

Лабораторная работа №5.5.5
Компьютерная сцинтилляционная γ -спектрометрия

Рожков А. В.

23 сентября 2025 г.

Цель работы: Снять и исследовать спектры излучения различных источников, характеризовать различные пики в спектрах радиоактивных веществ.

В работе используются: сцинтиллятор NaI(Tl), ФЭУ, предусилитель импульсов, высоковольтный блок питания для ФЭУ, АЦП, компьютер, осциллограф.

1 Теоретическое введение

В работе используется сцинтилляционный метод исследования излучений. Основным элементом является сцинтиллятор - вещество, способное излучать видимое или ультрафиолетовое излучение под действием заряженных частиц. Внутри вещества наблюдаются следующие 3 явления:

1.1 Фотоэффект

Это процесс взаимодействия гамма-кванта с электроном, связанным с атомом, при котором электрону передается вся энергия гамма-кванта.

Кинетическая энергия электрона равна

$$T_e = E_\gamma - I_i$$

где E_γ – энергия гамма-кванта, I_i – потенциал ионизации i -той оболочки атома.

1.2 Эффект Комптона

Это упругое рассеяние фотона на свободном электроне, сопровождающееся изменением длины волны фотона (реально этот процесс происходит на слабо связанных с атомом внешних электронах). Максимальная энергия образующихся комптоновских электронов соответствует рассеянию гамма-квантов на 180° и равна

$$E_{\max} = \frac{\hbar\omega}{1 + \frac{mc^2}{2\hbar\omega}}$$

1.3 Процесс образования электрон-позитронных пар

При достаточно высокой энергии гамма-кванта наряду с фотоэффектом и эффектом Комптона может происходить третий вид взаимодействия гамма-квантов с веществом – образование электрон-позитронных пар.

Пороговая энергия, необходимая для образования пары:

$$E_{\text{пор}} \approx 2mc^2 = 1,022 \text{ МэВ}$$

При этом возможны три варианта развития событий:

а) оба родившихся гамма-кванта не вылетают из детектора, и тогда вся энергия первичного гамма-кванта останется в детекторе, а в спектре появится пик с $E = E_\gamma$;

б) один из родившихся гамма-квантов покидает детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии $E = E_\gamma - E_0$ где $E_0 = mc^2 = 511 \text{ кэВ}$;

в) оба родившихся гамма-кванта покидают детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии $E = E_\gamma - 2E_0$, где $2E_0 = 2mc^2 = 1022 \text{ кэВ}$.

Таким образом, любой спектр, получаемый с помощью гамма-спектрометра, описывается несколькими компонентами, каждая из которых связана с определенным физическим процессом.

Помимо этих процессов, добавляются экспонента, связанная с наличием фона, пик характеристического излучения, возникающий при взаимодействии гамма-квантов с окружающим веществом, а также пик обратного рассеяния, образующийся при энергии квантов $E_\gamma \gg mc^2$ в результате рассеяния гамма-квантов на большие углы на материалах конструктивных элементов детектора и защиты

и последующего фотоэффекта в сцинтилляторе. Положение пика обратного рассеяния определяется по формуле:

$$E_{\text{обр}} = \frac{E}{1 + 2E/mc^2}$$

где E – энергия фотопика

1.4 Энергетическое разрешение спектрометра

Даже при поглощении частиц с одинаковой энергией амплитуда импульса на выходе фотоприёмника сцинтилляционного детектора меняется от события к событию. Это связано:

1) со статистическим характером процессов сбора фотонов на фотоприёмнике и последующего усиления, 2) с различной вероятностью доставки фотона к фотоприёмнику из разных точек сцинтиллятора, 3) с разбросом высвечиваемого числа фотонов.

В результате в экспериментальном спектре линия (которая для идеального детектора представляла бы дельта-функцию) оказывается размытой, её часто описывают гауссианом.

Энергетическим разрешением спектрометра называется величина

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i},$$

где ΔE_i – ширина пика полного поглощения, измеренная на половине высоты (в единицах энергии), E_i – энергия регистрируемых гамма-квантов. Значение E_i пропорционально среднему числу фотонов \bar{n}_i на входе ФЭУ:

$$E \propto \bar{n}.$$

Полуширина пика ΔE_i пропорциональна среднеквадратичной флуктуации $\Delta \bar{n}_i$. Так как n_i распределено по закону Пуассона, то $\Delta \bar{n}_i = \sqrt{\bar{n}_i}$ и поэтому

$$\Delta E_i \propto \sqrt{\bar{n}_i}.$$

Из вышесказанного получаем:

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i} \propto \frac{1}{\sqrt{E_i}}.$$

Таким образом, чем выше энергия гамма-кванта, тем меньше разрешение.

