

## 1.2 Сцинтилляции и сцинтилляторы

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,

$$\chi = \frac{\bar{n} h \bar{\nu}}{E} \quad (1)$$

где  $\bar{n}$  - среднее число фотонов, выходящих наружу,  $h \bar{\nu}$  - средняя энергия фотонов. Каждый сцинтиллятор испускает не моноэнергетические кванты, а сплошной спектр, характерный для данного сцинтиллятора.

Очень важно, чтобы спектр фотонов, выходящих из сцинтиллятора, совпадал или хотя бы частично перекрывался со спектральной характеристикой ФЭУ. Степень перекрытия внешнего спектра сцинтилляции со спектральной характеристикой  $\varepsilon(\nu)$  данного ФЭУ определяется коэффициентом согласования

$$K = \frac{\int_0^{\infty} F(\nu) \varepsilon(\nu) d\nu}{\int_0^{\infty} F(\nu) d\nu} \quad (2)$$

где  $F(\nu)$  - внешний спектр сцинтиллятора или спектр фотонов, выходящих наружу из сцинтиллятора. На практике при сравнении сцинтилляторов, сочетаемых с данными ФЭУ, вводят понятие сцинтилляционной эффективности, которая определяется следующим выражением:

$$A = K \chi \quad (3)$$

Сцинтилляционная эффективность учитывает как число фотонов, испускаемых сцинтиллятором на единицу поглощенной энергии, так и чувствительность данного ФЭУ к этим фотонам. Обычно сцинтилляционную эффективность данного сцинтиллятора определяют путем сравнения со сцинтилляционной эффективностью сцинтиллятора, принятого за эталон.

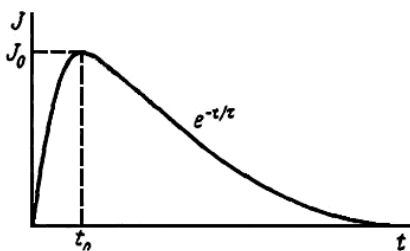
Интенсивность сцинтилляции изменяется со временем по экспоненциальному закону

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

где  $I_0$  — максимальное значение интенсивности сцинтилляции;  $\tau$  — постоянная времени затухания, определяемая как время, в течение которого интенсивность сцинтилляции уменьшается в  $e$  раз.

Число фотонов света  $n$ , испущенных за время  $t$  после попадания регистрируемой частицы, выражается формулой

$$n = n_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5)$$



где  $n_0$  - полное число фотонов, испущенных в процессе сцинтилляции.

**Рис. 2.** Зависимость интенсивности свечения фосфора от времени.

Процессы люминесценции (высвечивания) фосфора делят на два вида: флуоресценции и фосфоресценции. Если высвечивание происходит непосредственно во время возбуждения или в течение промежутка времени порядка  $10^{-8}$  сек, то процесс называется флуоресценцией. Интервал  $10^{-8}$  сек выбран потому, что он по порядку величины равен времени жизни атома в возбужденном состоянии для так называемых разрешенных переходов. Хотя спектры и длительность флуоресценции не зависят от вида возбуждения, выход же флуоресценции существенно зависит от него. Так при возбуждении кристалла  $\alpha$ -частицами выход флуоресценции почти на порядок меньше, чем при фотовозбуждении. Под фосфоресценцией понимают люминесценцию, которая продолжается значительное время после прекращения возбуждения. Но основное различие между флуоресценцией и фосфоресценцией заключается не в длительности послесвечения. Фосфоресценция кристаллофосфоров возникает при рекомбинации электронов и дырок, возникших при возбуждении. В некоторых кристаллах возможно затягивание послесвечения за счет того, что электроны и дырки захватываются «ловушками», из которых они могут освободиться, лишь получив дополнительную необходимую энергию. Отсюда очевидна зависимость длительности

фосфоресценции от температуры. В случае сложных органических молекул фосфоресценция связана с пребыванием их в метастабильном состоянии, вероятность перехода из которого в основное состояние может быть малой. И в этом случае будет наблюдаться зависимость скорости затухания фосфоресценции от температуры.

