

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

М.А. Кирсанов, В.В. Кушин, Н.А. Миханчук, С.Г. Покачалов

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР

Лабораторная работа

МОСКВА 2006

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР

Лабораторная работа

Оглавление

Введение	4
Контрольное задание	16
Лабораторная установка	16
Рабочее задание	19
1. Изучение аппаратурной формы линии сцинтилляционных детекторов.....	19
2. Проверка пропорциональности сцинтилляционного детектора при регистрации гамма-излучения.....	20
3. Исследование влияния удельных потерь энергии частиц на конверсионную эффективность сцинтиллятора.....	21
Обработка результатов	23
Контрольные вопросы и задания.....	25
Список литературы.....	25

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР

Цель работы: исследование характеристик сцинтилляционного детектора (конверсионная эффективность сцинтиллятора, эффективность регистрации ионизирующего излучения, разрешение по энергии), проверка пропорциональности сцинтилляционного детектора, изучение влияния удельных потерь энергии ионизирующего излучения на значение конверсионной эффективности сцинтилляторов.

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляционный метод основан на регистрации коротких вспышек света – сцинтилляций, возникающих в некоторых веществах в результате прохождения через них заряженных частиц. Каждая такая вспышка вызвана отдельной заряженной частицей и состоит из большого количества ($10^3 - 10^6$) фотонов с энергией в несколько электронвольт. Сцинтилляции отличаются от других видов свечения, образующегося при взаимодействии частиц с веществом (например, свечения Вавилова–Черенкова) тем, что они возникают вследствие электронных переходов внутри центров свечения. Центром свечения может быть атом, молекула, ион или более сложное образование.

Сцинтилляционный процесс можно разбить на три этапа: 1 – возбуждение заряженными частицами основного вещества, находящегося в твердой, жидкой или газообразной фазе (генерационный этап); 2 – перенос энергии, потерянной заряженной частицей в веществе к центрам свечения (миграционный этап); 3 – возбуждение и высвечивание центров свечения (внутрицентральной этап).

Для регистрации возникающих под действием отдельных ионизирующих частиц сцинтилляций обычно используются фотоэлектронные умножители – ФЭУ, рис.1. Фотоны сцинтилляционной вспышки попадают на фотокатод ФЭУ, обра-

зую в результате фотоэффекта фотоэлектроны. Фотоэлектроны движутся под действием электрического поля и попадают на диноды ФЭУ.

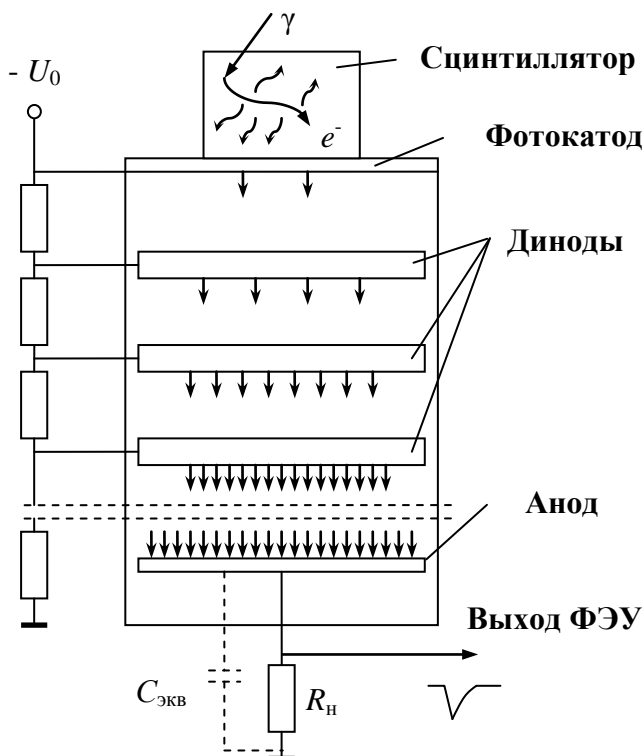


Рис.1. Принцип действия и схема включения сцинтилляционного детектора

В динодах в результате вторичной электронной эмиссии число электронов увеличивается в $10^6 - 10^9$ раз. Электроны собираются на аноде ФЭУ, в результате чего возникает электрический импульс, который регистрируется электронными схемами.

При детектировании ионизирующего излучения с помощью сцинтилляционного детектора необходимо применять тот тип сцинтиллятора, основные параметры которого позво-

ляют наиболее оптимально решать поставленную задачу. К основным параметрам сцинтиллятора можно отнести: конверсионную эффективность η_k , среднюю энергию, расходуемую на образование одного фотона ω_f , время высвечивания τ , эффективность регистрации ионизирующего излучения η . Значения этих параметров для наиболее широко используемых сцинтилляторов приведены в табл.1.

