



Лекция 6. Сцинтилляции и сцинтилляторы

Дисциплина: Радиационные эффекты и современная спектроскопия твердого тела.

Преподаватель: Phd, и.о. доцента Мархабаева А.А.



Цель лекции: Познакомить студентов с природой сцинтилляционного излучения, физическими механизмами его возникновения, типами сцинтилляционных материалов и принципами их работы, а также рассмотреть области применения сцинтилляторов в системах регистрации ионизирующих излучений.

Основные вопросы лекции

- Понятие сцинтилляции и физический механизм её возникновения.
- Энергетические переходы и процессы в сцинтилляторе.
- Основные типы сцинтилляторов: неорганические, органические, пластмассовые.
- Влияние активаторов и дефектов на эффективность свечения.
- Временные характеристики и световой выход.
- Фотоэлектронные умножители и преобразование света в электрический сигнал.
- Энергетическое разрешение сцинтилляционных систем.
- Применение сцинтилляторов в радиационной физике, медицине и спектроскопии.



Основными характеристиками сцинтилляторов являются: световой выход, спектральный состав излучения и длительность сцинтилляций. При прохождении заряженной частицы через сцинтиллятор в нем возникает некоторое число фотонов с той или иной энергией. Часть этих фотонов будет поглощена в объеме самого сцинтиллятора, и вместо них будут испущены другие фотоны с несколько меньшей энергией. В результате процессов реабсорбции, наружу будут выходить фотоны, спектр которых характерен для данного сцинтиллятора. Световым выходом или конверсионной эффективностью сцинтиллятора называется отношение энергии световой вспышки, выходящей наружу, к величине энергии E заряженной частицы, потерянной в сцинтилляторе,

$$\chi = \frac{\bar{n}h\bar{\nu}}{E} \quad (1.40)$$



Неорганические сцинтилляторы. Неорганические сцинтилляторы представляют собой кристаллы неорганических солей. Практическое применение в сцинтилляционной технике имеют главным образом галоидные соединения некоторых щелочных металлов. Для увеличения светового выхода таких сцинтилляторов вводятся специальные примеси других элементов, называемых активаторами (например, таллий). Сцинтиллятор, построенный на основе кристалла NaI(Tl) , обладает большим световым выходом.

В качестве твёрдотельных неорганических сцинтилляторов используются, NaCl(AgCl) , NaI .

(активированный Tl), LiI(Eu) , LiF(Eu) , CsI(Tl) , KI(Tl) , $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) и др. Все они позволяют выращивать крупные кристаллы, которые затем соответствующим образом обрабатываются. Эти сцинтилляторы применяются для регистрации γ -излучения, так как обладают большим средним порядковым номером Z и высокой плотностью. Малой гигроскопичностью обладают кристаллы CsI , которые могут использоваться в сцинтилляционных счётчиках даже в атмосферных условиях.



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. Иногда сочетание фосфора с ФЭУ производится через специальную оптическую систему (светопровод). 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, откаченный до остаточного давления не выше 10^{-6} мм рт. ст., в торце которого расположено прозрачное плоское окно, на поверхность которого со стороны эвакуируемого объёма нанесён тонкий слой вещества с малой работой выхода электронов (фотокатод), обычно на основе сурьмы и цезия. Далее в эвакуированном пространстве располагается серия электродов – динодов, на которые с помощью делителя напряжения от источника электропитания подаётся последовательно возрастающая разность потенциалов. Диноды ФЭУ изготавливаются из вещества также с малой работой выхода электронов. Они способны при бомбардировке их электронами испускать вторичные электроны в количествах, превышающих число первичных в несколько раз. Последний динод является анодом ФЭУ.

Основным параметром ФЭУ является коэффициент усиления при определённом режиме питания. Обычно ФЭУ содержит девять и более диодов 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.