Сцинтилляционные детекторы основаны на регистрации люминесценции, вызываемой действием излучения на люминофоры, в которых энергия излучения преобразуется в световые вспышки (сцинтилляции). Люминофоры, используемые для этих целей, обычно называются сцинтилляторами.

В качестве сцинтилляторов используются различные вещества (твёрдые, жидкие, газообразные). Сцинтиллятор может быть органическим (кристаллы, пластики или жидкости) или неорганическим (кристаллы или стекла). Используются также газообразные сцинтилляторы.

**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  $\text{NaI(Tl)}$ , обладает большим световым выходом.

В качестве твёрдотельных неорганических сцинтилляторов используются,  $\text{NaCl(AgCl)}$ ,  $\text{NaI}$  (активированный Tl),  $\text{LiI(Eu)}$ ,  $\text{LiF(Eu)}$ ,  $\text{CsI(Tl)}$ ,  $\text{KI(Tl)}$ ,  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) и др. Все они позволяют выращивать крупные кристаллы, которые затем соответствующим образом обрабатываются. Эти сцинтилляторы применяются для регистрации  $\gamma$ -излучения, так как обладают большим средним порядковым номером  $Z$  и высокой плотностью. Малой гигроскопичностью обладают кристаллы  $\text{CsI}$ , которые могут использоваться в сцинтилляционных счётчиках даже в атмосферных условиях. Перечисленные сцинтилляторы обладают, относительно близкими временами высвечивания порядка  $10^{-6}$  сек, что в основном определяет порядок разрешающего времени счётчика на их основе.

Сравнительно новыми являются сцинтилляторы на основе кристаллов ортогерманата висмута (Bismuth Germanate Oxide)- BGO. Имея большую плотность, по сравнению с  $\text{NaI}$ , BGO-детекторы обладают значительно большей эффективностью регистрации  $\gamma$ -излучения, особенно в высокоэнергетической области. Так, для достижения одинаковой точности измерений спектрометров на базе BGO и  $\text{NaI}$ , последнему необходимо увеличить время экспозиции в 3,3 раза. К недостаткам BGO можно отнести малую светосилу и довольно невысокое разрешение, по сравнению с традиционными сцинтилляторами. Ожидается внедрение в радиометрию кристаллов вольфрамата кадмия -  $\text{CdWO}_4$  (CWO), по ряду характеристик превосходящих BGO. Также имея высокую эффективность регистрации, CWO-сцинтилляторы обладают лучшим разрешением, большим световым выходом и его низкой температурной зависимостью от окружающей температуры.

Сцинтилляционные кристаллы бромида лантана, легированные церием,  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  обладают более высоким энергетическим разрешением и коротким временем высвечивания, чем традиционные кристаллы  $\text{NaI(Tl)}$ . Энергетическое разрешение для энергии гамма-излучения 662 кэВ составляет 2,9 % (19 кэВ) (для кристалла  $\text{NaI(Tl)}$  аналогичного размера при тех же условиях, разрешение равно 6%), а также более высокой эффективностью регистрации и хорошей температурной стабильностью. Потому устройство детектирования на основе  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  позволят уверенно анализировать образцы со сложными спектрами гамма-излучателей. Высокое разрешение напрямую ведет к улучшению качества идентификации радионуклидов в исследуемых образцах; значения минимально измеряемой активности, за идентичные интервалы времени, уменьшаются и как следствие уменьшаются времена измерения образцов для достижения требуемого результата; высокая температурная стабильность устройств детектирования позволяет эффективно применять их при тяжелых температурных воздействиях внешней среды.

