

# Радиационная безопасность территории

## Лекция № 6.

# МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИАЦИОННО- ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА



Лащёнова Татьяна Николаевна  
Д-р биол.наук, канд.хим. наук,  
Профессор экологического факультета РУДН

**РАДИОМЕТРИЯ** (от латинского radio - излучаю и греческого metro- измеряю), регистрация с помощью радиометрических приборов излучений, испускаемых ядрами радионуклидов. Основана на различных эффектах взаимодействия излучения с веществом (ионизация, люминесценция, излучение Черенкова - Вавилова, образование треков в прозрачных средах, тепловое действие излучения, воздействие на фотографические материалы и др.).

**Радиометрические приборы** состоят из детекторов, в которых происходит преобразование энергии излучения в электрическую или другие сигналы, и регистрирующих устройств.

**Детекторы** могут быть ионизационными, сцинтилляционными, трековыми и др., в зависимости от того, на каком из эффектов основано их действие. По агрегатному состоянию рабочего тела различают газонаполненные, жидкостные, твердотельные детекторы; по типу регистрируемого излучения - детекторы  $\alpha$ -частиц,  $\beta$ -частиц,  $\gamma$ -квантов, нейтронов.

# Методы определения радионуклидов в объектах окружающей среды

## Гамма-спектрометрия

**Гамма спектрометрия** является одним из наиболее популярных методов проведения радиационного контроля.

Преимущество метода - нет предварительного радиохимического выделения и концентрирование радионуклидов.

Для гамма-спектрометрии в радиационном контроле применяются полупроводниковые детекторы двух типов:

- Германиево-литиевые диффузионно-дрейфовые детекторы, выполненные из чистого германия, в который для исключения примесной дырочной проводимости диффундированы атомы лития;
- Детекторы из особо чистого германия.

**Для германиево-литиевого детектора** рабочая область измерения гамма квантов лежит выше 100 кэВ, а амплитудное разрешение составляет примерно 0,1% для линии  $^{137}\text{Cs}$  – 661 кэВ. Рабочий объем детекторов часто превышает 100 см<sup>3</sup>, это позволяет добиваться более высокой эффективности регистрации (в несколько процентов).

Это позволяет разделять практически все линии различных радионуклидов, кроме тех, у которых энергия фотонов меньше 100 кэВ ( $^{151}\text{Sm}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$  и др.).

Эффективность регистрации фотонов зависит: от размера детектора и применяемого сосуда для жидких или твердых проб, а также энергии гамма-кванта.

**Детекторы из особо чистого германия** изготавливаются планарными с поверхностью до нескольких десятков см<sup>2</sup> и толщиной чувствительного объема 1-2 см. Рабочая область измерения начинается примерно с 5 кэВ, вследствие чего даже такая относительно небольшая толщина детектора обеспечивает высокую эффективность регистрации падающих нормально к поверхности фотонов.

Энергетическое разрешение детекторов хуже, чем у германиево-литиевых детекторов и составляет при 5 кэВ около 10%, 120 кэВ – около 0,6% и лишь при энергии в 1000 кэВ уменьшается до 0,15%.

Чувствительность определения радионуклидов с помощью полупроводниковых гамма-спектрометров зависит от ряда факторов: эффективности регистрации фотонов; интенсивности гамма-линии, по которой проводится регистрация; времени измерения; уровня фона.

# Методы определения радионуклидов в объектах окружающей среды

## Альфа-спектрометрия

Альфа-спектрометрия имеет ряд особенностей:

- необходимо использовать очень тонкие образцы, это требует высокой квалификации персонала и специальное оборудование;
- предварительного разделения радионуклидов за счет радиохимического выделения изотопов.

При этом факторами ухудшающими амплитудное разрешение являются:

- Толщина образца, которая должна быть меньше  $1 \text{ мг/см}^2$ ;
- Плохой вакуум в измерительной камере больше  $1 \text{ мм}$  ртутного столба;
- Большая площадь детектора (разрешение ухудшается при диаметре больше  $1 \text{ см}$ ).

Варианты выделения: электролитическое выделение радионуклида из раствора и осаждение на полированной мишени из нержавеющей стали; соосаждение радионуклида (используют гидроксид трехвалентного железа, органические соединения) с последующим отделением ультрафильтрацией на мембранах формированием слоя меньше  $1 \text{ мг/см}^2$ .



Портативный бета-спектрометр «Спутник-бета».



Альфа-спектрометр полупроводниковый "Мультирад-АС"



Портативный гамма-спектрометр «СПУТНИК-ГАММА»

# Низкофоновый гамма-спектрометр CANBERRA

Содержание гамма-излучателей определяют с помощью спектрометра на основе HP Ge детектора с относительной эффективностью 100%,

Уровни чувствительности:

по альфа-излучателям -  $< 10^{-4}$  Бк/л,

по гамма/бета-излучателям -  $< 10^{-3}$  Бк/л.



# Низкофоновый жидкостной сцинтиляционный анализатор TRI-CARB 2550

бета- и альфа-излучатели – на жидкосцинтиляционном спектрометре  
TRI-CARB 2550 TR/AB (Canberra-Packard, США).



# Основные характеристики

- Минимальное детектируемое значение объемной активности по  $^{137}\text{Cs}$  (с погрешностью не превышающей 30% при доверительной вероятности  $P=0.95$ ) при объеме пробы 100 л составляет:
- $1.5 \cdot 10^{-3}$  Бк/л - при времени измерения 3 часа, и  $5 \cdot 10^{-4}$  Бк/л - при времени измерения 16 часов.



