

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ
ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ

Цель работы - изучение принципа действия и устройства сцинтилляционных детекторов, экспериментальное определение эффективности регистрации гамма-излучения сцинтилляционными детекторами, определение зависимости эффективности регистрации от размеров кристалла и энергии гамма-излучения.

Теоретическая часть

Принцип действия и устройство сцинтилляционных детекторов

Сцинтилляционный метод является в настоящее время одним из наиболее распространенных способов регистрации и спектрометрии ионизирующих излучений. Сцинтилляционные детекторы широко используются в прикладной ядерной физике для регистрации гамма-излучения, изучения спектров излучений радионуклидов, измерения времени жизни возбужденных состояний атомных ядер и др. Сцинтилляционная техника нашла широкое применение и в производстве: гамма-дефектоскопия, различного вида бесконтактные толщиномеры и плотномеры, сигнальные устройства и т.д.

Действие сцинтилляционных детекторов основано на совершенно других принципах, нежели действие газоразрядных детекторов. Различны характеристики и свойства этих детекторов. В газоразрядных детекторах первичная ионизация усиливается процессами газового разряда, а в сцинтилляционных детекторах используется явление люминесценции, возникающее в прозрачных твердых телах, жидкостях или газах при прохождении через них ионизирующих излучений.

Широкая область применения сцинтилляционных детекторов основывается в значительной мере на комплексе следующих положительных свойств: высокой эффективности регистрации фотонов, заряженных частиц и нейтронов (например, для фотонов и нейтронов эффективность регистрации можно довести до 50 - 100%, что для газоразрядных детекторов практически сделать невозможно); высокой временной разрешающей способности, позволяющей проводить измерения до десятых долей наносекунды; возможности различать вид излучения и определять его энергетический спектр; возможности создавать детекторы любых форм и размеров в зависимости от требований эксперимента.

В простейшем случае сцинтилляционный детектор состоит из сцинтиллятора, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и электронного блока для усиления, анализа и счета импульсов (рис.3.1).

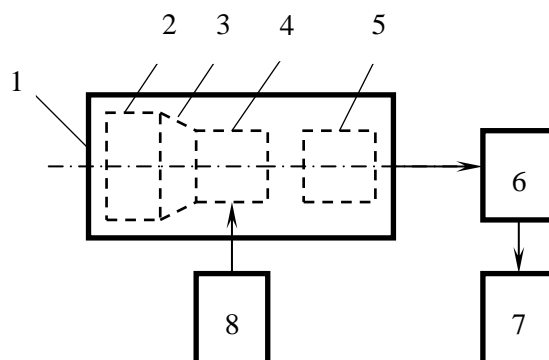


Рис. 3.1. Схема установки для регистрации излучения сцинтилляционным детектором: 1 - корпус блока детектора; 2 – сцинтиллятор; 3 - светопровод; 4 - фотоэлектронный умножитель; 5 - согласующее электронное устройство; 6 - усилитель импульсов; 7 - счетное устройство; 8 - источник высокого напряжения.

В сцинтилляторе часть энергии исследуемого излучения преобразуется в кванты света. Величина преобразованной энергии зависит от типа частиц и материала сцинтиллятора. Часть квантов света достигает фотокатода ФЭУ. Эта часть определяется, в основном, прозрачностью сцинтиллятора и оптическим контактом между сцинтиллятором и фотокатодом ФЭУ. Передача люминесценции от сцинтиллятора на фотокатод ФЭУ иногда осуществляется при помощи так называемых световодов (светопроводов). Благодаря этому в некоторых экспериментах удается отделить сцинтиллятор от фотоумножителя и вывести фотоумножитель из области действия сильных электромагнитных полей, высокого давления, температуры, радиации и т.д. В ряде случаев для обеспечения лучшей равномерности освещения фотокатода и возможности использования детекторов с различной чувствительной поверхностью также целесообразно применять световоды. Фотоны, попадающие на фотокатод ФЭУ, выбивают из него фотоэлектроны. Поток электронов после электронно-оптической фокусировки попадает в диодную систему и усиливается на несколько порядков. Выходные импульсы, снимаемые с анода ФЭУ, подаются на регистрирующие устройства, которые, в зависимости от требуемых задач, могут быть предназначены для счета частиц и анализа амплитуды, формы и длительности импульсов.