Существует большое количество сцинтилляторов, весьма эффективных, но из них не удаётся вырастить большие кристаллы для детекторов. Например,  $\text{ZnS(Tl)}$  – обладает малой гигроскопичностью, высокой конверсионной эффективностью, достигающей 20-25% и практически независимой от энергии регистрируемых частиц. В этой связи следует также упомянуть  $\text{ZnS(Ag)}$  используемый для регистрации  $\alpha$ -излучения. Сульфид цинка широко применяется при изготовлении детекторов как мелкокристаллический порошок, в виде тонкого слоя, нанесённого на прозрачную основу, например, оргстекло. Такие детекторы имеют невысокое разрешающее время  $10^{-3}$  сек, но с успехом используются при регистрации тяжёлых заряженных частиц. Если к такому порошку подмешать боросодержащий компонент, например  $\text{B}_2\text{O}_3$  – получим хороший детектор для регистрации медленных и тепловых нейтронов (по ядерной реакции  $^{10}_5\text{B}(n, \alpha)^3\text{Li}$ ), к тому же малочувствительной к сопутствующему  $\gamma$ -излучению.

Для регистрации медленных и тепловых нейтронов пригодны также детекторы на основе  $\text{LiI}$  и  $\text{LiF}$ , допированные  $^6\text{Li}$ : нейтроны вызывают реакцию  $^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$  с образованием частиц высокой энергии. Но они одновременно регистрируют и  $\gamma$ -фон, который может быть далее дискриминирован в аппаратуре.

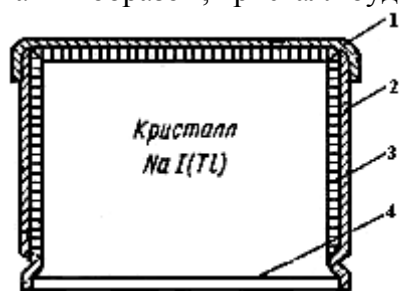
Процесс возникновения сцинтилляций можно представить при помощи зонной теории твердого тела. В отдельном атоме, не взаимодействующем с другими, электроны находятся на вполне определенных

дискретных энергетических уровнях. В твердом теле атомы находятся на близких расстояниях, и их взаимодействие достаточно сильно. Благодаря этому взаимодействию уровни внешних электронных оболочек расщепляются и образуют зоны, отделенные друг от друга запрещенными зонами. Самой внешней разрешенной зоной, заполненной электронами, является валентная зона. Выше ее располагается свободная зона - зона проводимости. Между валентной зоной и зоной проводимости находится запрещенная зона, энергетическая ширина которой составляет несколько электронвольт.

Если в кристалле имеются какие-либо дефекты, нарушения решетки или примесные атомы, то в этом случае возможно появление энергетических электронных уровней, расположенных в запрещенной зоне. При внешнем воздействии, например при прохождении через кристалл быстрой заряженной частицы, электроны могут переходить из валентной зоны в зону проводимости. В валентной зоне останутся свободные места, обладающие свойствами положительно заряженных частиц с единичным зарядом и называемые дырками.

Описанный процесс и является процессом возбуждения кристалла. Возбуждение снимается путем обратного перехода электронов из зоны проводимости в валентную зону, происходит рекомбинация электронов и дырок. Во многих кристаллах переход электрона из зоны проводимости в валентную зону происходит через промежуточные люминесцентные центры, уровни которых находятся в запрещенной зоне. Указанные центры обуславливаются наличием в кристалле дефектов или примесных атомов. При переходе электронов в две стадии испускаются фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны. Для таких фотонов вероятность поглощения в самом кристалле мала и поэтому световой выход для него много больше, чем для чистого, беспримесного кристалла.

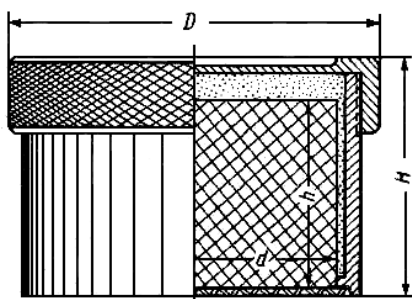
**Органические кристаллические сцинтилляторы.** Молекулярные силы связи в органических кристаллах малы по сравнению с силами, действующими в неорганических кристаллах. Поэтому взаимодействующие молекулы практически не возмущают энергетические электронные уровни друг у друга и процесс люминесценции органического кристалла является процессом, характерным для отдельных молекул. В основном электронном состоянии молекула имеет несколько колебательных уровней. Под воздействием регистрируемого излучения молекула переходит в возбужденное электронное состояние, которому также соответствует несколько колебательных уровней. Возможны также ионизация и диссоциация молекул. В результате рекомбинации ионизированной молекулы, она, как правило, образуется в возбужденном состоянии. Первоначально возбужденная молекула может находиться на высоких уровнях возбуждения и через короткое время ( $\sim 10^{-11}$  сек) испускает фотон высокой энергии. Этот фотон поглощается другой молекулой, причем часть энергии возбуждения этой молекулы может быть израсходована на тепловое движение и испущенный впоследствии фотон будет обладать уже меньшей энергией по сравнению с предыдущим. После нескольких циклов испускания и поглощения образуются молекулы, находящиеся на первом возбужденном уровне; они испускают фотоны, энергия которых может оказаться уже недостаточной для возбуждения других молекул и, таким образом, кристалл будет прозрачным для возникающего излучения. Благодаря тому, что большая часть