# Сцинтилляционный спектрометр «Прогресс»



- Содержание природных  $^{226}\text{Ra}$ ,
- $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и техногенного  $^{137}\text{Cs}$  определяют на гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором, кристалл  $\text{NaI}(\text{TI})$   $100 \times 150$  мм со свинцовым колодцем (ВНИИФТРИ, Россия).
- Энергетический диапазон 300-3000 кэВ.
- Время измерения – 3600 с.
- Погрешность измерения составила 30-50%.
- Нижний предел определения активности радионуклидов, Бк/кг:
- $^{137}\text{Cs}$  - 1,5,  $^{226}\text{Ra}$  - 5,  $^{232}\text{Th}$  - 5,  $^{40}\text{K}$  - 40.
- Геометрия сосуда для измерений - пластмассовый стакан диаметром 50 мм, высотой 100 мм.

# Основные характеристики

- Для определения суммарной бета-активности водный раствор объемом 2 л концентрируют до сухих солей и далее проводят измерение.
- Для определения изотопного состава применяют радиохимическое выделение изотопов из проб большого объема (50-200 л) методом динамической сорбции с помощью селективных сорбентов:
- для выделения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{226}\text{Ra}$  - сорбент VS-15-M1 на основе полимерных волокон диаметром 35-40 мкм;
- для выделения  $^{137}\text{Cs}$  - сорбент «АНФЕЖ» - гранулы древесной целлюлозы, покрытые слоями сорбирующего вещества на основе ферроцианида железа-калия.

## Газовые ионизационные детекторы

Ионизационные методы регистрации основаны на измерении заряда и тока, создаваемого заряженными частицами при прохождении газового детектора.

Заряд, созданный частицей, будет определяться ее ионизационными потерями в газе детектора. Поэтому очень важно знать, какая энергия в среднем расходуется на создание одной пары ионов в том или ином газе и как эта средняя энергия зависит от природы и скорости заряженной частицы.

Средняя энергия, расходуемая на создание одной пары ион - электрон, слабо зависит от энергии заряженной частицы, от ее массы и заряда.

Различие в величине этой энергии для разных газов связано с различными значениями потенциалов ионизации и различной структурой уровней возбуждения атомов газа.

Таким образом, измеряя в газовых ионизационных детекторах количество созданных пар ионов, можно легко определить энергию, затраченную частицей на ионизацию газового промежутка детектора. Это позволяет использовать газовые ионизационные детекторы для спектрометрических целей.

С помощью газовых ионизационных детекторов можно определить и интенсивность, и энергетический спектр исследуемого потока заряженных частиц.

**Газовые 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.

Детектор в виде цилиндрического конденсатора, который состоит из металлической или металлизированной изнутри стеклянной трубки 1 и тонкой металлической нити 2, натянутой по оси цилиндра. Детектор наполнен аргоном, нить служит анодом, а внутренняя поверхность цилиндра - катодом.

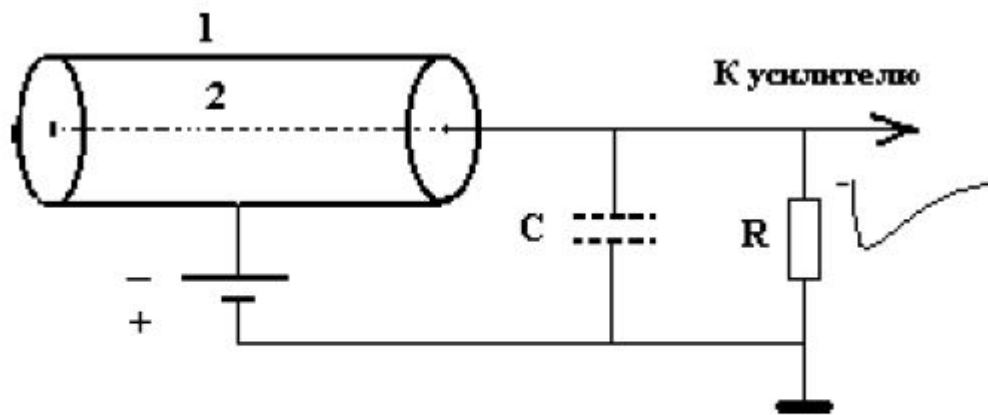


Рис. 1. Принципиальная схема включения ионизационного детектора:  
1 - цилиндрический катод; 2 - анод (металлическая нить)

$R$  - сопротивление утечки, а  $C$  - распределенная емкость, которая включает в себя межэлектродную емкость конденсатора, емкость монтажа и входную емкость усилителя.

При прохождении заряженных частиц через объем детектора в результате ионизации образуются электроны и ионы, которые под действием электрического поля двигаются (дрейфуют) к соответствующим электродам. Во время движения электронов и ионов во внешней цепи индуцируется ток, заряжающий емкость  $C$ . Если выбрать сопротивление утечки  $R$  настолько большим, чтобы за время зарядки емкости  $C$  током она не разрядилась, то величина амплитуды  $A$  возникающего при этом импульса будет определяться величиной заряда  $Q$ , созданного в объеме детектора,  $A = Q/C$ .