Сцинтилляторы, их основные характеристики

Сцинтиллятором называется часть детектора, где происходит взаимодействие излучения с веществом и часть потерянной энергии излучения идет на возбуждение люминофоров, которые, возвращаясь из возбужденного состояния в основное, излучают световые кванты. Основным условием для регистрации сцинтилляции является сдвиг спектра поглощения относительно спектра испускания в сторону более коротких волн. В качестве сцинтилляторов используется довольно широкий класс веществ твёрдых, жидких, газообразных. По химической природе они могут быть органическими и неорганическими. Универсальных сцинтилляторов нет, для каждого вида излучения необходим свой сцинтиллятор.

Основными характеристиками сцинтилляторов являются: спектральная характеристика, время высвечивания, конверсионная эффективность, эффективность регистрации излучения, энергетическое разрешение.

По механизму высвечивания сцинтилляторы можно разделить на три группы: неорганические сцинтилляторы; органические сцинтилляторы; газообразные сцинтилляторы.

Среди неорганических сцинтилляторов чаще всего применяется $\text{NaI}(\text{Tl})$ в виде монокристаллов. Он имеет высокую плотность и хорошую прозрачность, спектр люминесценции имеет максимум примерно при 450 нм, что хорошо согласуется со спектральной характеристикой обычных ФЭУ. Время высвечивания $\text{NaI}(\text{Tl})$ относительно велико $\sim 0,2 - 0,3$ мкс. Благодаря высокой плотности и большому атомному весу кристаллы $\text{NaI}(\text{Tl})$ с успехом используются при регистрации и спектрометрии гамма-излучения.

Применяются также неорганические сцинтилляторы $\text{CsI}(\text{Tl})$ и $\text{LiI}(\text{Eu})$. Кристаллы йодистого лития позволяют создать простые детекторы для регистрации тепловых нейтронов.

К органическим сцинтилляторам относятся монокристаллы антрацена, стильбена, толана и нафталина, а также пластические сцинтилляторы. Отличительной особенностью органических сцинтилляторов по сравнению с неорганическими является малое время высвечивания ($\sim 10^{-9} - 10^{-8}$ с). Из пластических сцинтилляторов можно изготовить детекторы больших размеров и сложной конфигурации. Эффективность регистрации органическими сцинтилляторами фотонов ниже, чем

у неорганических, и поэтому они чаще используются для регистрации заряженных частиц.

К третьему типу сцинтилляторов относятся благородные газы - ксенон, криптон, аргон. Спектр люминесценции у этих газов находится в области ультрафиолетового света, который плохо регистрируется обычными ФЭУ. Это ограничивает возможность их применения.

*Эффективность регистрации гамма-излучения
сцинтилляционным детектором*

Гамма-излучение непосредственно не ионизирует вещество, а его регистрация происходит с помощью вторичных электронов, создаваемых излучением в сцинтилляторе. В связи с этим особое значение имеет одна из основных характеристик детектора- эффективность регистрации.

Физический смысл эффективности регистрации гамма-излучения сцинтилляционным детектором состоит в следующем. Гамма-излучение, проходя через сцинтиллятор, поглощается вследствие различных физических процессов. Интенсивность прошедшего излучения

$$I = I_0 \exp(-\mu \cdot x), \quad (3.1)$$

где x - путь, пройденный излучением в сцинтилляторе; μ - линейный коэффициент поглощения.

Вероятность фотону пройти в сцинтилляторе путь x без взаимодействия равна $\exp(-\mu \cdot x)$. Тогда вероятность взаимодействия фотона с веществом сцинтиллятора и, следовательно, вероятность регистрации

$$p = 1 - \exp(-\mu \cdot x) \quad (3.2)$$

Так как пути x , пройденные фотонами в сцинтилляторе, в зависимости от геометрии эксперимента различны, то различна и эффективность регистрации. Например, для параллельного моноэнергетического пучка фотонов, падающего нормально на поверхность цилиндрического сцинтиллятора, эффективность регистрации

$$\eta = 1 - \exp(-\mu \cdot d) \quad (3.3)$$

где d - толщина кристалла.