Таблица 1

Основные характеристики некоторых сцинтилляторов

Сцинтилляторы	Плотность, г/см ³	Эффективный атомный номер \bar{Z}	Время высвечивания τ , нс	$h\nu_{св}$, эВ	η_k к электронам	ω_f , эВ	α/β
<u>Неорганические:</u>							
NaI(Tl)	3,67	50	250	3	0,153	19,6	0,5
CsI(Tl)	4,51	54	700	2,2	0,06	36,6	0,5
ZnS(Ag)	4,09	27	1000	2,7	0,1	27	1
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7,13	72	300	2,6	0,02	163,5	0,2
<u>Органические</u>							
Антрацен (C ₁₄ H ₁₀)	1,25	~ 6	25-30	2,77	0,034	81,4	0,1
Нафталин (C ₁₀ H ₈)	1,45	~ 6	70-80	3,6	0,017	176,4	0,1
Стильбен (C ₁₄ H ₁₂)	1,16	~ 6	4-8	3,5	0,03	116,6	0,1
Толан (C ₁₄ H ₁₀)	1,18	~ 6	4-7	3,16	0,032	98	0,1
Пластмассовые (терфинил в полистироле)	1	~ 6	5	3,1	0,015	210	0,1

Физической конверсионной эффективностью сцинтиллятора (или энергетическим выходом) называется отношение энергии световой вспышки $E_{\text{св}}$ к поглощенной в объеме сцинтиллятора энергии заряженной частицы $E_{\text{п}}$:

$$\eta_{\text{к}} = \frac{E_{\text{св}}}{E_{\text{п}}} = N_{\text{ф}} \frac{h\nu_{\text{св}}}{E_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ф}}$ – полное число фотонов, образованных в объеме сцинтиллятора заряженной частицей; $h\nu_{\text{св}}$ – средняя энергия одного фотона сцинтилляции.

Чем выше конверсионная эффективность сцинтиллятора, тем большая доля энергии заряженной частицы преобразуется в световую вспышку, тем, следовательно, больше амплитуда сигнала при одной и той же потерянной в детекторе энергии.

Конверсионная эффективность сцинтиллятора служит мерой его спектрометрических качеств. Сцинтилляторы можно количественно сравнивать друг с другом по отношению их конверсионных эффективностей. При этом обычно конверсионную эффективность NaI(Tl) полагают условно равной единице. Таким образом, относительная конверсионная эффективность CsI(Tl) составляет $\sim 0,4$ (см. табл.1).

Средняя энергия $\omega_{\text{ф}}$, расходуемая заряженной частицей на образование одного фотона сцинтилляции, определяется соотношением

$$\omega_{\text{ф}} = \frac{E_{\text{п}}}{N_{\text{ф}}} = \frac{E_{\text{п}} \cdot h\nu_{\text{св}}}{\eta_{\text{к}} \cdot E_{\text{п}}} = \frac{h\nu_{\text{св}}}{\eta_{\text{к}}} \quad (2)$$

Значения $h\nu_{\text{св}}$ и $\omega_{\text{ф}}$ для некоторых типов сцинтилляторов приведены в табл.1. Наряду с понятием физической конверсионной эффективности вводится величина **технической конверсионной эффективности**:

$$\eta_{\text{кт}} = f \cdot \eta_{\text{к}} , \quad (3)$$

где f – коэффициент, учитывающий долю фотонов, которые попали на фотокатод ФЭУ, от полного числа фотонов $N_{\text{ф}}$, образованных частицей в сцинтилляторе. С учетом записанных соотношений амплитуда импульса на выходе ФЭУ, выраженная в числе электронов, составляет:

$$A = E_{\text{п}} \frac{\eta_{\text{к}} \cdot f}{h\nu_{\text{св}}} \cdot \gamma M , \quad (4)$$

где M – коэффициент усиления ФЭУ; γ – квантовая эффективность фотокатода ФЭУ, равная вероятности фотону вырвать электрон из фотокатода. Если предположить, что все коэффициенты в формуле (4), связывающей амплитуду с поглощенной энергией, не зависят от энергии и от удельных ионизационных потерь энергии частицы, то амплитуда импульса на выходе ФЭУ пропорциональна поглощенной энергии. Другими словами – сцинтилляционный детектор обладает свойством пропорциональности.