## Вольт-амперная (амплитудная) характеристика

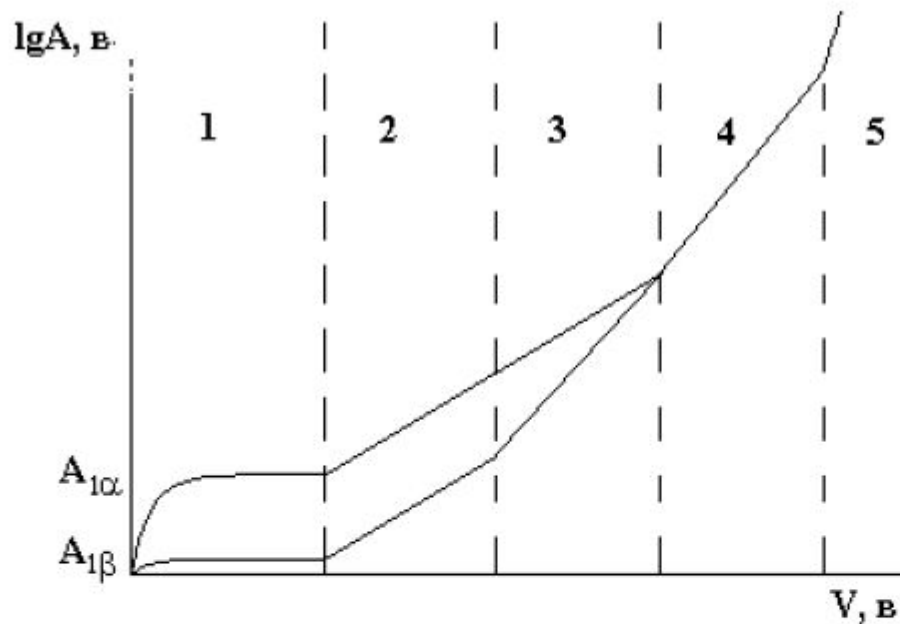


Рис. 2. Зависимость амплитуды импульса  $A$  от напряжения на детекторе  $V$ . Вертикальные штриховые линии подразделяют амплитудную характеристику на несколько областей: 1- область ионизационной камеры; 2 - область пропорционального счетчика; 3 - область ограниченной пропорциональности; 4 - область Гейгера-Мюллера. Кривая  $\alpha$ - амплитудная характеристика при регистрации  $\alpha$ -частиц, кривая  $\beta$  - при регистрации  $\beta$ -частиц.

При малых напряженностях электрического поля величина заряда, созданного в объеме детектора регистрируемой частицей, а, следовательно, и величина импульса  $A$  определяется начальным числом пар ионов, образованных частицей (рис.2, область 1).

Начальный рост амплитудной характеристики в этой области обусловлен неполным собиранием образованных регистрируемой частицей ионов из-за их рекомбинации. С ростом напряженности электрического поля вероятность рекомбинации уменьшается, и все заряды, образованные в детекторе, собираются на электродах. Этот участок кривой называют областью работы ионизационной камеры или областью насыщения. Величина импульса в этой области определяется только начальным числом пар ионов  $n_0$ , созданных частицей.

$$A_1 = n_0 e / C,$$

где  $e$  - заряд электрона, а  $C$  - эквивалентная емкость детектора и монтажа.

Частицы разной ионизирующей способности (например,  $\alpha$ -частицы и  $\beta$ -частицы) создают в детекторе разное число пар ионов и, соответственно, разные по величине импульсы.

Таким образом, детектор, работающий в режиме ионизационной камеры, может быть использован для определения ионизирующей способности частиц.

При повышении напряженности поля дрейфующие к аноду электроны между соударениями с молекулами газа могут приобрести энергию, достаточную для ионизации этих молекул. Возникает вторичная ионизация. Если каждый из  $n_0$  созданных регистрируемой частицей электронов в свою очередь образует в среднем  $k$  вторичных электронов, то полное число образовавшихся электронов будет  $k \cdot n_0$ . Следовательно, величина импульса остается пропорциональной начальной ионизации:

$$A_2 = \frac{n_0 \cdot e}{C} \cdot k(V)$$

Коэффициент газового усиления  $k(V)$  растет с увеличением  $V$  и не зависит от  $n_0$ . Рост величины импульса от напряжения за счет газового усиления, используется в пропорциональных счетчиках.

Область 2 - область работы пропорционального счетчика.

Пропорциональные счетчики применяются для тех же целей, что и ионизационные камеры, но наличие газового усиления позволяет использовать для регистрации импульсов усилители с меньшим коэффициентом усиления.

Поэтому в настоящее время пропорциональные счетчики получили очень широкое распространение в научных лабораториях мира.

При дальнейшем увеличении напряжения на детекторе пропорциональность  $A \sim p_0$  нарушается, так как появляются дополнительные электроны – пф. Это фотоэлектроны от взаимодействия фотонов характеристического излучения возбужденных молекул газа. Поэтому область 3 амплитудной характеристики называется областью ограниченной пропорциональности.

При дальнейшем увеличении напряжения (область 4)  $p_f \gg p_0$ , и величина импульса становится независимой от первичной ионизации, возникает самостоятельный разряд.

Для возникновения такого разряда достаточно появиться в детекторе хотя бы одной паре ионов. Заряд возрастает до величины, ограниченной характеристиками детектора и внешней цепи. Этот участок амплитудной характеристики – область 4 – называется областью Гейгера-Мюллера. В области Гейгера-Мюллера величина импульса достигает нескольких десятков вольт, поэтому детекторы, работающие в этой области, обладают высокой чувствительностью к ионизирующему излучению, хотя они не способны дифференцировать различные виды излучений.

Простота, дешевизна и надежность позволили им найти широкое распространение в различных областях науки и техники, как в стационарных, так и в полевых условиях. Газовый разряд в области Гейгера-Мюллера не может начинаться без внешнего ионизирующего воздействия. Это – вынужденный разряд.

При дальнейшем увеличении напряжения начинается самопроизвольный газовый разряд, возникающий без наличия ионизирующего излучения в детекторе (область 5). Напряженность поля при этом становится вполне достаточной, чтобы вырвать электроны из электродов, в результате чего возникает самопроизвольный разряд. При еще более высоких напряжениях начинается пробой газа.



# Импульсная ионизационная камера

Импульсные ионизационные камеры находят применение в тех случаях, где нужно определить ионизацию отдельных частиц или ионизацию, создаваемую потоком частиц. Например, в космических экспериментах, в которых ряды импульсных ионизационных камер чередуются со слоями поглотителя.

Конструкция, форма ионизационных камер обычно определяется задачами эксперимента. Встречаются плоские, цилиндрические и сферические ионизационные камеры.

Ионизационная камера представляет собой изолированный газовый объем, в котором расположены, в простейшем случае, два электрода. При подаче на электроды постоянного напряжения в пространстве между ними создается электрическое поле.