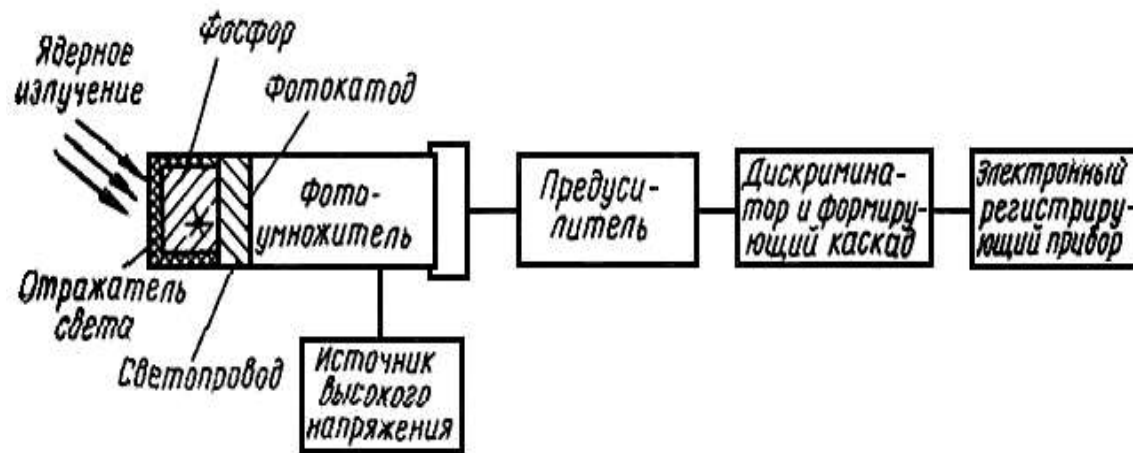


Рис. 1.9. Блок-схема сцинтилляционного счётчика



Фотоны, попадая на фотокатод ФЭУ, в результате фотоэффекта выбивают электроны, в результате чего на аноде ФЭУ возникает электрический импульс, который далее усиливается диодной системы за счёт механизма вторичной электронной эмиссии. Анодный токовый сигнал ФЭУ – через усилитель или непосредственно - подается на вход измерительного прибора – счетчика импульсов, осциллографа, аналого- цифрового преобразователя и т.п. Амплитуда и длительность импульса на выходе определяются свойствами как сцинтиллятора, так и ФЭУ.



Фосфор, как правило, упаковывают в металлический контейнер, сквозь стенки которого частицы могут не пройти. Поэтому тяжёлые частицы обычно регистрируют более простыми детекторами – ионизационной камерой или пропорциональным счётчиком. Электроны регистрируют сцинтилляционными счётчиками в тех случаях, когда требуется хорошее разрешающее время. Основными фосфорами обычно являются органические монокристаллы антрацена, стильбена или пластики. Эффективность регистрации заряженных частиц сцинтилляционным счётчиком близка к 100%. Сцинтилляционные счётчики используют особенно широко для регистрации γ -излучения.



К таким фосфорам относятся неорганические монокристаллы NaI(Tl), CsI(Tl), KI(Tl). С меньшей эффективностью γ -излучение регистрируется жидкими фосфорами и пластиками в результате взаимодействия нейтронов с атомными ядрами. Для регистрации медленных используются ядерные реакции расщепления лёгких ядер под действием нейтронов [$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ и $^3\text{He}(n, p)^1\text{H}$] с регистрацией α -частиц и протонов; деления тяжёлых ядер с регистрацией осколков деления; радиационный захват нейтронов ядрами (n, γ) с регистрацией γ -квантов, а также возбуждения искусственной радиоактивности. Для регистрации α -частиц, протонов и осколков деления применяются ионизационные камеры и пропорциональные счётчики, которые заполняют газообразным BF₃ и др. газами, содержащими В или ³Н, либо покрывают их стенки тонким слоем твёрдых В, Li или делящихся веществ.