энергии возбуждения расходуется на тепловое движение, световой выход (конверсионная эффективность) кристалла сравнительно невелик и составляет несколько процентов.

**Рис. 3.** Упаковка кристалла: 1 – алюминиевая крышка; 2 – дюралевый корпус; 3 – отражатель из оксида магния; 4 – стекло.

В качестве твердых органических сцинтилляторов часто используются монокристаллы антрацена ( $C_{14}H_{10}$ ), стильбена ( $C_{14}H_{12}$ ), нафталина ( $C_{10}H_8$ ) с антраценом (5%), толан (дифенилацетилен) и др. Все органические сцинтилляторы обладают по сравнению с неорганическими, меньшими временами высвечивания и меньшей плотностью. Детекторы на их основе отличаются хорошей разрешающей способностью, обычно  $10^{-6} - 10^{-8}$  сек, но меньшей эффективностью к  $\gamma$ -излучению. Обычно они, в различном конструктивном оформлении используются для регистрации и спектрометрии  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц. Монокристаллы стильбена и толана, например, легко выращиваются до больших размеров и имеют самые короткие времена высвечивания. Стильбен хотя и обладает несколько меньшим световым выходом, чем антрацен, но зато длительность сцинтилляции у него значительно меньше ( $7 \cdot 10^{-9}$  сек), чем у антрацена, что позволяет использовать его в тех экспериментах, где требуется регистрация очень интенсивного излучения.

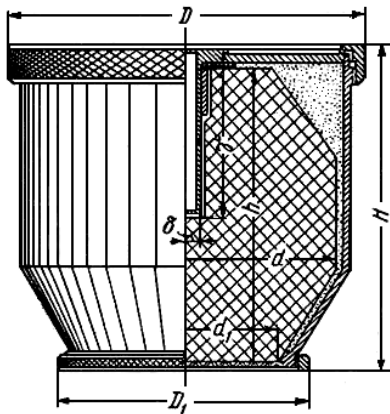


**Рис. 4.** Схема контейнера типа А.

Кристаллические сцинтилляторы выпускаются для счёта и спектрометрии. Иногда в них делается колодец, для обеспечения  $4\pi$ -геометрии.

**Пластмассовые сцинтилляторы.** Пластмассовые сцинтилляторы представляют собой твердые растворы флуоресцирующих органических соединений (п-Терфенил, 2,5-Дифенилоксазол, 1-Фенил-2-[4-бифенил]-этилен и др.) в подходящем прозрачном веществе. Например, растворы антрацена или стильбена в полистироле, или плексигласе. Концентрации растворенного флуоресцирующего вещества обычно малы и составляют несколько десятых долей процента или несколько процентов.

**Рис. 5.** Контейнер типа Ж с колодцем.



Так как растворителя много больше, чем растворенного сцинтиллятора, то, естественно, регистрируемая частица производит в основном возбуждение молекул растворителя. Энергия возбуждения в дальнейшем передается молекулам сцинтиллятора. Очевидно, что спектр испускания растворителя должен быть более жестким, чем спектр поглощения растворенного вещества, или по крайней мере совпадать с ним. Экспериментальные факты показывают, что энергия возбуждения растворителя передается молекулам сцинтиллятора за счет фотонного механизма, т. е. молекулы растворителя испускают фотоны, которые затем поглощаются молекулами растворенного вещества. Возможен и другой механизм передачи энергии. Так как концентрация сцинтиллятора мала, то

раствор оказывается практически прозрачным для возникшего излучения сцинтиллятора.