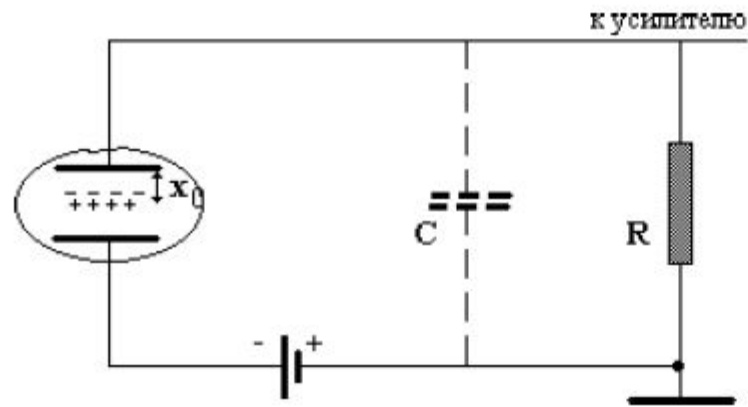


Рис.3. Принципиальная схема импульсной ионизационной камеры.

В ионизационной камере с плоскопараллельными электродами электрическое поле однородно. На рис.3 приведена принципиальная схема такой камеры. Заряженная частица, проходя через рабочий объем камеры, производит ионизацию атомов газа, в результате чего вдоль пути частицы образуются электроны и положительные ионы.

Под действием электрического поля электроны и ионы начинают двигаться к соответствующим электродам камеры, а во внешней цепи камеры индуцируется ток, заряжающий емкость камеры  $C$ . Зарядка емкости  $C$ , а вместе с ней и нарастание импульса напряжения на выходе камеры прекращаются, как только все электроны и ионы, созданные в газе камеры, достигнут соответствующих электродов. Наряду с этим происходит разрядка емкости  $C$  через сопротивление  $R$ , приводящая к спаду импульса напряжения на выходе камеры.



# Пропорциональные счетчики

Пропорциональный счетчик можно рассматривать как ионизационную камеру, работающую в импульсном режиме, чувствительность которой в  $M$  раз больше. Значение  $M$  в пропорциональных счетчиках может достигать  $10^2 - 10^4$ . При этом наряду с усилением импульсов сохраняется зависимость их амплитуды от энергии частицы, так как  $M$  практически не зависит от первичной ионизации.

Благодаря газовому усилению при помощи пропорциональных счетчиков можно считать частицы данного типа, пользуясь электронной аппаратурой с меньшим усилением, чем в случае импульсных ионизационных камер, и, следовательно, более простой. При помощи пропорциональных счетчиков можно зарегистрировать частицы меньших энергий, чем в случае камеры: при работе с камерами уровень шумов усилителя ограничивает величину регистрируемого импульса.

Зависимость величины импульсов от начальной ионизации позволяет дискриминировать излучения. Например, альфа-частицы можно легко считать в присутствии бета-частиц: импульсы бета-частиц имеют много меньшую амплитуду, и их легко можно отсортировать счетной системой.

Пропорциональные счетчики широко применяются в радиометрии. Для измерения абсолютной активности получили распространение проточные  $2\pi$ -счетчики и  $4\pi$ -счетчики, в которых препарат размещается внутри счетчика. При такой геометрии регистрируются либо все вылетающие частицы (телесный угол  $4\pi$ ), либо половина ( $2\pi$ ). Применение в спектрометрии ограничено тем, что треки длиннопробежных частиц не уместятся в счетчике.

# Газоразрядный счетчик Гейгера-Мюллера

После прохождения через объем счетчика заряженной частицы, в газе появляются электроны и ионы, которые дрейфуют к соответствующим электродам. Электроны достигают нити за время  $10^{-7}$ -  $10^{-8}$ с, образовав по пути новые электроны, ионы и возбуждив молекулы газа. Возбужденные молекулы, возвращаясь в нормальное состояние, испускают коротковолновое ультрафиолетовое излучение, которое может создавать фотоэлектроны в катоде счетчика и наполняющем газе. Вновь возникшие электроны также дрейфуют к аноду и, в свою очередь, создают новые лавины. Так как фотоны излучаются изотропно, то за очень короткое время весь счетчик будет охвачен разрядом.

Таким образом, повышение напряжения  $V$  приводит к распространению газового разряда по объему счетчика. При некотором напряжении  $V^{зак.}$ , называемом напряжением зажигания, газовый разряд охватывает весь объем счетчика. Амплитуда импульса перестает зависеть от начальной ионизации, так как каждый начальный электрон порождает огромное количество новых электронно-фотонных лавин, и вклад первичной ионизации в полный ионизационный ток становится пренебрежимо мал.

Для того чтобы счетчик мог регистрировать следующую частицу, разряд, зажженный предыдущей, должен быть погашен. По способу гашения разряда счетчики Гейгера-Мюллера подразделяют на [несамогасящиеся и самогасящиеся](#).



**Несамогасящиеся счетчики** обычно наполняют каким-либо инертным газом: аргоном, неоном и др. За время прохождения нескольких электронно-фотонных лавин образованные положительные ионы практически остаются на месте, так как их подвижность намного меньше подвижности электронов. В основном вторичная ионизация происходит вблизи анода, где напряженность поля больше, и поэтому вокруг нити образуется чехол положительных ионов, который снижает напряженность поля около нее, и поэтому образование новых электронно-фотонных лавин прекращается. Образовавшиеся ионы двигаются в направлении катода. По мере отхода их от анода электрическое поле около него восстанавливается, и снова становится возможной ударная ионизация. Обычно развитие лавины не возобновляется, если в объеме счетчика нет свободных электронов. Лишь через время  $T$ , когда положительные ионы достигают катода и там нейтрализуются, они могут вырывать свободные электроны из катода (если нейтрализованные молекулы остаются в возбужденном состоянии и их энергия возбуждения превышает работу выхода электронов из катода). Если при этом окажется, что напряжение на счетчике превышает  $V_{\text{зак}}$ , то начинается новая стадия разряда, которая длится до тех пор, пока ее не остановит новый положительный пространственный заряд вблизи анода, и т.д.