Конструкция и размеры таких камер и счётчиков разнообразны. Пропорциональные счётчики могут достигать 50 мм в диаметре и 2 м длины. Наибольшей эффективностью к тепловым нейтронам обладают нейтронные детекторы, содержащие ^{10}B или ^3He . Для регистрации медленных нейтронов используются также сцинтилляционные счётчики (на кристаллах LiI с примесью Eu , на сцинтиллирующих литиевых стеклах, либо смеси борсодержащих веществ и сцинтиллятора ZnS). Эффективность регистрации быстрых нейтронов перечисленными детекторами в сотни раз меньше, поэтому быстрые нейтроны предварительно замедляют в парафиновом блоке, окружающем нейтронный детектор.



Специально подобранные форма и размеры блоков позволяют получить практически постоянную эффективность регистрации нейтронов в диапазоне энергии от нескольких кэВ до 20 МэВ (всеволновой счётчик). При непосредственном детектировании нейтронов с энергиями ~ 100 кэВ обычно используется упругое рассеяние нейтронов в водороде или гелии или регистрируются ядра отдачи. Так как энергия последних зависит от энергии нейтронов, то такие нейтронные детекторы позволяют измерять энергетический спектр нейтронов. Сцинтилляционные нейтронные детекторы также могут регистрировать быстрые нейтроны по протонам отдачи в органических и водородсодержащих жидких сцинтилляторах. Некоторые тяжёлые ядра, например ^{238}U и ^{232}Th , делятся только под действием быстрых нейтронов.



Существует большое количество различных изотопов, применяемых в качестве радиоактивных индикаторов нейтронов разных энергий E . В тепловой области энергий наибольшее распространение имеют ^{55}Mn , ^{107}Ag , ^{197}Au : для регистрации резонансных нейтронов применяют ^{55}Mn ($E = 300$ эВ), ^{59}Co ($E = 100$ эВ), ^{103}Rh , ^{115}In ($E = 1,5$ эВ), ^{127}I ($E = 35$ эВ), ^{107}Ag , ^{197}Au ($E = 5$ эВ). В области больших энергий используют пороговые детекторы ^{12}C ($E = 20$ МэВ), ^{32}S ($E = 0,9$ МэВ) и ^{63}Cu ($E = 10$ МэВ)._



Принцип регистрации нейтронов

Нейтроны непосредственно не создают в детекторе ионных пар. Однако, взаимодействуя с веществом детектора, они вызывают разнообразные ядерные реакции с образованием заряженных частиц и γ -квантов. Это вторичное излучение можно зарегистрировать обычными детекторами, такими, как ионизационная камера, сцинтилляционный счетчик и др. Следовательно, детектор нейтронов представляет собой обычный детектор заряженного или γ -излучения, в который помещено вещество, интенсивно взаимодействующее с нейтронами. К главным критериям, по которым выбирается вещество для детектора нейтронов, относятся: тип реакции, сечение реакции и энергия вторичного излучения.



Вопросы для контроля изучаемого материала

1. Что такое сцинтилляция и каков её физический механизм?
2. В чем различие между неорганическими и органическими сцинтилляторами?
3. Какова роль активаторов в сцинтилляционных материалах?
4. Какие параметры определяют качество сцинтиллятора?
5. Объясните принцип работы фотоэлектронного умножителя.
6. Что такое световой выход и время спада сцинтилляции?
7. От чего зависит энергетическое разрешение сцинтилляционных детекторов?
8. Где применяются сцинтилляторы в науке и технике?



Рекомендуемая литература:

1. Тихонов В. Н. Детекторы ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 2007.
2. Михайлов М. Н. Основы радиационной физики и дозиметрии. СПб.: БХВ-Петербург, 2013.
3. Кузнецов С. В. Физика ионизирующих излучений. М.: Академия, 2018.
4. Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement. 4th ed. Wiley, 2010.
5. Birks J. B. The Theory and Practice of Scintillation Counting. Pergamon Press, 1964.