КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

Зарипова Ю.А.

РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Сборник лекций для студентов по направлению подготовки
«Физические и химические науки»

Алматы

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Источники ионизирующих излучений.

Лекция 2. Основы ядерной физики.

Лекция 3. Радиоактивность.

Лекция 4. Ядерные реакции.

Лекция 5. Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом.

Лекция 6. Физические основы дозиметрии.

Лекция 7. Методы измерения ионизирующих излучений.

Лекция 8. Стандарты и нормативные документы в области радиационного контроля.

Лекция 9. Принцип работы радиометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 10. Принцип работы спектрометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 11. Радиационный мониторинг.

Лекция 10. ***Принцип работы спектрометрических приборов радиационного контроля.***

Цель лекции: Сформировать у обучающихся представление о физических принципах работы спектрометрических приборов, рассмотреть особенности регистрации гамма-, бета- и альфа-излучений различными типами детекторов, а также сформировать понимание возможностей и ограничений сцинтилляционных и полупроводниковых спектрометров при проведении радиологических измерений и радионуклидного анализа.

Введение: Измерение спектров ионизирующих излучений является одним из важнейших методов радиационного анализа, используемого в физике, ядерной энергетике, медицине, геологии и экологическом мониторинге. С помощью спектральных методов можно не только выявить наличие радиоактивных веществ, но и точно определить их изотопный состав, энергию испускаемых частиц и уровень активности источников излучения.

Основным инструментом таких исследований являются спектрометры – приборы, позволяющие регистрировать излучение и анализировать его энергетическое распределение. Принцип работы спектрометра основан на том, что каждому кванту или частице излучения соответствует электрический сигнал определённой амплитуды, которая пропорциональна его энергии. Анализируя распределение этих сигналов, можно получить спектр излучения исследуемого источника.

Основная цель спектрометрии заключается в проведении качественного анализа, то есть в определении состава и выявлении радионуклидов, присутствующих в образце. Это становится возможным благодаря тому, что гамма-кванты и альфа-частицы, испускаемые атомными ядрами, обладают строго определёнными значениями энергии (E), характерными для каждого типа ядра. В случае бета-распада энергия излучения изменяется в пределах от нуля до определённого максимального значения ($E_{гр}$), которое также зависит от вида ядра. С помощью спектрометров можно получить наиболее полные данные о характере излучения образца, определить его радионуклидный состав и оценить активность каждого из компонентов.

Основная часть:

Широко распространены спектрометры для измерения спектров гамма-излучения. них часто используют сцинтилляционные детекторы, обладающие энергетическим разрешением. Более высокими параметрами обладают спектрометры на основе полупроводниковых детекторов. При измерениях бета- или альфа-излучения, обладающих низкой проникающей способности, прохождению излучения не должны мешать стенки используемого сосуда и входного окна детектора. Основной вклад в регистрируемое излучение дает слой образца, обращенный к детектору. Влияние стенок можно вообще исключить, растворяя пробу в жидком сцинтилляторе.

Спектром излучения называется зависимость интенсивности излучения (J) источника от его энергии (E). Другими словами, спектр - распределение числа испускаемых в единицу времени

квантов излучения по значениям их энергии. Прибор для измерения спектров называется спектрометром.

В теории спектр гамма-излучения представляет собой совокупность узких пиков, характерных для каждого радионуклида. В большинстве случаев схема распада конкретного радионуклида включает один гамма-переход, поэтому в спектре наблюдается единственный пик с определённой энергией. Если же в образце присутствует несколько различных радионуклидов, спектр приобретает вид набора пиков, каждый из которых соответствует определённому изотопу. Именно по этим пикам становится возможным установить радионуклидный состав исследуемой пробы.

Для измерения спектров излучения применяются специальные детекторы. Наиболее широко используются электронные детекторы, в которых каждому зарегистрированному квант□излучения соответствует электрический сигнал на выходе устройства. Такой сигнал, как правило, представляет собой короткий импульс – кратковременное изменение напряжения или тока.