**Самогасящиеся счётчики** заполняются чистыми газами, напр. Ar, с добавкой (10%) многоатомного газа, в частности спирта. Многоатомные молекулы эффективно поглощают фотоны и блокируют механизм фотоэффекта- генерации электронов с поверхности катода, что обеспечивает самопроизвольное гашение разряда.

# Сцинтилляционный метод регистрации

## излучений

Поглощение энергии веществом и ее последующее испускание в виде видимого или ультрафиолетового излучения известно под названием люминесценции. **Сцинтилляцией** (от лат. scintillatio - мерцание) называется вспышка света, возникающая в среде, способной люминесцировать - люминофоре, или сцинтилляторе.

Люминофорами могут служить неорганические кристаллы (сульфиды, галогениды), ароматические углеводороды (нафталин, антрацен и т.д. - рис.) в кристаллическом состоянии или в растворе, благородные газы.

Сцинтилляционный метод регистрации ионизирующих частиц сводится к наблюдению и счету световых вспышек. Оптические свойства свечения (спектр излучения и продолжительность высвечивания) определяются при этом свойствами люминесцирующей среды, а интенсивность сцинтилляции - удельными ионизационными потерями. Отношение энергии образовавшихся фотонов к поглощенной в сцинтилляторе энергии ионизирующего излучения называется конверсионной эффективностью люминофора, или физическим световым выходом. Эта величина меньше единицы (обычно несколько процентов), так как значительная часть энергии тратится на переходы без испускания света. Техническая эффективность сцинтилляторов зависит от прозрачности сцинтиллятора к собственному излучению, от его геометрических характеристик и химической чистоты. У качественных сцинтилляторов техническая эффективность должна быть близка к конверсионной эффективности.

Для определения количественной характеристики – определяют пропорциональность счета между световым выходом и поглощенной энергией. Для ряда сцинтилляторов эта характеристика работает в широком диапазоне энергий регистрируемых частиц.

Световой выход для различных видов ионизирующих излучений в одном и том же сцинтилляторе различен: он зависит от массы, заряда и энергии частицы. Поэтому вводят характеристику, называемую отношением  $\alpha/\beta$ , показывающую, какую долю составляет световой выход под действием альфа-частиц от светового выхода и под действием бета-частиц той же энергии.

# Основные характеристики метода

Процесс выхода световой энергии из сцинтиллятора называется высвечиванием. Интенсивность высвечивания убывает со временем по экспоненциальному закону. Тогда число фотонов  $N$ , испущенных за время  $t$ , прошедшее с момента попадания в сцинтиллятор ионизирующей частицы, будет равно

$$N(t) = N_{\infty}(1 - e^{-t/\tau})$$

где параметр  $\tau$  называется временем высвечивания.

Для регистрации ядерных излучений пригодны лишь сцинтилляторы с малым временем высвечивания, так как в противном случае возрастает разрешающее время сцинтилляционного детектора.

Еще одной важной характеристикой сцинтиллятора является спектр люминесценции, т.е. распределение испускаемых фотонов по энергиям. Спектр люминесценции должен соответствовать спектральной чувствительности вторичного регистрирующего прибора (фотоэлектронного умножителя).

# Принцип работы сцинтилляционного счётчика

Сцинтилляционный счётчик представляет собой сочетание сцинтиллятора (фосфора) и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). В комплект счётчика входят также источник электрического питания ФЭУ и радиотехническая аппаратура, обеспечивающая усиление и регистрацию импульсов ФЭУ.

Принцип действия сцинтилляционного счётчика состоит в следующем: заряженная частица, проходя через сцинтиллятор, наряду с ионизацией атомов и молекул возбуждает их. Возвращаясь в невозбуждённое (основное) состояние, атомы испускают фотоны. *Излученный свет собирается – в спектральном диапазоне сцинтиллятора – на фотоприёмник.* В качестве последнего часто служит фотоэлектронный умножитель (ФЭУ).

Фотоэлектронный умножитель представляет собой стеклянный цилиндр, откаченный до остаточного давления не выше 10<sup>-6</sup> мм рт. ст., в торце которого расположено прозрачное плоское окно, на поверхность которого со стороны эвакуируемого объёма нанесён тонкий слой вещества с малой работой выхода электронов (фотокатод), обычно на основе сурьмы и цезия.

Далее в эвакуированном пространстве располагается серия электродов – динодов, на которые с помощью делителя напряжения от источника электропитания подаётся последовательно возрастающая разность потенциалов. Диноды ФЭУ изготавливаются из вещества с малой работой выхода электронов. Они способны испускать вторичные электроны в количествах, превышающих число первичных в несколько раз.

Последний динод является анодом ФЭУ, с коэффициентом усиления в зависимости от режиме питания. Обычно ФЭУ содержит девять и более динодов и усиление первичного тока достигает для различных умножителей величин 10<sup>5</sup> – 10<sup>10</sup> раз, что позволяет получать электрические сигналы амплитудой от вольт до десятков вольт.