Однако оказывается, что физическая конверсионная эффективность, строго говоря, не является постоянной и зависит от удельных ионизационных потерь энергии частицы. Так, например, в кристалле NaI(Tl) амплитуда сигнала от электрона приблизительно в два раза выше амплитуды от альфа-частицы той же энергии. Зависимость сигнала от ионизационных потерь энергии характеризуется коэффициентом α/β (см. табл. 1). Этот коэффициент представляет собой отношение физических конверсионных эффективностей при облучении сцинтиллятора альфа-частицами и электронами одинаковой энергии или, что то же самое в этом случае, отношение амплитуд сигналов на выходе ФЭУ:

$$\alpha/\beta = A_{\alpha}/A_{\beta} \quad (5)$$

Таким образом, сцинтилляционный детектор является пропорциональным для частиц одного типа, а коэффициент пропорциональности зависит от типа регистрируемых частиц.

Временем высвечивания сцинтиллятора τ обычно называется время, в течение которого интенсивность свечения dn_{ϕ}/dt , т.е. число фотонов в сцинтилляционной вспышке в единицу времени, уменьшается в e раз. Если, например, полное число фотонов во вспышке равно N_{ϕ} , и интенсивность вспышки уменьшается по экспоненциальному закону, то

$$\frac{dn_{\phi}}{dt} = \frac{N_{\phi}}{\tau} e^{-t/\tau}. \quad (6)$$

Под эффективностью регистрации излучения η понимают вероятность, с которой частица может быть зарегистрирована детектором, т.е. это есть отношение числа зарегистрированных частиц к числу частиц, попавших в сцинтиллятор:

$\eta = \frac{N}{N_0}$. Для заряженных частиц эффективность регистрации практически равна единице.

Одним из основных преимуществ сцинтилляционных детекторов перед детекторами других типов является высокая эффективность регистрации ими нейтральных излучений (гамма-квантов и нейтронов). Как известно, взаимодействие этого излучения с веществом приводит к образованию заряженных частиц, которые затем регистрируются детектором. Таким образом, эффективность регистрации гамма-квантов и нейтронов будет определяться вероятностью взаимодействия их с веществом детектора. Для гамма-квантов эффективность регистрации в геометрии узкого пучка можно оценить как:

$$\eta = 1 - e^{-\mu x}, \quad (7)$$

где μ - полный линейный коэффициент поглощения гамма-

квантов; x – толщина сцинтиллятора. Величина эффективности регистрации зависит от эффективного атомного номера поглотителя \bar{Z} (растет с увеличением \bar{Z}), поэтому для получения большей эффективности регистрации гамма-квантов используются сцинтилляторы типа NaI(Tl) или CsI(Tl) (см. табл. 1).

Классификацию сцинтилляторов можно проводить по различным признакам. Наиболее четко по своим характеристикам выделяются две большие группы: органические и неорганические.

Органические сцинтилляторы характеризуются сравнительно малыми атомными номерами ($\bar{Z} \sim 6$) и малой плотностью ($\rho \sim 1 \div 2$ г/см³). Органические сцинтилляторы обладают хорошим временным разрешением ($10^{-9} - 10^{-7}$ с). Эффективность же регистрации гамма-излучения такими сцинтилляторами мала, поэтому они чаще всего применяются для регистрации заряженных частиц. К органическим сцинтилляторам относятся органические кристаллы, жидкие и твердые растворы сцинтиллирующих веществ в мономерях и полимерах, а также органические газы.

Неорганические сцинтилляторы характеризуются большими атомными номерами ($\bar{Z} \sim 25 \div 50$) и высокой плотностью ($\rho \sim 4$ г/см³). Эффективность регистрации гамма-излучения такими детекторами велика. Временное разрешение хуже по сравнению с органическими сцинтилляторами ($\sim 10^{-7} - 10^{-6}$ с).

К неорганическим сцинтилляторам относятся щелочно-галогенидные, цинко-сульфидные и оксидные сцинтилляторы, а также сцинтилляторы на основе благородных газов (жидкие, твердые и газообразные).

В физическом эксперименте сцинтилляционные детекторы применяются чаще всего для спектрометрии ионизирующих излучений, в частности гамма-излучения. Спектрометрия гамма-квантов осуществляется измерением энергии вторич-

ных электронов, образующихся при взаимодействии гамма-квантов с веществом сцинтиллятора.

Как известно, гамма-кванты, проходя через вещество, взаимодействуют с ним за счет одного из трех процессов: фотоэффекта, комптон-эффекта и образования пар. Вероятность этих процессов существенно зависит как от энергии гамма-квантов, так и от свойств вещества, с которыми эти гамма-кванты взаимодействуют.