Многие типы детекторов обладают энергетическим разрешением – способностью формировать выходные импульсы, амплитуда которых пропорциональна энергии частицы, зарегистрированной детектором. В этом случае анализ спектра излучения радионуклида проводится по амплитудному спектру детектора, то есть по распределению количества выходных импульсов в зависимости от их амплитуды.

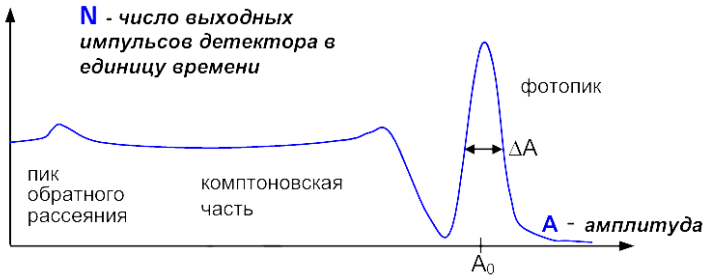
Особенности процессов в детекторе приводят к тому, что экспериментально полученный спектр гамма-излучения отличается от «теоретического».

Во-первых, детектор регистрирует не сами гамма-кванты, а порождаемые ими вторичные электроны. Последние образуются в веществе за счет трех эффектов. При фотоэффекте вся энергия гамма-кванта передается вторичному электрону. При Комптон-эффекте вторичному электрону передается лишь часть энергии, а гамма-квант продолжает свое движение в веществе. В случае эффекта образования пар гамма-квант порождает две заряженные частицы: электрон и позитрон. Фотоэффект приводит к возникновению в спектре фотопика, или точнее пика полного поглощения. Его положение несет прямую информацию об энергии гамма-излучения, а высота (или площадь) – об активности измеряемого образца. За счет Комптон-эффекта в спектре образуется пологая часть с некоторым граничным значением энергии.

Во-вторых, энергетическое разрешение детекторов неидеально, поэтому происходит размытие спектра, приводящее, в частности, к значительному уширению фотопика. На рисунке представлен реальный спектр, полученный с использованием сцинтилляционного детектора излучений. При этом число импульсов детектора, зарегистрированных в единицу времени (N), очевидно, пропорционально интенсивности (J) падающего на детектор гамма-излучения, а их амплитуда (A) – энергии (E).

Небольшой пик в области малых энергий называется пиком обратного рассеяния. Он возникает в реальных условиях измерений из-за того, что часть гамма-квантов может пролететь через детектор и вернуться в него, испытав рассеяние назад на оболочке или других конструктивных элементах

детектора. При этом энергия рассеянных квантов почти одинакова для небольших отклонений от направления строго назад.



Полученные гамма-спектр радионуклида с единственным гамма-переходом с помощью сцинтилляционного детектора

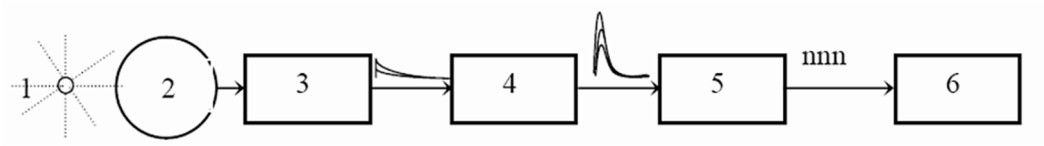
Представленный на рисунке спектр называют также аппаратурной формой линии или функцией отклика детектора на воздействие гамма-излучения фиксированной энергии. Отношение ширины фотопика (ΔA), измеренной на полувысоте, к его положению (A_0), выраженное в процентах, используют в качестве величины энергетического разрешения детектора (ε):