В случае точечной геометрии (рис. 3.2), эффективность регистрации определяется по формуле

$$\eta = \frac{\int_{\Omega_0} (1 - \exp(-\mu \cdot x)) d\Omega}{\Omega_0} \quad (3.4)$$

где Ω_0 – телесный угол, под которым виден кристалл из источника.

Переходя от телесного угла Ω_0 к плоскому θ , получим следующее выражение для эффективности регистрации (без учета краев кристалла):

$$\eta = \frac{1}{G} \int_0^{\theta_1} (1 - \exp(-\mu \cdot x)) \sin \theta d\theta, \quad (3.5)$$

G – геометрический фактор,

$$G = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{\theta_1} \sin \theta d\theta = \frac{1}{2} (1 - \cos \theta_1) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}} \right); \quad (3.6)$$

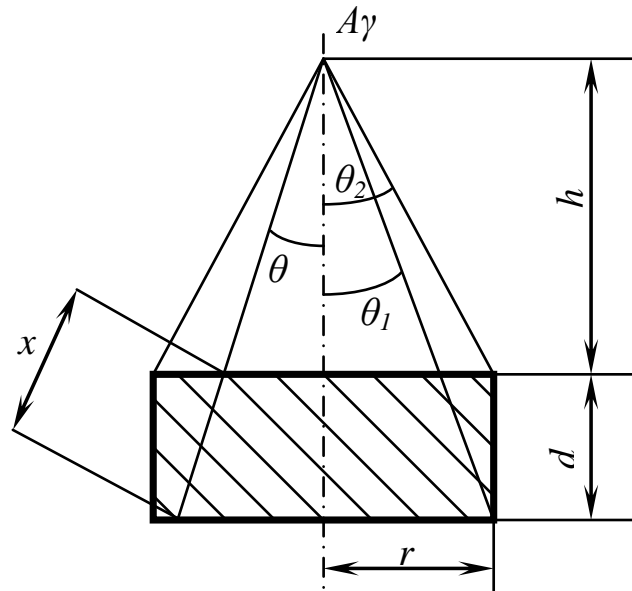


Рис. 3.2. К определению эффективности регистрации для точечной геометрии источник-кристалл (x - путь, проходимый фотонами в кристалле).

Фотоэлектронный умножитель

Импульс света, возникающий в сцинтилляторе при прохождении через него ионизирующей частицы, регистрируется с помощью фотоэлектронного умножителя, состоящего из фотокатода, анода и динодов (рис. 3.3). Попадая сквозь прозрачное окно на фотокатод ФЭУ, кванты света вырывают из светочувствительного слоя некоторое количество электронов. Фотоэлектроны ускоряются электрическим полем и ударяют о специальные электроды, называемые динодами. На динодах происходит умножение электронов. Последний динод является анодом.

Наиболее важной частью ФЭУ является фотокатод, который изготавливают из щелочных металлов с малой работой выхода. Основными требованиями к фотокатоду являются: высокая спектральная чувствительность, равномерная по всей поверхности катода, соответствие спектральной чувствительности фотокатода спектральному составу люминесценции сцинтиллятора; минимальная термоэмиссия при рабочей температуре (минимальный шум), стабильность в работе (минимальное “утомление”).

К основным характеристикам фотокатода ФЭУ относится спектральная характеристика, квантовый выход и интегральная чувствительность. Квантовый выход $\eta(\lambda)$ - это величина, которая определяет количество фотоэлектронов, выбитых из фотокатода одним квантом света с длиной λ . Лучшие фотокатоды имеют квантовый выход от 10 до 25%. Интегральная чувствительность фотокатода ФЭУ S - это отношение фототока катода к световому потоку излучения от источника света с определенной температурой. Величина $S = 20 \div 200$ [мкА/Лм] в зависимости от материала фотокатода. Для сурьмяно-цезиевых фотокатодов S лежит в пределах 20 - 80 мкА/лм с максимумом при 450 нм.