В процессе фотоэффекта гамма-квант с энергией E_γ вырывает из атома один из внутренних (K, L, M, \dots) электронов, затрачивая при этом энергию, равную энергии связи соответствующего электрона, (E_K, E_L, E_M, \dots), которая составляет несколько десятков килоэлектронвольт. Остальная энергия переходит в кинетическую энергию фотоэлектрона $E_{фэ}$:

$$E_{фэ} = E_\gamma - E_K (E_L \dots). \quad (8)$$

При комптоновском рассеянии гамма-квант передает электрону атома только часть своей энергии. При этом энергия комптон-электрона $E_{кэ}$ связана с энергией гамма-кванта E_γ соотношением:

$$E_{кэ} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0 c^2}{E_\gamma (1 - \cos \theta)}}, \quad (9)$$

где θ – угол вылета рассеянного гамма-кванта по отношению к направлению движения первичного гамма-кванта; $m_0 c^2 = 0,511$ МэВ – масса покоя электрона.

В процессе рождения пары создаются две частицы – электрон и позитрон, для образования которых необходимо затратить энергию $2 m_0 c^2 = 1,022$ МэВ. Остальная энергия гамма-квантов переходит в кинетическую энергию электрона и позитрона, а также передается ядру отдачи, либо электрону отдачи, в поле которых может происходить процесс образова-

ния пары.

На рис.2 в качестве примера приведено распределение импульсов по амплитудам от вторичных электронов в сцинтиляционном детекторе типа NaI(Tl) при регистрации в нем моноэнергетических квантов с энергией 0,5 МэВ.

Пик в области 1, который обычно называют пиком полного поглощения, обусловлен двумя процессами взаимодействия гамма-квантов с веществом сцинтиллятора.

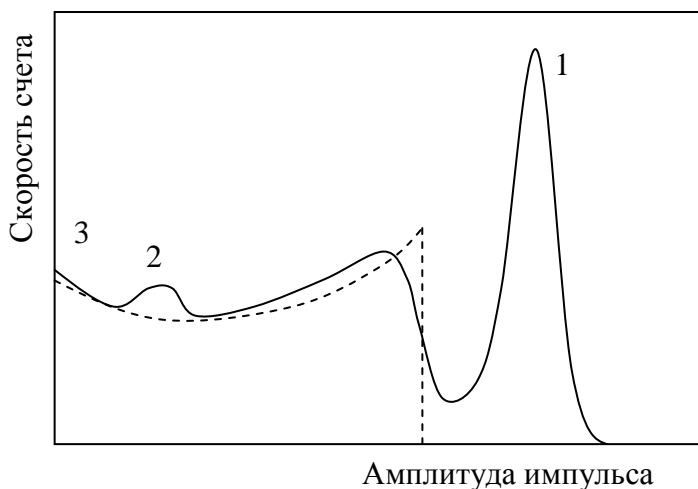


Рис.2. Распределение импульсов по амплитудам при регистрации гамма-квантов с $E_\gamma = 0,5$ МэВ

Во-первых, в область пика попадают события, связанные с поглощением гамма-квантов за счет фотоэффекта. Известно, что фотоэффект сопровождается характеристическим излучением, возникающим при переходах электронов на вакантные места в электронных оболочках атома (K, L, M, \dots), или образованием оже-электронов в результате передачи энергии возбужденного атома одному из электронов внешней оболочки.

Кинетическая энергия оже-электронов при этом практически равна энергии связи электрона, образованного при фотоэффекте.

Характеристическое излучение в свою очередь с большой вероятностью поглощается в объеме сцинтиллятора за счет фотоэффекта на более высоких электронных оболочках.

Таким образом, независимо от того, на каком атоме и какой электронной оболочке в сцинтилляторе поглотился гамма-квант в результате фотоэффекта суммарная энергия вторичных электронов оказывается равна энергии гамма-кванта E_γ .

Вторым процессом, который дает вклад в пик полного поглощения, является так называемое многократное комптоновское рассеяние, когда в результате комптон-эффекта рассеянный гамма-квант теряет полностью свою энергию в сцинтилляторе за счет нескольких последующих рассеяний или фотоэффекта. В этом случае суммарная энергия вторичных электронов также оказывается равна энергии гамма-кванта.

Поэтому по пику полного поглощения можно определить непосредственно энергию гамма-кванта.

Область непрерывного спектра, лежащая левее пика полного поглощения, связана с эффектом комптоновского рассеяния гамма-квантов в объеме сцинтиллятора.

Из (9) видно, что максимальная энергия комптоновских электронов всегда меньше энергии гамма-кванта и равна:

$$E_{\kappa}^{max} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E_\gamma}} \quad (10)$$

В связи с этим существует принципиальная возможность выделить пик полного поглощения, положение максимума которого соответствует энергии гамма-кванта.

Часто в низкоэнергетической части комптоновского распределения выделяют широкий пик, обусловленный рассея-

нием гамма-квантов на углы, близкие к 180° от окна фотоумножителя, стенок защитного кожуха и стеклянного окна контейнера, в который упакован сцинтиллятор. Этот пик называют пиком обратного рассеяния (область 2 на рис.2).