Пластмассовые сцинтилляторы характеризуются: малым временем высвечивания порядка  $10^{-8} - 10^{-9}$  сек, удовлетворительной устойчивостью к воздействию облучений, пропорциональной зависимостью высот импульсов сцинтилляций от энергии излучения. Сцинтилляционная эффективность лучших пластмассовых сцинтилляторов достигает 70% эффективности монокристаллов стильбена. Ценным свойством пластмассовых сцинтилляторов является их прозрачность к собственному излучению.

Сцинтиллирующие пластмассы легко изготавливаются, механически обрабатываются и дают интенсивное свечение. В качестве примера можно назвать твердые растворы терфенила или антрацена в полистироле. Фосфоры-пластики могут быть изготовлены больших объемов и любой формы (блочные детекторы, плёнки, капилляры и т.п.). Пластмассовые сцинтиллирующие детекторы имеют эффективности ниже введённого вещества-сцинтиллятора из-за меньшей его концентрации на единицу объема детектора. Зато такие детекторы не боятся механических воздействий, влаги и могут эксплуатироваться в диапазоне температур (-190 - +70°C). Их применяют для регистрации заряженных частиц. Они чувствительны также и к  $\gamma$ -излучению.

Органические сцинтилляторы в кристаллическом и заполимеризованном виде используются для регистрации быстрых нейтронов благодаря эффекту упругого их рассеяния в материале детектора и возникающим при этом ядрам отдачи. Однако в каждом случае следует оценить степень влияния на результат сопровождающего нейтронный поток  $\gamma$ -излучения.

**Жидкие органические сцинтилляторы** представляют собой растворы флуоресцирующих веществ в прозрачных растворителях, мало поглощающих энергию излучения в фиолетовой и ультрафиолетовой частях спектра. Растворители являются очищенные м-ксилол, толуол, фенилциклогексан, сцинтиллирующими добавками п-Терфенил, 2,5-Дифенилоксазол (ППО), 1,4-Ди-[2-(5-фенилоксазолил)]-бензол (ПОПОП), 2,5-Ди-(1-нафтил)-1,3,4-оксадиазол, 1-Фенил-2(4-бифенил)-этилен, Кватерфенил и др. Наибольшим световым выходом обладает сцинтиллятор, изготовленный при растворении р-терфенила в ксилоле при концентрации растворенного вещества 5 г/л.

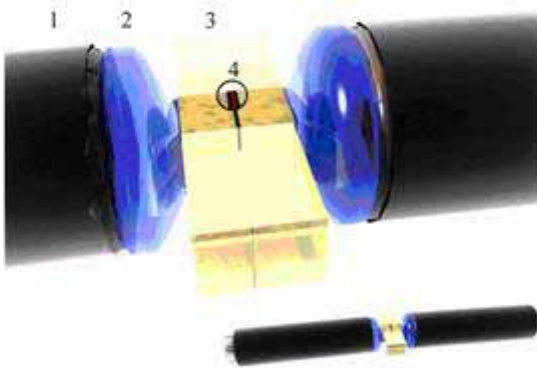
Ценным свойством жидкостных сцинтилляторов является малое время высвечивания ( $10^{-8} - 10^{-9}$  сек), хорошая прозрачность для собственного излучения и возможность изготавливать их в любых объемах и сосудах.

Механизм флуоресценции в жидких сцинтилляторах аналогичен механизму, происходящему в твердых растворах - сцинтилляторах.

