются различным поведением и вызывают различные эффекты. Они либо покидают атомы или молекулы, в состав которых ранее входили, либо остаются в них и переходят на более высокие энергетические уровни, с которых возвращаются в основное состояние с освобождением избыточной энергии. При непосредственном или косвенном удалении электронов из атома или молекулы в результате облучения могут наблюдаться различные эффекты. В газах – преимущественно ионизация и реже химические изменения; в жидкостях – диссоциация, приводящая к повышению проводимости и одновременно к химическим изменениям; в твердых телах – химические изменения или переброс электронов в полосу проводимости или испускание вторичных электронов. Если электрон переходит на более высокий энергетический уровень, оставаясь в атоме или молекуле, то эффекты во всех трех агрегатных состояниях одинаковы. Электрон либо возвращается в результате испускания одного или нескольких фотонов в основное состояние (люминесценция), либо с более высокого энергетического уровня возвращается в основное состояние, и при этом повышается энергия колебаний и возрастает тепловая энергия атома, молекулы или кристаллической решетки (нагревание). Иногда различные процессы происходят одновременно. Все используемые в настоящее время детекторы радиоактивного излучения по своему принципу основываются на одном из перечисленных выше первичных или вторичных взаимодействий. Важнейшими из них являются **детекторы, основанные на ионизации газов**:

- а) ионизационные камеры (без газового усиления);
- б) пропорциональные счетчики (со слабым или средним газовым усилением);
- в) счетчики Гейгера – Мюллера (с сильным газовым усилением);
- г) искровые счетчики (с чрезвычайно сильным газовым усилением, приводящим к образованию искр);
- д) камеры Вильсона и диффузионные камеры (с конденсацией капелек жидкости на ионах вдоль траектории движения частицы).

Чрезвычайно широко распространены также детекторы, в которых используется эффект люминесценции – сцинтилляционные счетчики. В них световые вспышки, образующиеся в результате люминесценции облучаемого вещества (сцинтилляции), преобразуются с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) в электрические импульсы. В этих детекторах применяются люминесцирующие газы, растворы, пластические материалы, органические и неорганические кристаллы. К этой же группе косвенно относятся и счетчики Черенкова.

К числу детекторов, в которых используются химические изменения входящих в них веществ, вызываемые радиоактивным излучением, относятся:

- а) химические дозиметры (химические реакции в жидкостях, изменение рН и проводимости);
- б) фотоэмульсии (выделение зерен серебра вдоль траектории частицы);
- в) специальные виды стекол или кристаллы (образование центров окраски, люминесцирующих центров или обесцвечивание).

К детекторам, в которых происходит переброс электронов в полосу проводимости, относятся:

- а) кристаллические счетчики, дающие под действием излучения импульсы тока (если детектор выполнен из изолирующего материала);

б) фоторезистора, изменяющие под действием излучения свое сопротивление (если детектор выполнен из полупроводника).

К детекторам, основанным на использовании нагрева в результате воздействия радиоактивного излучения, относятся:

а) калориметрические детекторы, в которых используется непосредственный нагрев тела излучением;

б) термоэлементы, или термоэлектрические батареи, в которых чувствительный слой нагревается в результате ядерных реакций;

в) пузырьковые камеры с жидкостями, в которых местный перегрев вдоль траектории частицы приводит к образованию пузырьков пара или растворенного в жидкости газа.

Одним из широко распространенных методов регистрации является **ионизационный**.

Известно, что при обычном давлении и температуре газы являются диэлектриками, т. е. состоят из электрически нейтральных молекул и не могут проводить электрический ток. При попадании в газ радиоактивной частицы или кванта происходит процесс ионизации, т. е. атомы и молекулы газа (часть или все) превращаются в отрицательные и положительные ионы и появляются свободные электроны. Если в газе нет электрического поля, то ионы и электроны участвуют только в беспорядочном движении. Ионы, сталкиваясь с молекулами газа, изменяют направление своего движения. В результате многочисленных столкновений с молекулами ионы движутся хаотично в объеме газа. Ионы сталкиваются не только с молекулами газа, но и между собой и с электронами. При этих столкновениях происходит процесс рекомбинации, в котором положительные ионы, присоединяя недостающие электроны, превращаются в нейтральные атомы и молекулы. Аналогичный процесс превращения в нейтральные атомы и молекулы происходит и с отрицательными ионами, которые отдают излишек электронов. Следовательно, рекомбинация изменяет число пар ионов и электронов в газе.