Необходимо отметить, что форма реального амплитудного распределения в комптоновской части спектра обычно сильно отличаются от расчетного. Расчетное распределение комптоновских электронов по энергии может быть получено из формулы Клейна–Нишины–Тамма [1, с.43-44]. На рис.2 для сравнения показано пунктирной линией такое расчетное распределение комптоновских электронов для $E_\gamma = 0,5$ МэВ.

Область 3 спектра на рис.2 связана с регистрацией шумовых импульсов ФЭУ, имеющих малую амплитуду.

Вид распределения импульсов по амплитудам при регистрации гамма-квантов сцинтилляционным детектором существенно зависит от типа сцинтиллятора (неорганический или органический), его геометрических размеров, а также от условий облучения. Например, в кристалле больших размеров за счет многократного комптоновского рассеяния наблюдаются значительное подавление непрерывного спектра комптоновских электронов и соответствующее увеличение интенсивности пика, отвечающего полному поглощению энергии гамма-кванта.

Точность измерения спектрального состава ионизирующего излучения и возможность раздельной регистрации близко расположенных энергетических линий определяется энергетическим разрешением сцинтилляционного детектора. Относительное энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора δ равно $\delta = \frac{\Delta E}{E}$, где E – энергия частицы, поглощенная в сцинтилляторе, ΔE – абсолютное энергетическое разрешение детектора, равное ширине на половине высоты амплитудного распределения, полученного при регистрации моноэнергетических частиц и выраженное в единицах энер-

гии.

При регистрации сцинтилляционным детектором гамма-квантов в области энергий до $1,5 \div 2$ МэВ зависимость относительного энергетического разрешения от энергии кванта может быть достаточно точно описана соотношением

$$\delta^2 = \left(\frac{\Delta E}{E_\gamma} \right)^2 = B^2 + \frac{C_1}{E_\gamma} \quad (11)$$

Величина B существенно зависит от качества изготовления фотоумножителя, особенно от того, насколько одинаковы свойства фотокатода в различных точках, насколько эффективен сбор электронов на первый динод, каково качество и однородность светосбора в сцинтилляторе, оптического контакта с фотоумножителем и т.д. Величина C_1 определяется, в основном, числом образованных фотонов сцинтилляции и их потерями в самом сцинтилляторе, на фотокатод, при собирании на первый динод фотоумножителя. Для лучших сцинтилляционных детекторов с кристаллом NaI(Tl) величина C_1 может достигать $1,5 \cdot 10^{-3}$ МэВ, а величина $B^2 \sim 2 \cdot 10^{-4}$. При таких значениях C_1 и B^2 относительное энергетическое разрешение δ для гамма-квантов с энергией 1 МэВ приблизительно равно 4,5 %.

В области больших значений энергий гамма-квантов становится существенной утечка излучения из кристалла, т.е. выход за пределы сцинтиллятора электронов, образованных вблизи поверхности кристалла. Это приводит к появлению импульсов меньших амплитуд и ухудшению энергетического разрешения.

При использовании органических сцинтилляторов, имеющих обычно небольшой средний атомный номер ($\bar{Z} \sim 6$), фотопик практически отсутствует, так как сечение фотоэффекта σ для гамма-квантов зависит от Z , как $\sigma \sim Z^5$.

КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

При подготовке к лабораторной работе выполнить следующие задания.

1) Нарисовать ожидаемые аппаратурные формы линий при регистрации гамма-квантов с энергией 0,662 и 0,835 МэВ неорганическим сцинтиллятором NaI(Tl).

2) Нарисовать ожидаемую аппаратурную форму линии (распределение импульсов по амплитудам) при регистрации гамма-квантов с энергией 0,662 МэВ неорганическим сцинтиллятором NaI(Tl) и органическим – антраценом.

3) Рассчитать среднее число фотонов в сцинтилляционной вспышке, образующихся при полном поглощении гамма-квантов с $E_\gamma = 0,662$ МэВ в сцинтилляторе NaI(Tl) и $E_\gamma = 0,662$ МэВ в сцинтилляторе антрацен для максимальной энергии комптоновских электронов.

При выполнении заданий воспользоваться необходимыми данными, приведенными в табл.1, и сведениями, изложенными выше.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Функциональная схема лабораторной установки приведена на рис.3. Сцинтиллятор 1 и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) размещены в блоке детектирования БДБСЗ-1еМ («Воря»). В верхней части светозащитного кожуха 2 блока детектирования находится съемная крышка 3 с держателем источников 4. Для уменьшения влияния внешнего фонового излучения на результаты измерений блок имеет свинцовый экран 5. При открывании верхней части экрана появляется доступ к крышке светозащитного кожуха. Для проведения измерений блок детектирования комплектуется набором сменных сцинтилляторов.