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_0}$$

Разрешающая способность гамма-спектрометр характеризует возможность разделения двух линий γ-излучения, близких по энергии. Наиболее распространенными типами гамма-спектрометр являются сцинтилляционный и полупроводниковый. Сцинтилляционный гамма-спектрометр состоит из сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). В сцинтилляторе под действием электронов, создаваемых γ-квантами, возникает кратковременная вспышка света - сцинтилляция, преобразуемая в ФЭУ в электрический импульс. Амплитуда импульса пропорциональна энергии γ-кванта. В качестве сцинтилляторов, например, применяют твердые неорганические кристаллы NaJ, активированные Tl. Разрешение сцинтилляционного гамма-спектрометр 4- 5% для γ-квантов с энергией 1 МэВ. Эффективность может приближаться к 100%.

В полупроводниковом гамма-спектрометр γ-кванты обычно регистрируются в монокристалле германия. Электроны, образуемые γ -квантами, производят электронно-дырочные пары, которые под действием приложенного электрического поля создают импульс тока, амплитуда которого пропорциональна энергии электрона. Разрешение для γ-квантов с энергией 1 МэВ может достигать 0.1- 0.2%. Эффективность обычно ниже, чем у сцинтилляционного гамма-спектрометра.

Рассмотрим характеристики спектрометра γ-излучения из сверхчистого германия (HPGe-детектора), блок-схема которого представлена на рисунке ниже.



Блок-схема спектрометра 1 – источник γ-излучений, 2 – детектор γ-излучений из сверхчистого германия (HPGe-детектор), 3 – предварительный усилитель (предусилитель), 4 –основной усилитель (ОУ), 5 – амплитудно цифровой преобразователь (АЦП), 6 – компьютер.

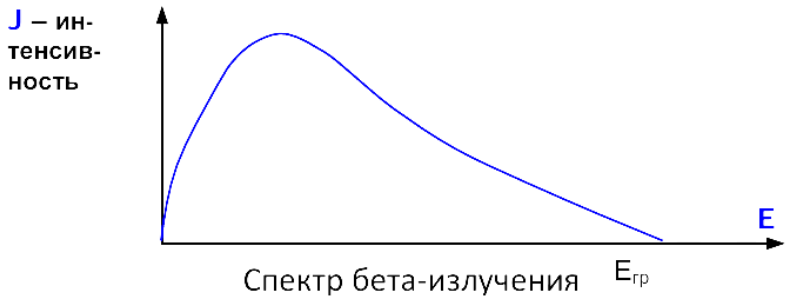
Основу спектрометра составляет HPGe-детектор ядерных излучений, использующий взаимодействие γ-квантов с веществом. В результате такого взаимодействия на выходе детектора возникают электрические заряды, величина которых пропорциональна энергии, потерянной квантом в детекторе. Для преобразования величины заряда в пропорциональную амплитуду напряжения используется предварительный усилитель (ПУ), а для формирования сигналов по длительности и подавления шумов – основной усилитель (ОУ). По амплитудному распределению сигналов на выходе усилительного тракта Pa(u), где u – амплитуда сигнала, судят о спектре излучений. Амплитудные распределения регистрируются и обрабатываются с помощью цифровой электронной техники, в частности компьютеров. Преобразование аналоговых сигналов на выходе ОУ в цифровые коды, с которыми может работать компьютер, осуществляется амплитудно-цифровым преобразователем (АЦП), в котором амплитуда каждого импульса измеряется и определяется соответствующий ей номер канала. Затем компьютер считывает номер канала и прибавляет единицу к содержимому элемента массива, выделенного для каждого канала. Такой метод регистрации амплитудного распределения получил название «многоканальный амплитудный анализ».

Детектор γ-излучения из сверхчистого германия (HPGe-детектор) представляет собой полупроводниковый диод с □-n переходом, изготовленный, для увеличения объема чувствительной области, в коаксиальной (цилиндрической) геометрии. Коаксиальная геометрия детектора позволяет значительно повысить эффективность регистрации γ-квантов по сравнению с детектором в планарной (плоскостной) геометрии. Кроме величины объема рабочей области детектора эффективность регистрации γ-квантов сильно зависит от материала, из которого изготовлен детектор. Наиболее распространенными материалами, из которых изготавливаются полупроводниковые детекторы, в настоящее время являются кремний и германий. Для регистрации γ- квантов обычно используются детекторы из германия.