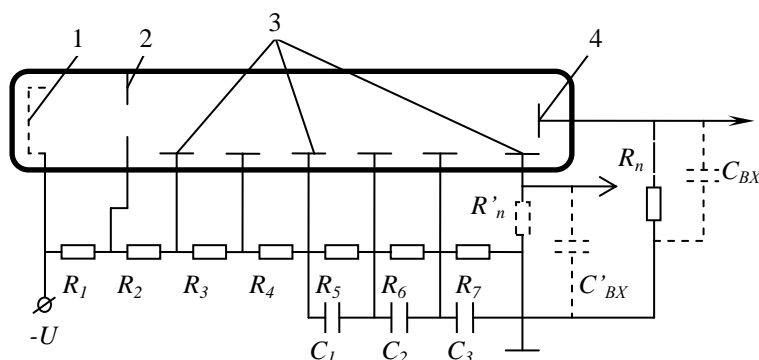


Рис. 3.3. Устройство и схема включения ФЭУ: 1 - фотокатод; 2 - диафрагма, 3 - диноды; 4 - анод

Спектральная характеристика фотокатода ФЭУ – это зависимость квантового выхода от длины волны (рис. 3.4).

Диноды изготавливаются из металлов с малой работой выхода, способных при бомбардировке электронами испускать вторичные электроны в количестве, превышающем число первичных в несколько раз. Если N_e - число электронов, собранных с фотокатода на 1-й динод, то число электронов, достигших анода,

$$N_a = N_e \cdot m^n, \quad (3.7)$$

где m – коэффициент вторичной эмиссии электронов; n – число динодов.

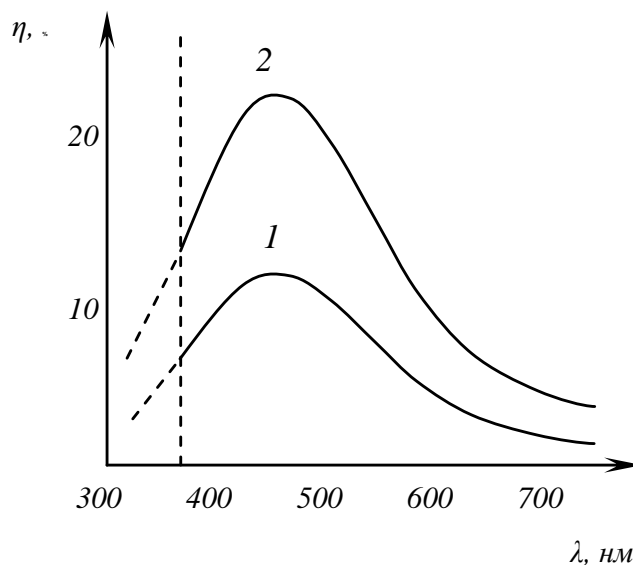


Рис. 3.4. Спектральная характеристика фотокатодов ФЭУ:

1 - фотокатод из $Sb Cs O$ ($S = 60$ мкА/Лм);

2 – фотокатод из $Sb Cs K Na O$ ($S = 150$ мкА/Лм)

Если это равенство выполняется, то ФЭУ работает в линейном режиме, и амплитуда импульса на его выходе пропорциональна числу фотоэлектронов, выбитых с катода, следовательно, и интенсивности свечения сцинтиллятора. Число динодов в фотоумножителе обычно равно 10 - 12. Для изготовления динодов используются сплавы $Al-Mg-Si$ или $Cu-Al-Mg$. Материалы динодов должны иметь высокий коэффициент вторичной электронной эмиссии, малую термоэмиссию и фотоэмиссию.

Коэффициент умножения ФЭУ равен:

$$M = q \cdot m^n = q \cdot \left(A \cdot U_0 \cdot \exp\left(-\frac{U_d}{U_0}\right) \right)^n, \quad (3.8)$$

где A и U_0 - константы, зависящие от материала динодов; q - коэффициент сбора электронов на 1-й динод. При $U_d = 100-150$ В $m=2-7$. Из приведенной формулы следует, что коэффициент усиления ФЭУ и, следовательно, амплитуда импульса, вызванного сцинтилляцией кристалла, сильно зависят от напряжения, поданного на ФЭУ.

