

# 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 metroo - 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.

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 и ультрафильтрацией на мембранах с формированием слоя меньше 1 мг/см<sup>2</sup>.





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).



# 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  $\text{NaJ}(\text{TI})$   $100 \times 150$  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.

## 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 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 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.

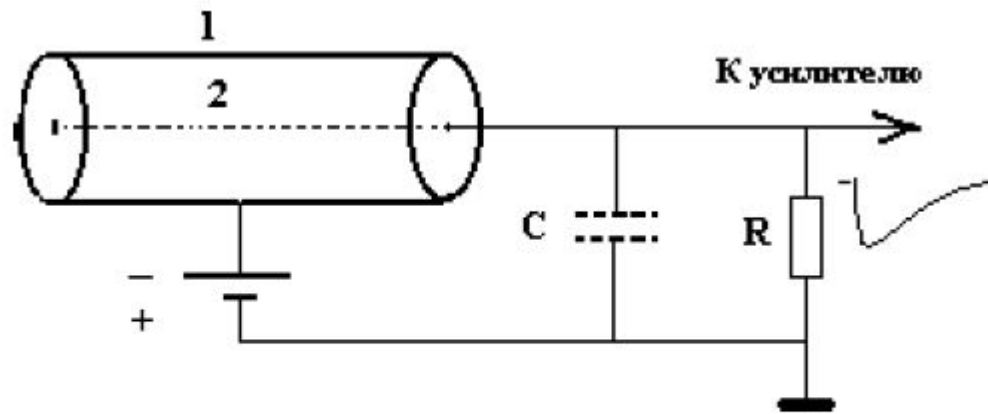


Рис. 1. Принципиальная схема включения ионизационного детектора:  
1 - цилиндрический катод; 2 - анод (металлическая нить)

R - сопротивление утечки, 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 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 разряжалась, то величина амплитуды  $A$  возникающего при этом импульса будет определяться величиной заряда  $Q$ , созданного в объеме детектора,  $A = Q/C$ .

# Импульсная ионизационная камера

Импульсные ионизационные камеры используют в тех случаях, где нужно определить ионизацию отдельных частиц или ионизацию, создаваемую потоком частиц. Например, в космических экспериментах.

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

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

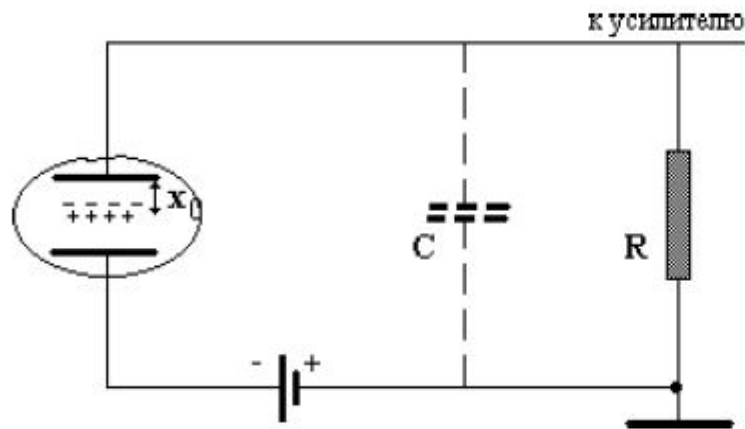


Рис.3. Принципиальная схема импульсной ионизационной камеры.

**В ионизационной камере с плоскопараллельными электродами электрическое поле однородно. 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 различать 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 умещаются 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  $V_{зж.}$ , 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 инертным газом: аргоном, неоном и др. За время прохождения нескольких электронно-фотонных лавин образованные положительные ионы остаются на месте, т.к. их подвижность намного меньше подвижности электронов. 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. Лишь когда положительные ионы достигают катода и там нейтрализуются, они могут вырывать свободные электроны из катода. Если при этом окажется, что напряжение на счетчике превышает  $V_{зж}$ , 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) 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 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.

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 счетчик представляет собой сочетание сцинтиллятора (фосфора) и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). В комплект счетчика 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, в торце которого расположено прозрачное плоское окно, на поверхность которого нанесён тонкий слой вещества с малой работой выхода электронов (фотокатод), обычно на основе сурьмы и цезия.