Еще один процесс, помогающий рекомбинировать ионам, – это диффузия, т. е. положительные и отрицательные ионы, участвуя в тепловом движении, перемещаются по всем направлениям в газе. Если плотность ионов в газе неравномерна, то происходит перетечка ионов между различными частями объема. Перетечки ионов выравнивают плотность ионов в газе. Этот процесс равномерного распределения ионов в некотором объеме газа называют **диффузией**. В процессе диффузии ионы испытывают дополнительные столкновения между собой и рекомбинируют.

Если же газ, через который проходит излучение, поместить в какую-либо камеру, имеющую два электрода, а к электродам подвести постоянное напряжение от некоторого источника тока, то движение ионов и свободных электронов станет направленным. Положительные ионы будут двигаться к отрицательному электроду (катоде), а отрицательные ионы и электроны – к положительному электроду (аноду).

Направленное движение электрических зарядов под действием электрического поля носит название **электрического тока**, т. е. внутри камеры возникает электрический ток, который может быть зарегистрирован. Такой ток называют **ионизационным**. Величина тока служит мерой интенсивности излучения (количества излучения). Протекание тока наблюдается до тех пор, пока на газ действует излучение. Если излучения не будет, то тока в камере не будет, так как газ станет изолятором.

Следовательно, основой ионизационного метода регистрации излучений и счета отдельных ядерных частиц является **появление электропроводности в газе**.

Прохождение электрического (ионизационного) тока через газы, сопровождающееся совокупностью электрических, оптических и тепловых явлений, называют **газовым разрядом**.

Газовый разряд определяется свойствами газа, зависит от материала катода, величины межэлектродного расстояния, напряжения на электродах, типа частиц и их энергии, активности источника, наличия магнитного поля и других факторов.

1.5.2. Вольт-амперная характеристика газового разряда

Существует зависимость между приложенным к электродам напряжением и ионизационным током при постоянной интенсивности излучения. Эта зависимость называется **вольт-амперной характеристикой** газового разряда.

По оси абсцисс отложено напряжение, подаваемое на электроды, а по оси ординат – величина ионизационного тока (рис. 18).

Сложная зависимость тока от напряжения связана с особенностью физических процессов, протекающих в газе при движении ионов и свободных электронов в межэлектродном пространстве. Для понимания сущности этих процессов характеристика разбита на семь участков.

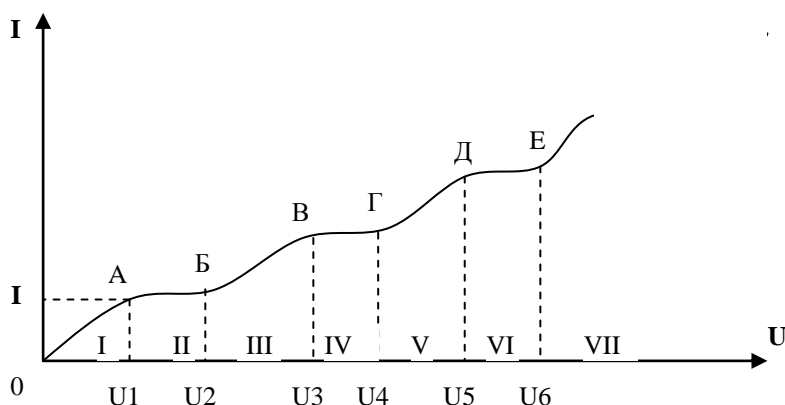


Рис. 18. Вольтамперная характеристика газового разряда

На первом участке (0–А) в интервале напряжений от 0 до U_1 ток пропорционален напряжению. Этот участок называют **областью закона Ома**.

В этой области не все ионы, образованные в газе, достигают электродов. Часть ионов, двигаясь в газе, рекомбинирует.

С увеличением напряжения растет скорость направленного движения ионов и электронов, поэтому вероятность рекомбинации уменьшается и на электроды попадает все больше ионов и электронов. Однако с дальнейшим увеличением напряжения рост тока постепенно начинает замедляться и, наконец, наступает такой момент, когда с увеличением напряжения ток дальше не растет.