Выбор германия в качестве исходного материала для изготовления детектора, несмотря на бóльшие трудности в изготовлении, связан с тем, что сечение взаимодействия γ-квантов сильно зависит от атомного номера вещества Z. Особенно сильно зависит от Z сечение фотоэффекта ($\sigma_ф \sim Z^5$), сечение же комптон эффекта пропорционально Z, а сечение процесса образования электрон-позитронных пар – Z^2. Большее значение Z у германия (Z(Ge) = 32, а Z(Si) = 14) и определяет выбор этого материала, поскольку обеспечивает более высокую эффективность регистрации γ-квантов детектором.

Детекторы на основе сверхчистого германия характеризуются низким значением обратного тока и высоким энергетическим разрешением. В отличие от полупроводниковых детекторов из кремния германиевые детекторы необходимо эксплуатировать при низкой температуре. Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны E_g германия заметно меньше, чем у кремния (0,66 эВ у германия и 1,09 эВ у кремния). В связи с этим вероятность тепловой генерации неосновных носителей заряда ($\sim e^{-Eg/(kT)}$) у германия существенно выше, и при комнатной температуре токи утечки недопустимо велики. Одним из существенных преимуществ HPGe-детекторов перед аналогичными диффузионно-дрейфовыми Ge(Li) детекторами является возможность хранения их при комнатной температуре в период между измерениями, хотя при работе они также должны быть охлаждены до температуры жидкого азота – 77K. Ge(Li) детекторы обладают столь же высоким энергетическим разрешением, что и HPGe- детекторы, однако должны постоянно находиться в криостате с жидким азотом – даже кратковременное повышение температуры Ge(Li) детектора до комнатной, вызванное, например, несвоевременной заправкой криостата жидким азотом, выводит детектор из строя.

Спектр бета-излучения имеет непрерывный характер и простирается до определенного граничного значения энергии ($E_{гр}$), которое пропорционально энергии бета-перехода.



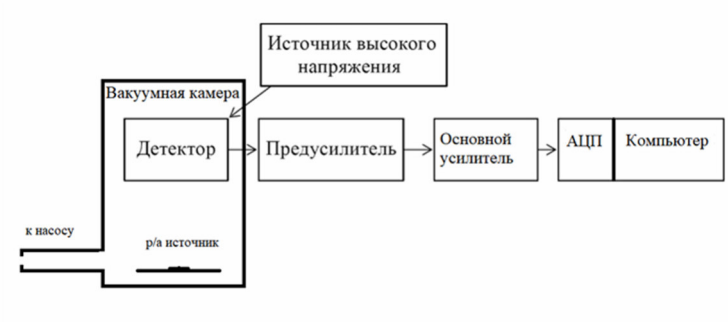
Спектрометр совершеннее других приборов. В частности, он способен исполнять функции радиометра. При решении задач радиационного контроля в связи с последствиями чернобыльской аварии возможности спектрометра «различать» излучения с разной энергией используются ограниченно. В большинстве случаев они нужны лишь для того, чтобы отличать излучения чернобыльского радионуклида цезий-137 и естественного радионуклида калий-40.

В то же время устройство спектрометра позволяет без труда вычислять значение активности каждого радионуклида в пробе. Так радиометр РКГ-АТ1320, фактически представляющий усеченный вариант спектрометра, способен одновременно находить активности цезия-137, калия-40 и еще двух естественных радионуклидов – радия-236 и тория-232.