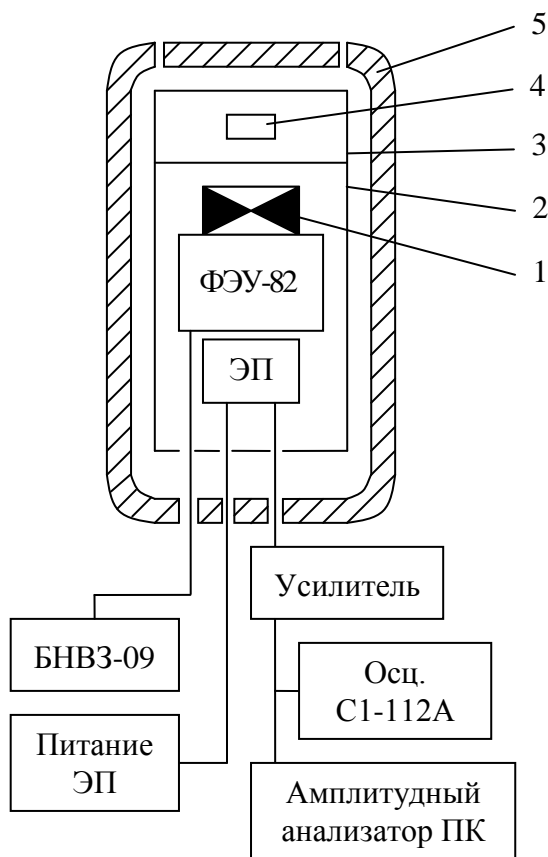


Рис.3. Функциональная схема установки

При работе сцинтилляционного детектора напряжение на ФЭУ подается от высоковольтного стабилизированного источника питания БНВЗ-09. Импульсы с анода ФЭУ через эмиттерный повторитель (ЭП) и усилитель подаются на вход многоканального амплитудного анализатора импульсов, который используется для измерения амплитуд импульсов, поступающих в случайные моменты времени, хранения и обработки информации. Анализатор выполнен на базе персональ-

ного компьютера, в системный блок которого встроена плата, содержащая амплитудно-цифровой преобразователь импульсов (АЦП) и память для хранения данных. С помощью осциллографа С1-112А осуществляется контроль формы импульсов и измерение их амплитуды.

Полученные экспериментальные данные студенты сохраняют в виде файлов на жестком диске персонального компьютера внутри папки «Student» в своей персональной папке.

Подготовка лабораторной установки к работе

ВНИМАНИЕ! Подавать высокое напряжение на электроды ФЭУ можно только при плотно закрытой верхней крышке светозащитного кожуха и крышке радиационного экрана. Высокое напряжение подается на ФЭУ непосредственно после включения БНВЗ-09 тумблером «Сеть».

Подготовка блока детектирования к работе производится следующим образом. Убедиться, что высокое напряжение на ФЭУ не подано, открыть радиационный экран, расположенный в верхней части блока детектирования. Ослабить винты, крепящие светозащитную крышку к кожуху. Установить на фотокатод ФЭУ исследуемый сцинтиллятор. Закрыть крышку светозащитного кожуха, поместить в гнездо держателя требуемый источник гамма-квантов. Закрыть радиационный экран. Установить на блоке БНВЗ-09 переключатель «kV» в положение 0,9 кВ. Включить все приборы, кроме БНВЗ-09, в сеть. Порядок работы с амплитудным анализатором, программой обработки спектров, осциллографом С1-112А приводятся в отдельных инструкциях.

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Показать преподавателю результаты, полученные при выполнении контрольного задания, и, ответив на дополнительные вопросы, приступить к измерениям.

1. Изучение аппаратурной формы линии сцинтилляционных детекторов

При выключенном блоке БНВЗ-09 установить на фотокатод ФЭУ неорганический сцинтиллятор NaI(Tl) диаметром 30 мм и высотой 30 мм. Поместить в гнездо держателя источник гамма-квантов ^{137}Cs (по указанию преподавателя возможно размещение источника непосредственно на кристалле). Включить блок БНВЗ-09. Подобрать напряжение на ФЭУ таким образом, чтобы максимальная амплитуда импульсов не превышала диапазона работы блока амплитудного анализа, т.е. была меньше 10,0 В. Оценку амплитуды импульсов провести с помощью осциллографа.