1.5 Форма импульсов

Схема ФЭУ представлена на рисунке 1

Сигнал на выходе имеет вид:

$$U(t) \propto e^{-t/RC}(1 - e^{-t/\tau_0})$$

где τ_0 – время высвечивания сцинтиллятора, а RC – постоянная времени, определяемая анодной цепью ФЭУ.

Чтобы сигнал было удобно регистрировать, RC выбирают много больше, чем τ_0 .

2 Экспериментальная установка

Исследуемое излучение попадает на вещество-сцинтиллятор. Вещество представляет собой неорганический кристалл NaI(Tl). Для предотвращения сильного поглощения излучения в сцинтилляторе вводят небольшие добавки других атомов (в данном случае атомы Таллия). Свободные локальные уровни энергии электрона на примесных атомах таллия располагаются внутри запрещенной зоны кристалла NaI. В процессе релаксации возможны переходы электронов, возбужденных в зону проводимости, на эти уровни. Энергии излучаемых при таких переходах фотонов меньше ширины запрещенной зоны, и они могут поглощаться только атомами таллия. Но концентрация таллия мала

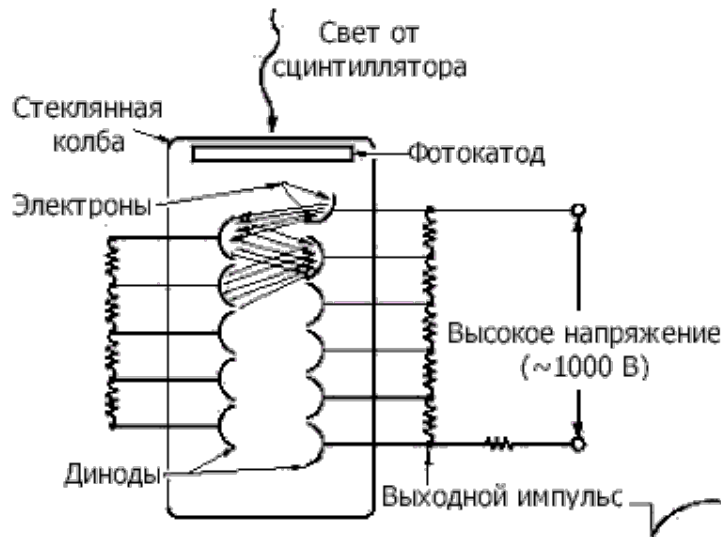


Рис. 1: Схема ФЭУ

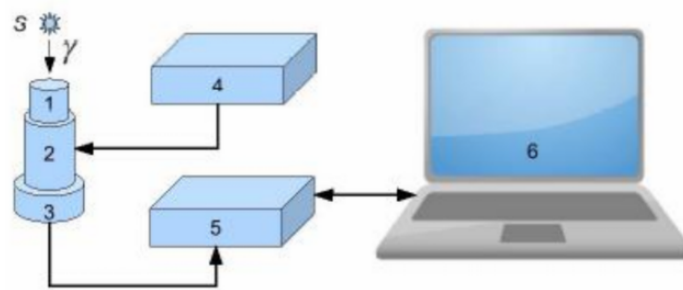


Рис. 2: Принципиальная блок-схема спектрометра. (1 – сцинтиллятор, 2 – ФЭУ, 3 – предусилитель импульсов, 4 – высоковольтный блок питания для ФЭУ, 5 – блок преобразования аналоговых импульсов с ФЭУ в цифровой код (АЦП), 6 – компьютер для сбора данных, их обработки и хранения).



Рис. 3: Пример схематического устройства сцинтилляционного детектора

(порядка 0,1%), поэтому мало поглощение указанных фотонов, и они имеют все шансы вылететь из сцинтиллятора. В этом случае прохождение ионизирующей частицы через вещество будет сопровождаться световой вспышкой, которая и может быть использована для регистрации частицы.

Испущенный сцинтиллятором свет попадает на фотокатод и выбивает из него электроны, которые далее умножаются при помощи ФЭУ. На каждом уровне динодов один электрон выбивает несколько новых, образуя лавину. В конечном итоге электроны попадают на анод. При помощи предусилителя импульсов и АЦП сигнал регистрируется компьютером.

3 Ход работы