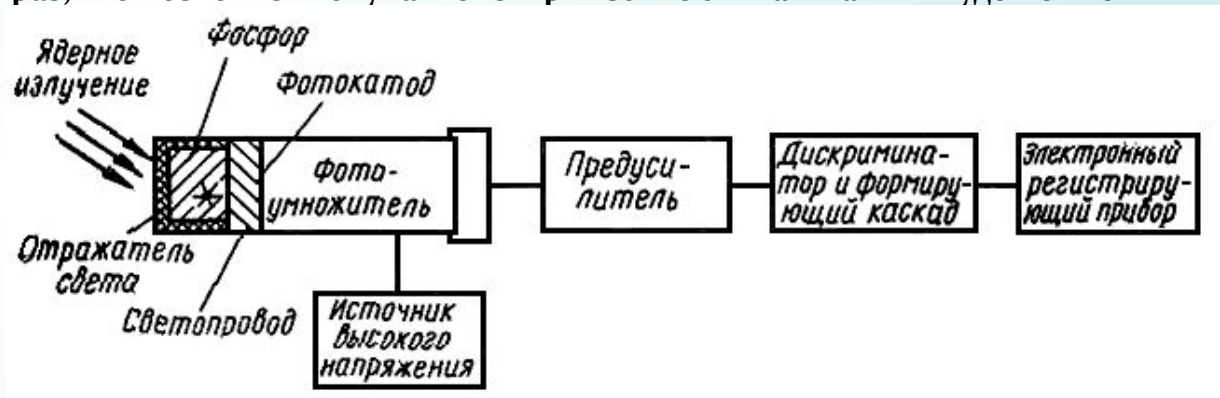


Рис. 5. Блок-схема сцинтилляционного счётчика



# Механизм сцинтилляций в органических люминофорах

Процесс люминесценции в органических веществах - это молекулярный процесс, который можно рассмотреть при помощи схемы энергетических уровней молекулы (рис.). Кривые на схеме изображают зависимость потенциальной энергии молекулы от межатомного расстояния: нижняя кривая относится к основному, а верхняя - к возбужденному электронному состоянию. В каждом состоянии имеется набор колебательных уровней, которые изображены горизонтальными линиями.

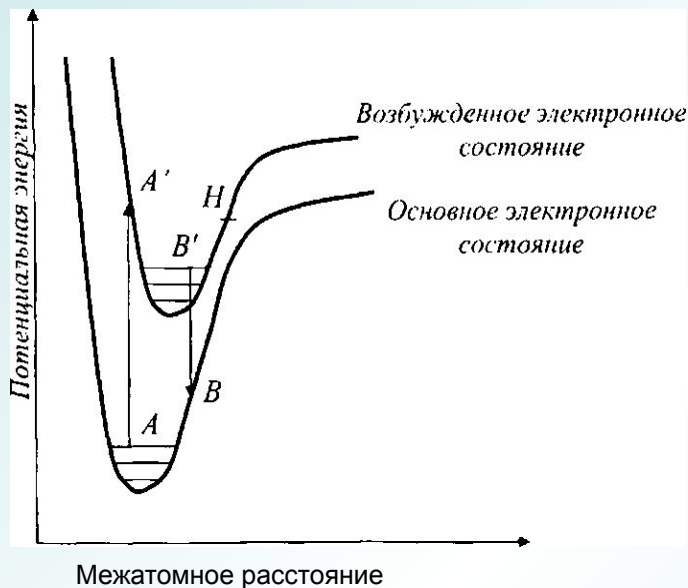
Прохождение излучения через сцинтиллятор может привести к переходу молекул из основного электронного состояния в возбужденное (линия AA'). Согласно принципу Франка-Кондона, этот переход имеет место при определенном межатомном расстоянии, поэтому точка A' будет соответствовать сильно возбужденному колебательному состоянию.

Избыточная энергия передается колебаниям решетки кристалла или молекулам растворителя. В результате молекула оказывается на одном из нижних колебательных уровней возбужденного электронного состояния (точка B'). В основное электронное состояние молекула может возвратиться по пути BB' в результате флуоресцентного излучения. Среднее время жизни молекулы по отношению к этому процессу (порядка  $10^{-8}$  с) велико по сравнению с периодом внутримолекулярных колебаний.

Конкурирующими процессами по отношению к флуоресценции служат:

- а) непосредственный переход из возбужденного электронного состояния в основное, когда обе кривые подходят близко одна к другой (уровень H);
- б) диссоциация молекулы, когда уровень A' расположен достаточно высоко.

Из рис. следует, что органические люминофоры прозрачны для собственного флуоресцентного излучения. Энергия, необходимая для перехода молекулы в возбужденное состояние, больше энергии, выделяющейся при обратном переходе.

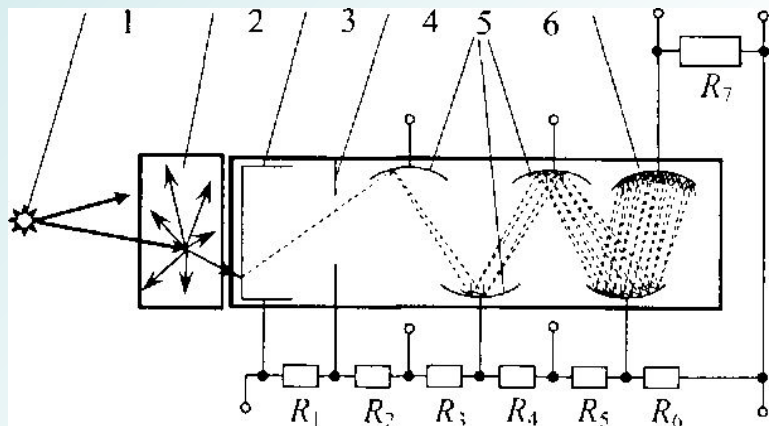


## Энергетические уровни молекулы сцинтиллятора

# Фотоэлектронные умножители

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) - электровакуумный прибор, в котором поток электронов, эмитируемый фотокатодом под действием оптического излучения (фототок), усиливается в умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии; ток в цепи анода (коллектора вторичных электронов) значительно превышает первоначальный фототок (обычно в 105 раз и выше). Впервые был предложен и разработан Л. А. Кубецким в 1930–34.