Далее 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 режима питания. Обычно ФЭУ содержит девять и более динодов и усиление первичного тока достигает для различных умножителей величин  $10^5$  –  $10^{10}$  раз, что позволяет получать электрические сигналы амплитудой от вольт до десятков вольт.

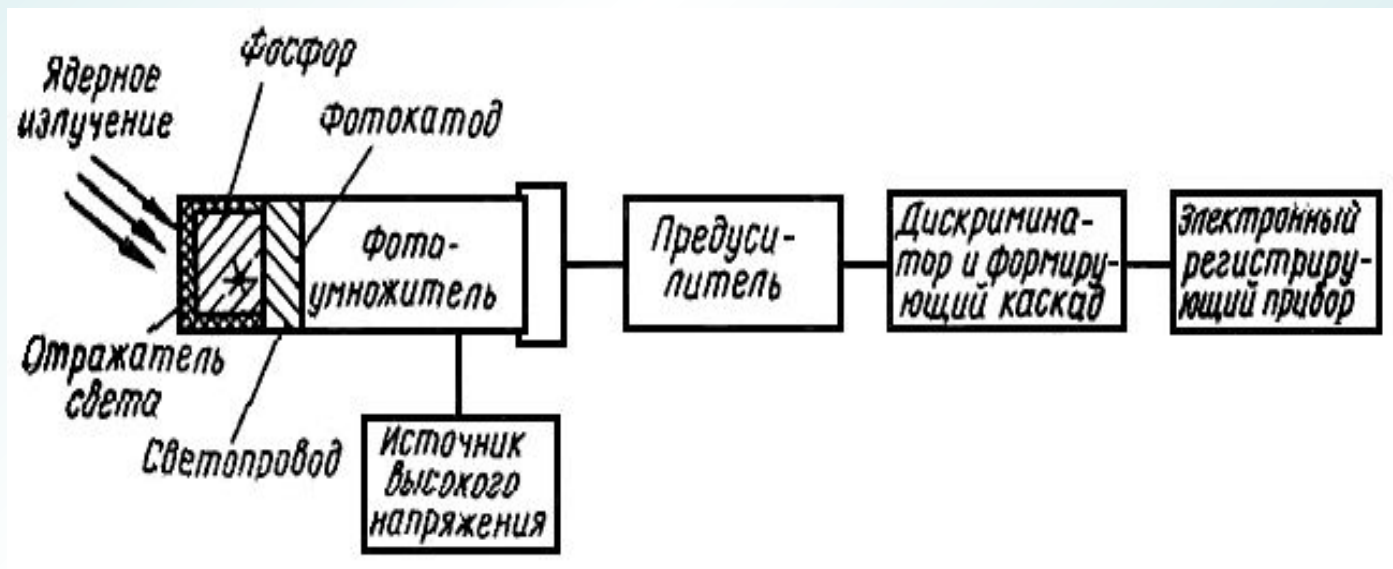


Рис. 5. Блок-схема сцинтилляционного счётчика

## 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  $\text{NaI(Tl)}$  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  $\text{NaI}$  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  $^{14}\text{C}$  и  $^3\text{H}$  (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.

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  $\text{NaI(Tl)}$  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  $\text{NaI(Tl)}$  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, физике элементарных частиц и космических лучей, 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 кэВ);**
- ▣ **невысокая разрешающая способность по энергии.**

# Полупроводниковые детекторы

В последние десятилетия для регистрации ионизирующих излучений наибольшее распространение получили полупроводниковые детекторы (ПД) - 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.

Средой, в которой образуются заряды, служит полупроводниковый монокристалл. 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. 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, а для кристаллов с донорными примесями - электронная проводимость.

В зависимости от параметров и технологии изготовления **полупроводниковые детекторы** делятся на поверхностно-барьерные и диффузионно-дрейфовые.

Большие **преимущества** даёт применение полупроводниковых детекторов в спектрометрах  $\gamma$ -квантов. 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  $10^{-8}$ - $10^{-9}$  с.

**Недостатки** полупроводникового детектора ограничивает применение полупроводникового в ряде областей:

- малая эффективность при регистрации  $\gamma$ -квантов больших энергии;
- ухудшение разрешающей способности при загрузках  $> 10^4$  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<sup>3</sup>).

**Спасибо за внимание!**