Измерение спектров бета-излучения чаще всего проводят с использованием сцинтилляционных детекторов на основе пластиковых сцинтилляторов. Именно такой метод используется в спектрометре МКС-АТ1315. Спектрометр МКС-АТ1315 способен находить активности как этих, так и других радионуклидов. Его важной особенностью является наличие двух независимых каналов регистрации, что позволяет одновременно измерять как гамма-, так и бета-спектр образца. В «чернобыльских» задачах это означает возможность одновременного измерения активностей

цезия-137 и стронция-90. Для повышения чувствительности измерений исследуемые образцы подвергают термическому концентрированию (до частичного озоления). Жидкие образцы (вода, молоко) пропускают через волокнистый катионит, который после высушивания используют в качестве пробы.

Наиболее сложны альфа-спектрометры. В силу очень низкой проникающей способности альфа-излучения измерения обычно производят в вакуумной камере с использованием полупроводникового детектора. Определение состава радионуклидов возможно на «тонких» образцах, получаемых методом электролитического осаждения на специальные подложки. Структурная схема альфа-спектрометра с полупроводниковым детектором показана на рисунке.



Предусилитель. Сигнал от детектора представляет собой импульс электрического тока. Происходит интегрирование тока (сбор заряда) на электродах детектора. Этот заряд создаёт падение напряжения U =Q/C, где CC – суммарная ёмкость. Например, если в детекторе поглотится частица с энергией 1 МэВ, то в нём образуется сгустки электронов и дырок, обладающие зарядом $4.4 \cdot 10^{-14}$ Кл каждый, что при ёмкости 50 пФ соответствует сигналу с амплитудой 0.88 мВ. Этот сигнал усиливается малошумящим предварительным усилителем. Обычно используются зарядочувствительные предусилители. Особенность таких предусилителей состоит в том, что уровень сигнала на выходе не зависит от ёмкости детектора, которая может меняться в процессе работы.

Основной усилитель. Основное назначение основного усилителя – усиление импульсов, приходящих от предусилителя. Кроме того, основной усилитель обеспечивает формирование сигнала по длительности и форме для получения оптимального отношения сигнал/шум. Обычно в усилителях время нарастания и спада выходного импульса составляет несколько микросекунд.

Многоканальный анализатор (МА) состоит из АЦП и компьютера с программой анализатора. От основного усилителя сигналы поступают в аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Коды амплитуд импульсов сортируются с помощью программы компьютера, и выводятся на монитор в виде амплитудного спектра.

Заключение:

Современная спектрометрия ионизирующих излучений является основным инструментом радиологических измерений, обеспечивающим точное определение энергетических характеристик и активности радионуклидов. Сцинтилляционные спектрометры применяются для оперативного

радиационного контроля благодаря высокой эффективности регистрации, тогда как полупроводниковые системы на основе сверхчистого германия (HPGe) используются для высокоточного радионуклидного анализа. Развитие цифровых технологий, многоканальных анализаторов и программной обработки спектров значительно повышает достоверность, чувствительность и воспроизводимость измерений, что делает спектрометрию ключевым элементом современной системы радиационного мониторинга и обеспечения ядерной безопасности.

Контрольные вопросы:

1) Что называется спектром излучения и какую информацию он несёт о радионуклиде?
2) В чём заключается принцип работы спектрометра?
3) Что такое энергетическое разрешение детектора и от каких факторов оно зависит?
4) Каковы основные различия между сцинтилляционными и полупроводниковыми спектрометрами?
5) Почему для регистрации γ-излучения чаще применяются детекторы из сверхчистого германия?
6) Какие функции выполняют предусилитель, основной усилитель и амплитудно-цифровой преобразователь в спектрометре?
7) В каких областях радиологических измерений применяются спектрометры и какие преимущества они обеспечивают по сравнению с радиометрами?

Список использованных источников:

1. Гурачевский В.Л., Леонович И.С., Хоровец И.Г. Руководство по работе с приборами радиационного контроля. – Минск: Институт радиологии, 2015. – 108 с.
2. Групен К. Детекторы элементарных частиц: пер. с англ. – Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999. – 407 с.
3. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 384 с.