1. С помощью амплитудного анализатора снять распределение импульсов по амплитудам. Предварительно изменением напряжения на ФЭУ добиться, чтобы пик полного поглощения амплитудного распределения располагался в 500 – 600 каналах. Время измерения выбрать таким, чтобы относительная статистическая ошибка в максимуме распределения (пик полного поглощения) была не более 3%. Полученные данные сохранить в виде файла в своей персональной папке на компьютере. С помощью программы обработки спектров произвести первичную обработку измеренного амплитудного распределения:

- а) определить номер канала, в котором располагается максимум пика полного поглощения.
- б) определить площади, занимаемые пиком полного по-

глощения и комптоновским распределением.

2. Провести аналогичные измерения для кристаллов NaI(Tl) диаметром 30 мм и толщиной 10 мм и органического сцинтиллятора – антрацена, не меняя напряжения на электродах ФЭУ, условий работы амплитудного анализатора и времени измерения, выбранного в п.1. Замену сцинтилляторов можно производить только при выключенном высоковольтном питании (блок БНВЗ-09).

ВНИМАНИЕ! Источник ^{137}Cs кроме гамма-квантов испускает бета-частицы. NaI(Tl) упакован в алюминиевый контейнер с толщиной стенки ≥ 1 мм, поэтому бета-частицы поглощаются в стенке и не попадают в кристалл NaI(Tl). Верхняя часть кристалла антрацена покрыта алюминиевой фольгой толщиной всего 15 мкм. Поэтому перед проведением измерений с антраценом необходимо обязательно положить сверху дополнительную алюминиевую пластинку, которая находится в комплекте гамма-источников ОСГИ.

При обработке амплитудного распределения от антрацена определить площадь под комптоновским распределением и номер канала, который соответствует точке перегиба края комптоновского спектра и, следовательно, максимальной энергии комптоновских электронов (см. рис.2).

2. Проверка пропорциональности сцинтилляционного детектора при регистрации гамма-излучения

Установить сцинтиллятор NaI(Tl) диаметром 40 мм и высотой 40 мм на фотокатод ФЭУ, применяя для лучшего оптического контакта оптическую смазку. Поместить источник гамма-квантов ^{60}Co в гнездо держателя. Подобрать напряжение питания ФЭУ таким образом, чтобы пик полного поглощения располагался в 500 – 600 каналах. Выбрать время измерения таким, чтобы статистическая ошибка в максимуме распределения не превышала 3%.

1. Снять распределение импульсов по амплитудам. Измерен-

ные данные сохранить в виде файла в своей папке. С помощью установленной программы определить положения максимумов пиков полного поглощения (с оценкой погрешности) и ширины пиков на полувысоте.

2. Провести аналогичные измерения для других источников гамма-квантов (табл.2) при том же напряжении на электродах ФЭУ. Если пик полного поглощения расположен на комптоновской части спектра (пьедестале) от другой (большей) энергии гамма-квантов, определение ΔN_i выполнить вручную, найдя левую и правую границы ширины распределения на половине высоты с учетом пьедестала.

Таблица 2

Источники гамма-квантов

Изотоп	Энергия гамма-квантов, МэВ	Период полураспада
^{22}Na	0,511 1,276	2,6 года
^{60}Co	1,173 1,333	5,26 года
^{137}Cs	0,662	30 лет

3. Исследование влияния удельных потерь энергии частиц на конверсионную эффективность сцинтиллятора

В данной работе влияние удельных ионизационных потерь энергии частиц на конверсионную эффективность неорганического сцинтиллятора CsI(Tl) и органического сцинтиллятора (антрацен) исследуется посредством измерения α/β -отношения, т.е. отношения конверсионных эффективностей при облучении сцинтиллятора альфа-частицами и электронами одинаковой энергии. Если в сцинтилляторе регистрируются

альфа-частицы и электроны разных энергий, то α/β -отношение вычисляется по формуле:

$$\alpha/\beta = \frac{A_\alpha}{A_\beta} \cdot \frac{E_\beta}{E_\alpha}, \quad (12)$$

где A_α и A_β - амплитуды сигналов на выходе сцинтилляционного детектора при облучении альфа-частицами и электронами соответственно.

Образцы, на которых проводятся измерения, представляют собой стандартные сцинтилляторы, помещенные в защитные контейнеры. В случае CsI(Tl) альфа-частицы попадают непосредственно на кристалл через отверстия в верхней части контейнера. Кристалл антрацена защищен от воздействия атмосферной влаги алюминиевой фольгой. Для альфа-частиц с энергией 5,15 МэВ потери энергии в фольге составляют ≈ 3 МэВ.