Использование жидкостей позволяет получать неограниченные объемы фосфоров. Жидкостной детектор обычно представляет собой стеклянный сосуд, по диаметру катода ФЭУ, наполненный сцинтиллирующим раствором и установленный непосредственно на фотокатод ФЭУ. Измеряемый радиоактивный образец помещается внутрь жидкого объема или смешивается с жидким сцинтиллятором. Для повышения эффективности такого жидкостного счётчика – максимум спектра излучения паратерфенила сдвигают к максимуму чувствительности фотокатода используемого ФЭУ путём добавок в раствор сцинтиллятора, в рекомендованных пропорциях, так называемых «сдвигающих добавок». В качестве таких добавок часто используют стандартные препараты РОРОР, РРО и др. Жидкостные сцинтилляционные детекторы широко применяются в радиометрии образцов, содержащих низкоэнергетические  $\beta$ -частицы. Их

применяют и для регистрации  $\gamma$ -излучения, а также нейтронов. В последнем случае в органических жидкостях растворяют вещество, в котором нейтроны вызывают ядерную реакцию с образованием заряженной частицы.

Однако в больших потоках нейтронов (более  $10^{12}$  нейтрон/см<sup>2</sup>/сек) практически детекторы на основе традиционных органических растворителей выходят из строя. Для работы с большими нейтронными потоками используется проточный сцинтилляционный детектор нейтронов, использующий в качестве индикатора известную ядерную реакцию  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \alpha + T$ . Детектор состоит из пленки  ${}^6\text{Li}$  (3x3 мм) толщиной 10 мкм, заключенной в майларовую оболочку толщиной 1 мкм, которая служит для изоляции лития от окружающей среды и создания (помещенной в алюминиевую рамку) конструкции, которая омывается с двух сторон потоком жидкого фторсодержащего сцинтиллятора. Свет сцинтилляции с каждой стороны через свой световод попадает на фотокатод своего фотоумножителя. Направления потоков сцинтиллятора, нейтронного потока и снимаемого светового потока на фотоумножитель взаимоперпендикулярны, что позволяет, в принципе, защитить ФЭУ от нейтронного облучения. В результате ядерной реакции на  ${}^6\text{Li}$   $\alpha$ -частица и тритий регистрируются по разные стороны пленки  ${}^6\text{Li}$  (в различных объемах сцинтиллятора) каждый своим ФЭУ, которые включены на совпадение, что позволяет существенно снизить фон.



**Рис. 6.** Проточный жидкосцинтилляционный детектор для регистрации высоких потоков нейтронов.

Концентрация флуоресцирующего вещества обычно мала и регистрируемая частица возбуждает в основном молекулы растворителя. В дальнейшем энергия возбуждения передается молекулам флуоресцирующего вещества. Широко развивается техника жидкостно-сцинтилляционных измерений, при которых препараты радиоактивных веществ вводятся (растворяются, эмульгируются и т.п.) непосредственно в жидкостно-сцинтилляционную смесь, что обеспечивает простоту приготовления препаратов, выгодные геометрические условия

измерений, исключает потери, связанные с ослаблением излучения.

Так как в органических сцинтилляторах возбуждаются молекулярные уровни, которые излучают в ультрафиолетовой области для согласования со спектральной чувствительностью регистрирующих свет устройств (ФЭУ и фотодиодов) используются светопреобразователи, которые поглощают ультрафиолетовое излучение и переизлучают видимый свет в области 400 нм.

**Газовые сцинтилляторы.** При прохождении заряженных частиц через различные газы в них наблюдалось появление сцинтилляций. Наибольшим световым - выходом обладают тяжелые благородные газы (ксенон и криптон). Большим световым выходом обладает также смесь ксенона и гелия. Присутствие в гелии 10% ксенона обеспечивает световой выход, даже больший, чем у чистого ксенона. Ничтожно малые примеси других газов резко уменьшают интенсивность сцинтилляций в благородных газах.

Для исследования заряженных частиц малых энергий ( $< 0,1$  Мэв) и осколков деления ядер в качестве сцинтилляторов применяются газы (Табл. ), в основном - инертные газы (Xe, Kr, Ar, He), из которых основным является ксенон. В этом случае катод фотоумножителя помещается в соответствующий светоизолированный газонаполненный объем. Измеряемый радиоактивный объект помещается также в этот газонаполненный объем. Спектры излучения этих благородных газов находятся в фиолетовой области спектра.