Необходимость использования фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) при регистрации ионизирующих излучений вызывается малой интенсивностью света сцинтилляторов. Так в кристалле NaI(Tl), имеющем хороший световой выход, на 100 эВ поглощенной энергии испускается всего 2-3 фотона. Фотоны, образуемые внутри сцинтиллятора, попадают на фотокатод ФЭУ (рис.). На поверхности фотокатода приблизительно каждый десятый фотон выбивает фотоэлектрон. Таким образом, при поглощении сцинтиллятором частицы с энергией 1 МэВ образуется, в лучшем случае, 2-3 тысячи фотоэлектронов. Этот весьма малый начальный ток усиливается в ФЭУ следующим образом. **Вырванные из фотокатода электроны ускоряются электрическим полем между фотокатодом и диафрагмой, а затем и первым электродом-умножителем - динодом. Вырванный из него электронный поток, существенно увеличенный за счет вторичной электронной эмиссии, попадает на второй динод и т.д. В результате многократного повторения такого каскадного процесса приходящий на анод импульсный электронный поток усиливается.**



Принцип действия ФЭУ:

1 – источник излучения, 2 – сцинтиллятор, 3 – фотокатод, 4 – диафрагма, 5 – диноды, 6 – анод,  $R_1$  -  $R_6$  – делители напряжения,  $R_7$  - резистор

Для уменьшения потерь света часто применяются световоды в виде стержней из оргстекла, которые благодаря полному внутреннему отражению на поверхности оргстекло-воздух доводят значительную часть света до фотокатода.

По своему назначению ФЭУ делятся на три типа:

- счетные, предназначенные для регистрации излучения;
- спектрометрические - для сцинтилляционных спектрометров;
- временные - для изучения временных соотношений в ядерных процессах.

## Сцинтилляционный метод регистрации альфа-частиц

Лучшим сцинтиллятором для регистрации частиц является сульфид цинка, активированный серебром. Этот материал имеет очень высокие значения конверсионной эффективности и  $\alpha/\beta$  отношения. Однако величина его прозрачности для собственного излучения весьма мала, поэтому сцинтилляторы из ZnS делают небольшой толщины, сравнимой с пробегом альфа-частиц. Оптимальная толщина слоя сцинтиллятора для регистрации альфа-излучения радионуклидов составляет 5-10 мг/см<sup>2</sup>. Сцинтилляторы из ZnS иногда наносятся непосредственно на колбу фотоумножителя, однако чаще используется конструкция, в которой сульфидом цинка покрывается прозрачный материал, находящийся в оптическом контакте с ФЭУ.

## Регистрация бета-частиц

Несмотря на то, что сцинтилляторы всех типов чувствительны в той или иной степени к электронам, наиболее широко для регистрации этих частиц применяются органические сцинтилляторы. Это объясняется малым временем высвечивания органических материалов, а также тем, что их можно приготовить как в виде твердых и жидких растворов, так и в виде кристаллов. Сцинтиллятор NaI(Tl) имеет большую величину конверсионной эффективности для электронов, чем органические сцинтилляторы, однако высокие атомные номера элементов, входящих в его состав, являются достоинством при регистрации гамма-квантов, а при регистрации бета-частиц нежелательны, поскольку такие элементы приводят к большой величине обратного рассеяния электронов. Кроме того, кристаллы NaI гигроскопичны и поэтому заключаются в стальную оболочку, что делает и вовсе невозможным их использование для регистрации бета-частиц. Жидкие сцинтилляторы широко используются для регистрации мягкого бета-излучения <sup>14</sup>C и <sup>3</sup>H (трития).

## Регистрация гамма-излучения

Для регистрации гамма-излучения обычно используются неорганические кристаллы, в частности йодистый натрий, активированный таллием.

Эффективность регистрации гамма-излучения сцинтилляционным счетчиком можно оценить путем определения доли гамма-квантов, поглощенных в сцинтилляторе. Если предположительно все процессы независимо от их природы приводят к отсчету, то следует воспользоваться полным коэффициентом ослабления гамма-квантов  $\mu$ , зависимость которого от энергии  $E_\gamma$  для кристалла NaI(Tl), представлена на рис. Величины  $\mu$  для других материалов сцинтилляторов и энергий фотонов приводятся в справочниках.

Для параллельного пучка фотонов, падающих нормально на пластинку толщиной  $x$ , эффективность регистрации равна

$$\varepsilon_\gamma = 1 - \exp(-\mu x)$$

Эффективность регистрации гамма-квантов за счет увеличения телесного угла резко повышают кристаллы с колодцем. Однако такие кристаллы не могут применяться для спектрометрии гамма-излучения.

Кристаллы NaI(Tl) имеют сравнительно небольшие размеры. Поэтому для регистрации слабых потоков гамма-излучения применяют твердые сцинтилляторы из пластмассы с пара-терфенилом, размер которых может быть доведен до 1 м в диаметре. Хотя эффективность регистрации у такой пластмассы в несколько раз меньше, чем у кристалла NaI(Tl) такого же размера, однако значительно больший объем сцинтиллятора позволяет повысить скорость счета импульсов во много раз.

# Применение сцинтилляционных счетчиков

**Достоинства** сцинтилляционного счётчика: высокая эффективность регистрации различных частиц; быстроедействие; возможность изготовления сцинтилляторов разных размеров и конфигураций; высокая надёжность и относительно невысокая стоимость. Благодаря этим качествам сцинтилляционные счётчики широко применяется в ядерной физике (например, для измерения времени жизни ядер, измерение сечения деления, регистрация осколков деления газовыми сцинтилляционными счётчиками), физике элементарных частиц и космических лучей (например, экспериментальное обнаружение нейтрино), в промышленности (гамма-дефектоскопия, радиационный контроль), дозиметрии (измерение потоков  $\gamma$ -излучений, испускаемых человеком и другими живыми организмами), радиометрии, геологии, медицине и т. д.

**Недостатки** сцинтилляционного счётчика: малая чувствительность к частицам низких энергий ( $1 \text{ кэВ}$ ), невысокая разрешающая способность по энергии.