Это говорит о том, что почти все образующиеся в газовом объеме ионы и электроны попадают на электроды. Ток при этом достигает постоянной величины и носит название тока насыщения (участок А–Б) в интервале напряжений от U_1 до U_2 , т. е. ток практически постоянен, хотя кривая тока все же имеет небольшой подъем, вызванный небольшой рекомбинацией и другими второстепенными факторами. Этот участок носит название **области ионизационной камеры** (области насыщения). На этом участке число ионов пропорционально интенсивности излучения, а следовательно, и активности источника. Здесь ток насыщения обусловлен только первичной ионизацией (т. е. зависит только от энергии самой частицы).

В области насыщения кинетическая энергия, получаемая ионами и электронами от электрического поля, еще недостаточна для ионизации молекул.

По мере дальнейшего увеличения напряжения, где U больше U_2 , легкоподвижные электроны ускоряются до такой кинетической энергии, которой хватает для ионизации встречных молекул. Это третий участок III (участок Б–В). Эту ионизацию в отличие от первичной называют **вторичной**, или **ударной**, ионизацией.

Электроны вторичной ионизации вместе с электронами первичной в последующих столкновениях ионизируют другие молекулы. Таким образом, происходит лавинообразное размножение электронов и ионов. В создании ионизационного тока теперь принимают участие:

- 1) электроны и ионы, образованные частицей;
- 2) электроны и ионы, образованные от первичных электронов.

Наращение количества ионов и электронов (размножение), вызванное ударной ионизацией, называют **газовым усилением**. Для его характеристики используют понятие **коэффициента газового усиления**. Это отношение числа электронов, образовавшихся в результате газового усиления, к первичным электронам, образовавшимся от самой частички:

$$K = \frac{N}{n},$$

где N – число электронов в лавине;

n – число первичных электронов.

Эта область носит название **пропорциональной**, так как несмотря на то, что число частиц в результате ударной ионизации и возрастает во много раз, оно все же остается пропорциональным первичному числу электронов. Третий участок (Б–В) обычно относят к пропорциональной области. Коэффициент газового усиления здесь составляет 10^3 – 10^4 раз.

Четвертый участок (В–Г) отвечает условиям, при которых как первичные, так и вторичные ионы и электроны достигают электродов. С увеличением напряжения в пределах плато (В–Г) увеличивается только скорость ионов и электронов, но не их количество, поэтому величина тока практически не меняется.

Если за область В–Г увеличивать напряжение, то газовое усиление возрастает настолько, что пропорциональность не соблюдается, хотя величина ионизационного тока все еще зависит от энергии ионизирующей частицы. Это пятая область (Г–Д) с напряжениями от U_4 до U_5 . Она носит название **области ограниченной пропорциональности** с коэффициентом усиления 10^5 – 10^6 раз.

При увеличении напряжения выше точки Д (область Д–Е) каждая попавшая в детектор частица вызывает лавинный разряд. Причем величина этого разряда зависит не от числа первичных ионов или электронов или

вида излучения, а только от напряжения между электродами. Это **область Гейгера**. Отличие этой области заключается в том, что газовый разряд в ней самостоятельный, т. е. появление хотя бы одного электрона вызывает вспышку самостоятельного разряда.

Развитию самостоятельного разряда способствует то, что в первичной лавине из-за возбуждения атомов и молекул газа возникает ультрафиолетовое излучение. Попадая на катод в результате фотоэффекта, они выбивают из него электроны, которые в свою очередь создают новые электронно-ионные лавины, таким образом газовый разряд сам поддерживается и развивается.

Если напряжение перенести за точку Е (седьмой участок), то в детекторе начнется самостоятельный разряд, возникающий уже без наличия ионизирующего излучения. Напряженность электрического поля возрастает настолько, что происходит вырывание электронов из катода и детектор быстро выходит из строя. Это **область непрерывного**, или **стационарного коронного, разряда**.

Таким образом, существует несколько областей газового разряда для применения их при ионизационном методе регистрации ионизирующих излучений:

АБ – ионизационные камеры;

БГ – пропорциональные счетчики;

ДЕ – счетчики Гейгера – Мюллера.

В области ГД счетчиков не существует.