Кроме полезных сигналов на выходе ФЭУ, существуют шумовые импульсы, которые образуют темновой ток. Основные причины шумовых импульсов следующие: термоэмиссия с фотокатода и с первого динода ФЭУ; автоэлектронная эмиссия; ионная и оптическая обратная связь; токи утечки через изоляцию и радиоактивность стекла.

Число регистрируемых шумовых импульсов растет с напряжением. Шумовые импульсы чаще имеют амплитуду, меньшую, чем полезные импульсы, поэтому их можно отделить дискриминатором. Для уменьшения шума применяют охлаждение фотокатода ФЭУ, так как темновой ток зависит от температуры по закону:

$$i = A \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{\varphi}{k \cdot T}\right), \quad (3.9)$$

где φ - работа выхода электронов из материала фотокатода ФЭУ; A – константа.

Кроме вышеизложенного метода борьбы с шумом, применяют также метод двойных или тройных совпадений.

Форма импульса тока на выходе ФЭУ

Для работы ФЭУ необходимо на диноды подавать последовательно возрастающее напряжение. Практически это осуществляется с помощью делителя напряжения (резисторы $R_1 - R_7$ на рис.3.3). Для безопасности работ с ФЭУ высокое напряжение обычно подается на фотокатод, тогда на аноде отсутствует постоянная составляющая напряжения, и измеряется только импульсный ток. Часто в экспериментах необходимо с одного ФЭУ снимать два сигнала. Для этого в цепи последнего динода устанавливается резистор R'_H (см. рис 3.3). Сигнал, снятый с R'_H , имеет полярность, противоположную анодному сигналу.

Для обеспечения работы ФЭУ в линейном режиме ток через делитель должен в 10 - 20 раз превышать максимальный анодный ток.

Форма импульса тока на выходе ФЭУ определяется величиной времени высвечивания сцинтиллятора τ_0 и постоянной схемы включения - $R_H C_{BX}$. Ток в анодной цепи ФЭУ i_ϕ разветвляется на i_R - ток, протекающий через сопротивление нагрузки, и i_C -ток, протекающий через емкость, поэтому

$$i_R(t) + i_C(t) = i_\phi. \quad (3.10)$$

Ток i_ϕ можно представить в следующем виде:

$$i_{\phi} = \frac{Q}{\tau_0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right), \quad (3.11)$$

где Q – величина заряда на выходе ФЭУ.

Для напряжения U , образующегося на сопротивлении R , получим следующее уравнение:

$$\frac{U}{R} + C \cdot \frac{dU}{dt} = \frac{Q}{\tau_0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right). \quad (3.12)$$

Решение этого уравнения:

$$U(t) = \frac{Q}{C} \cdot \frac{RC}{\tau_0 - RC} \cdot \left(\exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right). \quad (3.13)$$

При $RC \gg \tau_0$ решение имеет вид

$$U(t) = \frac{Q}{C} \cdot \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \right). \quad (3.14)$$

Исследуя эту зависимость при разных t можно установить, что передний фронт импульса (малые t) определяется τ_0 , задний фронт (большие t) – RC .

Правила выбора величины RC : $RC > 5\tau_0$, обычно $RC = 5 \div 10\tau_0$, например, при работе с кристаллом $NaI(Tl)$, у которого $\tau_0 = 0,25 \cdot 10^{-6}$ с, $RC \geq 1,25 \cdot 10^{-6}$ с.

Экспериментальная часть

Описание установки для регистрации гамма-излучения

В лабораторной работе используется установка, структурная схема которой приведена на рис. 3.5. Установка состоит из 3-х спектрометрических сцинтилляционных детекторов с кристаллами $NaI(Tl)$ (на рис.3.5. приведены два детектора), размерами: 1-й - $\varnothing 25 \times 25$ мм; 2-й - $\varnothing 40 \times 40$ мм и 3-й - $\varnothing 150 \times 100$ мм. В детекторах использованы фотоумножители: в 1-м - ФЭУ-35, во 2-м - ФЭУ-93; в 3-м - ФЭУ-49Б.