# Полупроводниковые

## детекторы

В последние десятилетия для регистрации ионизирующих излучений наибольшее распространение получили полупроводниковые детекторы (ППД) - германиевые, кремниевые и т.д. Принцип их действия подобен принципу действия ионизационной камеры. В среде с низкой проводимостью создается электрическое поле. При проникновении в эту среду ионизирующих частиц происходит образование носителей заряда. Заряды разделяются электрическим полем и собираются на электродах, формируя электрический импульс, который можно усилить и измерить.

В случае ППД средой, в которой образуются заряды, служит полупроводниковый монокристалл (часто - лишь небольшая его область). Структура энергетических зон полупроводника аналогична структуре зон диэлектрика (например, кристалла NaI). Отличие заключается в том, что ширина запрещенной зоны полупроводника  $E_g$  - порядка 1 эВ; для диэлектриков эта величина существенно больше. В результате при нормальной температуре некоторая часть электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости, а в валентной зоне образуются дырки - носители положительного заряда (рис.). Если к полупроводнику приложить внешнее электрическое поле, то носители заряда - электроны проводимости и дырки - будут перемещаться по кристаллу, дрейфуя к соответствующим электродам.

Такая проводимость полупроводникового кристалла, очень небольшая по величине, получила название собственной.

Более существенна для полупроводников несобственная, или примесная проводимость, обусловленная присутствием атомов других элементов. Различают донорные и акцепторные примеси. Донорными примесями для четырехвалентных полупроводников (кремний и германий) являются, например, пятивалентные атомы - мышьяк, сурьма и другие.

При замещении ими в кристаллической решетке атомов германия или кремния четыре электрона из пяти образуют с электронами полупроводника четыре ковалентные связи, т.е. принадлежат валентной зоне. Пятый, оставшийся, электрон с большой вероятностью может оторваться от атома и, превратив его в положительный ион, перейти в зону проводимости. Вероятность такого перехода весьма велика, потому что донорные примесные уровни всегда лежат в запрещенной зоне вблизи границы зоны проводимости. Энергия, необходимая для возбуждения донорной примеси,  $E_d$  (см. рис.) во много раз меньше  $E_g$ , и в зону проводимости поступают, в основном, электроны донорных примесей даже при незначительной их концентрации. К акцепторным примесям эти же рассуждения применимы «с точностью до наоборот». Акцепторными примесями для четырехвалентных полупроводников служат трехвалентные элементы - галлий, индий и т.д. Таким образом, для кристаллов полупроводников с акцепторными примесями характерна дырочная (полупроводники p-типа), а для кристаллов с донорными примесями - электронная проводимость (полупроводники n-типа).

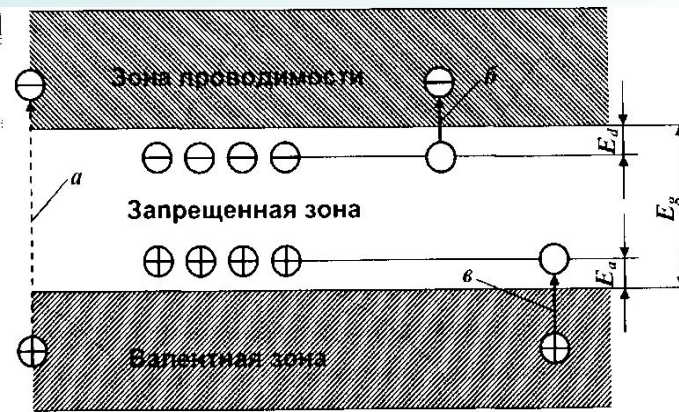


Рис. 3.13. Структура энергетических зон полупроводника и процессы, приводящие к возникновению собственной (а), донорной (б) и акцепторной (в) проводимости

В зависимости от параметров и технологии изготовления **полупроводниковые детекторы** делятся на поверхностно-барьерные и диффузионно-дрейфовые. Поверхностно-барьерные ППД изготавливают таким образом, чтобы вблизи поверхности кристалла кремния или германия сформировался р-п- или п-р-переход. Этого добиваются различными способами. Например, применяют поверхностную диффузию вещества примеси (например, фосфора) внутрь кристалла. Часто используется ионная имплантация примеси путем воздействия тока ионов, ускоряемых внешним полем. Наконец, используют химические свойства поверхности: поверхностные слои германия и кремния легко окисляются и ведут себя как примесные полупроводники р-типа. Электрический контакт с поверхностным слоем осуществляют с помощью тонкого слоя металла (обычно золота), который наносят на поверхность кристалла испарением в вакууме. На границе металл-проводник возникает электростатический барьер, препятствующий проникновению носителей заряда из полупроводника в металл и обратно. При приложении обратного напряжения возникает обедненный носителями слой.

Большие преимущества даёт применение полупроводниковых детекторов в спектрометрах  $\gamma$ -квантов.

Германий имеет довольно высокий атомный номер  $Z = 32$  и поэтому эффективное сечение взаимодействия  $\gamma$ -квантов велико. Энергетическое разрешение германиевых детекторов при регистрации  $\gamma$ -квантов достигает 0.1%, что в десятки раз выше, чем у сцинтилляционных детекторов. Временное разрешение лучших полупроводниковых детекторов 10<sup>-8</sup>-10<sup>-9</sup> с.

Недостатки полупроводникового детектора:

- малая эффективность при регистрации  $\gamma$ -квантов больших энергии;
- ухудшение разрешающей способности при нагрузках  $> 10^4$  частиц в сек;
- конечное время жизни полупроводникового детектора при высоких дозах облучения из-за накопления радиационных дефектов;
- малые размеры доступных монокристаллов (диаметр  $\sim 3$  см, объём  $\sim 100$  см куб.) ограничивает применение полупроводникового в ряде областей.

**Спасибо за внимание!**