Экспериментально было показано, что длительность вспышек в благородных газах мала ( $10^{-9}$ - $10^{-8}$  сек), а интенсивность вспышек в широком диапазоне пропорциональна потерянной энергии регистрируемых частиц и не зависит от их массы и заряда. Газовые сцинтилляторы обладают малой чувствительностью к  $\gamma$ -излучению.

Газы обладают линейной зависимостью величины сигнала от энергии частицы в широком диапазоне энергий, быстродействием и возможностью менять тормозную способность изменением давления. Кроме того, источник может быть введен в объем газового сцинтиллятора. Однако газовые сцинтилляторы требуют высокой чистоты газа и специального ФЭУ с кварцевыми окнами (значительная часть излучаемого света лежит в ультрафиолетовой области).

**Табл. 1.** Характеристики некоторых твёрдых и жидких сцинтилляторов, применяемых в сцинтилляционных счётчиках

Вещество	Плотность, $г/см^3$	Время высвечивания, $t$ , $10^{-9}$ сек.	Длина волны максимуме спектра, $\lambda$ , $\text{нм}$	Конверсионная эффективность $\eta$ , % (для электронов)
<b>Кристаллы</b>				
Антрацен $C_{14}H_{10}$	1,25	30	4450	4
Стильбен $C_{14}H_{12}$	1,16	6	4100	3
NaI (Tl)	3,67	250	4100	6
ZnS (Ag)	4,09	11	4500	10
CsI (Tl)	4,5	700	5600	2
<b>Жидкости</b>				
Раствор <i>p</i> -терфенила в ксилоле (5 г/л) с добавлением РОРОР <sup>1</sup> (0,1 г/л)	0,86	2	3500	2
Раствор <i>p</i> -терфенила в толуоле (4 г/л) с добавлением РОРОР (0,1г/л)	0,86	2,7	4300	2,5
<b>Пластики</b>				
Полистирол с добавлением <i>p</i> -терфенила (0,9%) и <i>a</i> -NPO <sup>2</sup> (0,05 весовых %)	1,06	2,2	4000	1,6
Поливинилтолуол с добавлением 3,4% <i>p</i> -терфенила и 0,1 весовых % РОРОР	1,1	3	4300	2

<sup>1</sup>РОРОР — 1,4-ди-[2-(5-фенилоксазолил)]-бензол. <sup>2</sup>NPO — 2-(1-нафтил)-5-фенилоксазол.

**Табл. 2.** Характеристики некоторых газов, применяемых в качестве сцинтилляторов в сцинтилляционных счётчиках (при давлении 740 мм рт. ст., для  $\alpha$ -частиц с энергией 4,7 МэВ)

Газ	Время высвечивания $t$ , сек	Длина волны максимуме спектра, $\lambda$ , $\text{нм}$	Конверсионная эффективность $\eta$ , %
Ксенон	$10^{-8}$	3250	14
Криптон	$10^{-8}$	3180	8,7
Аргон	$10^{-8}$	2500	3
Азот	$3 \times 10^{-9}$	3900	2

Основными характеристиками сцинтилляторов являются: спектр испускаемых определяемый вероятностью испускания фотонов данной длины волны; световой выход – отношение среднего числа фотонов одной сцинтилляции к энергии, затраченной частицей на торможение; энергетический выход – отношение суммарной энергии фотонов одной сцинтилляции к энергии, затраченной частицей на торможение; время высвечивания – время, в течение которого интенсивность отдельной сцинтилляции уменьшается в  $e$  раз. Все характеристики сцинтилляторов зависят от их химического состава, размеров и степени чистоты.

Световой выход - доля энергии регистрируемой частицы конвертируемая в энергию световой вспышки. Световой выход антрацена  $\sim 0.05$  или 1 фотон на 50 эВ для частиц высокой энергии. У NaI световой выход  $\sim 0.1$  или 1 фотона на 25 эВ. Принято световой выход данного сцинтиллятора сравнивать со световым выходом антрацена, который используется как стандарт. Типичные световые выходы пластиковых сцинтилляторов 50-60%.