На детекторы подается высокое напряжение для питания ФЭУ от стабилизированного источника питания. Рабочее напряжение для детектора № 1 составляет +1300 В, для детектора № 2 + 1600 В; для детектора № 3 + 1700 В. Катоды ФЭУ - заземлены.

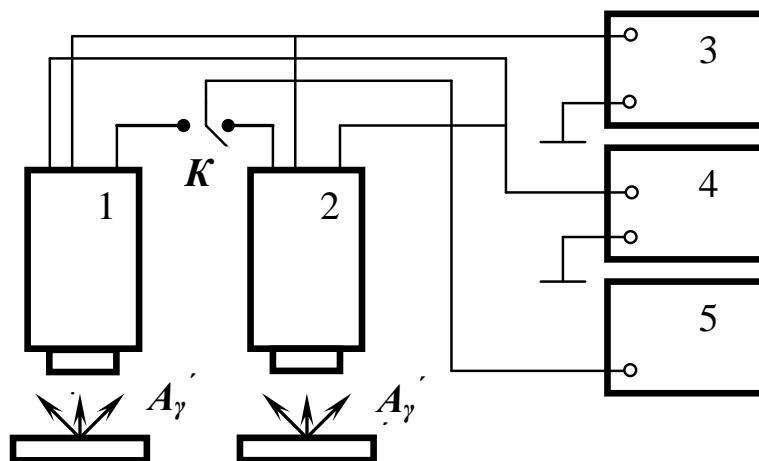


Рис. 3.5. Схема установки для регистрации гамма-излучения

Согласующее устройство детектора - эмиттерный повторитель, питается от источника низкого напряжения 4 ($\pm 12\text{В}$). Эмиттерный повторитель согласует высокое выходное сопротивление ФЭУ с низким волновым сопротивлением кабеля, соединяющего детектор с регистрирующим прибором.

Для регистрации импульсов, поступающих с детекторов, служит пересчетный прибор 5 типа ПСО2. Ключ "К", расположенный на стойке, служит для последовательного подключения высокого напряжения, низкого напряжения и регистрирующего прибора к каждому из детекторов.

Блоки детекторов состоят из корпуса, в котором находятся сцинтиллятор, ФЭУ и эмиттерный повторитель. Блок детектора представляет собой герметичную неразборную конструкцию, в которой сцинтиллятор и ФЭУ непосредственно соединены между собой, образуя сцинтиблок. В результате этого достигается хороший оптический контакт между сцинтиллятором и ФЭУ.

Проведение эксперимента

Эффективность регистрации определяется для 3-х детекторов разных размеров и 3-х источников излучений с различной энергией гамма-излучения.

Характеристики источников излучения, используемых в работе, приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Источник	A_0 , кБк	E_γ , кэВ	Квантовый выход k , %	$T_{1/2}$, сут.	Дата паспортизации активности
^{137}Cs	113,5	661,660	85,1	11020	31.12.2001 г.
^{60}Co	99,66	1173,238	99,86	1925,5	
		1332,502	99,98		
^{22}Na	123,1	511	180,76	950,8	
		1274,54	99,9		

Экспериментально эффективность регистрации определяется следующим образом. Для каждого детектора устанавливается своё рабочее напряжение. Затем измеряется скорость счёта фона $n_{фон}$, а затем скорости счёта от каждого источника $n_{изм}$. Зная абсолютную активность источников, эффективность регистрации определяется по формуле:

$$\eta = \frac{\bar{n}_{изм} - \bar{n}_\phi}{n_{ист}} \cdot 100\% = \frac{\bar{n}_{изм} - \bar{n}_\phi}{A_\gamma \cdot G} \cdot 100\%, \quad (3.15)$$

где: $n_{ист} = A_\gamma \cdot G$; A_γ - число фотонов, испускаемых источником, определяемое как число распадов источника (активность A), умноженное на квантовый выход гамма квантов на один распад (в долях от единицы), G - геометрический фактор.