1. Определить α/β -отношение для кристалла CsI(Tl). Для этого установить на фотокатод ФЭУ сцинтиллятор CsI(Tl), верхняя часть контейнера которого снабжена специальными отверстиями. Поместить на кристалл CsI(Tl) источник альфа-частиц ^{239}Pu ($E_\alpha=5,15$ МэВ). Закрыть крышку светозащитного кожуха. Снять распределение импульсов по амплитудам. Предварительно добиться, чтобы максимум амплитудного распределения располагался в 650 – 700 каналах. Ошибка в максимуме амплитудного распределения должна быть не более (5÷6%). Определить номер канала в котором находится максимум распределения. Сохранить данные в виде файла.

При выключенном питании ФЭУ убрать альфа-источник, поместить в держатель источник ^{137}Cs и провести аналогичные измерения при тех же значениях напряжения на электродах ФЭУ. Время измерения выбрать таким образом, чтобы ошибка в максимуме распределения также не превышала

($5 \div 6\%$). Определить положение максимума пика полного поглощения. Сохранить данные в виде файла.

2. Определить α/β -отношение для кристалла антрацена. Для этого установить на фотокатод ФЭУ органический сцинтиллятор – антрацен. Поместить в держатель источник гамма-квантов ^{137}Cs . Снять распределение импульсов по амплитудам, подобрав предварительно напряжение на ФЭУ так, чтобы край амплитудного распределения располагался в 550 – 600 каналах. При обработке амплитудного распределения определить номер канала, который соответствует точке перегиба края комптоновского спектра. Сохранить данные в виде файла. Убрать гамма-источник, поместить на кристалл антрацена альфа-источник ^{239}Pu . Не меняя напряжения на ФЭУ, снять распределение импульсов по амплитудам. Определить номер канала, в котором находится максимум распределения. Сохранить данные в виде файла.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По результатам измерений задания 1 построить измеренные аппаратурные формы линии для сцинтилляторов NaI(Tl) толщиной 30 мм, 10 мм и антрацена.

2. Определить отношение эффективностей регистрации гамма-квантов различными сцинтилляторами, выбрав в качестве нормировочного сцинтиллятора кристалл NaI(Tl) диаметром 30 мм и высотой 30 мм. Привести ошибки полученных величин.

3. Для кристалла NaI(Tl) толщиной 30 мм определить отношение эффективностей поглощения гамма-квантов в процессах фотоэффекта и комптон-эффекта. Сравнить это отношение с аналогичной величиной для кристалла NaI(Tl) толщиной 10 мм. Объяснить полученный результат. Привести ошибки результатов вычислений.

4. По результатам измерений задания 1 определить отношение технических конверсионных эффективностей исследо-

ванных сцинтилляторов. При этом следует учесть, что в случае органического сцинтиллятора фотопик отсутствует, а максимальную энергию комптоновских электронов, которой соответствует край комптоновского спектра, можно определить, используя формулу (10).

5. По результатам измерений задания 2 построить по методу наименьших квадратов зависимость амплитуд импульсов, соответствующих максимумам пиков полного поглощения от энергии гамма-квантов. Сделать вывод о пропорциональности сцинтилляционного детектора в исследованном диапазоне энергий гамма-квантов. По наклону прямой определить энергетическую ширину канала амплитудного анализатора α (кэВ/канал).

6. Определить абсолютное и относительное энергетическое разрешение детектора для различных энергий гамма-квантов. Абсолютное энергетическое разрешение $\Delta E_i = \alpha \cdot \Delta N_i$, где ΔN_i – ширина пика полного поглощения на половине высоты, выраженная в каналах. Относительное энергетическое разрешение определяется по формуле:

$$\delta_i = \frac{\Delta E_i}{E_{\gamma i}} = \frac{\alpha \cdot \Delta N_i}{E_{\gamma i}}.$$

Вычислить ошибки полученных величин.

7. Построить зависимость относительного энергетического разрешения от энергии гамма-квантов в координатах $[\delta^2, E_{\gamma}^{-1}]$. Отложить на графике погрешности величин δ^2 . По графику оценить значения параметров B^2 и C_1 в выражении (11). Сравнить экспериментальную зависимость с ожидаемой для лучших сцинтилляционных детекторов.

8. Оценить α/β -отношение по формуле (12) для сцинтилляторов CsI(Tl) и антрацена. Энергию комптоновских электронов определить с помощью формулы (10). В случае кристалла

антрацена учесть потери энергии альфа-частиц в алюминиевой фольге.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите основные характеристики сцинтилляторов.
2. Какие сцинтилляторы используются для регистрации гамма-квантов и почему?
3. Нарисовать схему включения ФЭУ.
4. Сравнить эффективность регистрации различных видов излучений сцинтилляционным детектором.

Список литературы

1. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Ляпидевский В.К. Сцинтилляционный метод детектирования излучений. М.: МИФИ, 1981.
3. Ляпидевский В.К. Методы детектирования излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987.