Геометрический фактор G определяется из формулы (3.6)

Порядок работы:

ВНИМАНИЕ!!! Включение установки и размещение источника ионизирующего излучения осуществляются только в присутствии преподавателя

1. Включить источники питания низкого и высокого напряжения, пересчётный прибор. Полярность сигнала, снимаемого с детекторов - отрицательная.
2. Поставить переключатель детекторов в положение 1, при этом к схеме подключается детектор № 1. Установить рабочее напряжение, равное 1300 В.

- Измерить $n_{1\phi}$ для детектора № 1, для этого сделать без источника 10 измерений за 10 сек. каждое, в автоматическом режиме, записать показания и найти среднее значение фона:
- Установить на подставку источник излучения ^{60}Co , определить $n_{изм}$, для этого сделать 10 измерений за 10 сек. каждое, определить среднее значение. Найти $n_{изм}$ для других источников, результаты записать в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Источник	Расстояние до источника h , см	G	A_γ	$n_{ист}, \text{с}^{-1}$	$n_{изм}, \text{с}^{-1}$	$n_\phi, \text{с}^{-1}$	$\eta, \%$
^{60}Co							
^{137}Cs							
^{22}Na							

- Поставить переключатель в положение 2. Установить рабочее напряжение на детекторе № 2, равное 1600 В. Провести измерения n_ϕ и $n_{изм}$ для детектора № 2, аналогично п.3 и п.4. Результаты свести в таблицу, аналогичную табл. 3.2.
- Поставить переключатель в положение 3. Установить рабочее напряжение на детекторе № 3, равное 1700 В. Провести измерения n_ϕ и $n_{изм}$ для детектора № 3, аналогично п.3 и п.4. Результаты свести в таблицу, аналогичную табл. 3.2.
- Обработать полученные результаты, построить зависимость эффективности регистрации от E_γ для трёх детекторов.
- Теоретически определить эффективность регистрации гамма-излучения сцинтиляционным детектором с кристаллом NaI(Tl) . Расчет эффективности регистрации производится по формулам (3.3) для параллельного моноэнергетического пучка фотонов, η_1 и (3.5) для точечного источника, η_2 . Результаты занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Энергия γ -квант, МэВ	$\mu, \text{см}^{-1}$	Детектор 1		Детектор 2		Детектор 3	
		$\eta_1, \%$	$\eta_2, \%$	$\eta_1, \%$	$\eta_2, \%$	$\eta_1, \%$	$\eta_2, \%$
0.2	1.1						

Энергия γ -квант, МэВ	μ , см ⁻¹	Детектор 1		Детектор 2		Детектор 3	
		η_1 , %	η_2 , %	η_1 , %	η_2 , %	η_1 , %	η_2 , %
0.3	0.4						
0.4	0.4						
0.5	0.3						
0.6	0.2						
0.8	0.2						
1.0	0.2						
1.25	0.1						
1.5	0.1						

Построить графики зависимости $\eta = f(E_\gamma)$ для трех кристаллов. Сравнить результаты, полученные экспериментально и теоретически. Объяснить зависимости эффективности регистрации гамма-излучения от энергии, толщины сцинтиллятора и вида сцинтиллятора.

Контрольные вопросы

1. Принцип действия и устройство сцинтилляционных детекторов.
2. Характеристики сцинтилляционных детекторов.
3. Устройство и схема включения ФЭУ.
4. Характеристики фотокатода ФЭУ.
5. Шумы ФЭУ, способы их уменьшения.
6. Форма импульса на выходе ФЭУ.
7. Светопроводы, их основные характеристики.
8. Сцинтилляторы, их основные характеристики.
9. Эффективность регистрации различных видов излучений сцинтилляционным детектором.

Список рекомендуемой литературы.

1. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985
2. Волков Н.Г., Христофоров В.А., Ушакова Н.П. Методы ядерной спектроскопии. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Матвеев В.В., Хазанов Б.И. Приборы для измерения ионизирующих излучений. М.: Атомиздат, 1972.
4. Экспериментальные исследования полей гамма-излучения и нейтронов. Под ред. Ю.А. Егорова, М.: Атомиздат, 1974.

5. Сцинтилляционные методы спектрометрии гамма-излучения и электронов.
В.В. Кадилин, В.Т. Самосадный, С.В. Исаков и др. Под общ. ред. В.Т. Самосадного, МИФИ, 2003