

## 1.4. Методы регистрации ионизирующих излучений

### 1.4.1. Классификация методов регистрации ионизирующих излучений и основные термины

Излучение радиоактивных веществ нельзя увидеть подобно световому излучению, не ощущаем мы его и в виде теплового излучения, не воспринимаем органами слуха, следовательно, обнаружить непосредственно его не удастся. Несмотря на то, что до сих пор еще никто не видел непосредственно электроны или  $\gamma$ -кванты, мы не сомневаемся в их существовании и знаем о наличии у них определенных свойств. Это стало возможным благодаря косвенным наблюдениям, осуществляемым с помощью сложных приборов, которые позволяют получать ценные сведения о свойствах этих частиц, гораздо более точные, чем те, что дают наши органы чувств.

Пока частица летит и ни с чем не взаимодействует, она не наблюдается. Любой процесс регистрации частицы сводится к наблюдению результата взаимодействия ее с веществом. В зависимости от характера взаимодействия излучения с веществом методы регистрации излучения условно можно разделить на следующие виды:

- **ионизационные**, основанные на ионизирующем действии излучения;
- **оптические, сцинтилляционные** – регистрация люминесценции некоторых веществ под действием излучения;
- **радиографические**, основанные на химическом воздействии излучений на фотоэмульсию;
- **методы, основанные на эффекте Черенкова – Вавилова**, заключающиеся в том, что в некоторых веществах появляется свечение при пролете через них частицы, движущейся со скоростью, превышающей скорость распространения света в данном веществе.

Энергия, затрачиваемая частицей в результате различных процессов взаимодействия, в дальнейшем может преобразовываться в иные формы энергии. Так, энергия, передаваемая излучением ядрам и электронам среды, в конечном итоге превращается в тепловую энергию. Другими словами, при прохождении излучения через вещество последнее нагревается. Ионизация некоторых веществ способствует протеканию в них специфических химических реакций, в результате чего возникают новые вещества.

Все эти процессы, заключающиеся в преобразовании энергии излучения в другие виды энергии, используют для регистрации частиц. Чтобы зарегистрировать указанные процессы, необходимы определенные устройства.

Устройства, предназначенные для преобразования энергии ионизирующего излучения в другие виды энергии, удобные для индикации и последующей регистрации и измерения, называются **детекторами ионизирующего излучения**.

Но детекторы, как правило, это лишь часть комплекса аппаратуры, предназначенной для регистрации излучений. Эффект, создаваемый излучением в детекторе, должен быть преобразован в электрический ток, который может привести в действие электрическое регистрирующее измерительное устройство.

Устройства, предназначенные для регистрации действия излучения на детектор, называются **регистраторами**.

Комплекты устройств – **детектор и регистратор** – обычно называют **радиометрами**.

**Радиометры** – приборы, предназначенные для получения информации об активности нуклидов, плотности потока и потоке ионизирующих частиц или фотонов.

Разновидность радиометров представляют собой **дозиметры**, отградуированные в единицах дозы или мощности излучения.

**Дозиметры** – приборы, предназначенные для получения информации о дозе и мощности дозы или (и) об энергии, переносимой ионизирующим излучением или переданной им объекту, находящемуся в поле его действия.

Существует электрофизическая аппаратура, которая позволяет расшифровать в деталях свойства излучения, проходящего через детектор. Приборы, предназначенные для анализа свойств (состав, энергия и т. д.) излучений, называются **анализаторами**. В настоящее время различные типы анализаторов принято называть **спектрометрами**. **Спектрометры** – приборы, предназначенные для получения информации о спектре распределения ионизирующего излучения по одному или более параметрам, например, по энергии квантов или частиц в потоке излучения.

Иногда регистрируются следы прохождения отдельных ионизирующих частиц через вещество. По длине следа обычно определяют энергию зарегистрированной частицы, а по виду следа – тип частицы. Такие детекторы принято называть **следовыми камерами**, также это могут быть **толстослойные фотоэмульсии**.

### 1.4.2. Основные характеристики детекторов ионизирующего излучения

Остановимся подробнее на классификации детекторов. В зависимости от используемого процесса взаимодействия излучения с веществом различают **четыре основных типа** детекторов.

1. **Ионизационные детекторы**, в которых непосредственно используется создаваемая излучением ионизация вещества. К ним относятся ионизационные камеры, газоразрядные счетчики разных типов

(включая коронные и искровые счетчики), полупроводниковые детекторы, камера Вильсона, фотоэмульсии и некоторые другие виды детекторов.

2. **Радиолуминесцентные детекторы**, в которых используются сцинтилляции (вспышки света), сопровождающие возбуждение и ионизацию атомов и молекул среды. К этой группе относятся сцинтилляционные счетчики разных типов и термолуминесцентные детекторы.

3. **Детекторы Черенкова**, использующие так называемое излучение Черенкова – Вавилова.

4. **Калориметрические детекторы**, принцип действия которых основан на использовании нагрева вещества под действием излучения.

Одна из основных задач детектирования излучений – это восстановление характеристик излучения по сигналам, измеренным на выходах детекторов. Для этого необходимо знать, прежде всего, общие характеристики детекторов как преобразователей излучения в сигналы.

Наиболее простой тип детектора – **счетчик частиц**. Счетчиком может быть любой детектор, регистрирующий отдельные частицы, независимо от природы сигнала. Важно отметить, что счетчик в принципе позволяет определить момент прохождения частицы через его объем. Форма импульса на выходе счетчика характеризует в основном процессы, происходящие в нем. Эти процессы в истинных счетчиках, таких как счетчик Гейгера – Мюллера или искровой счетчик, практически не зависят от природы частицы. Однако форма импульса может сильно зависеть от места прохождения частицы через детектор.

Сигнал на выходе пропорционального детектора пропорционален поглощенной в его объеме энергии. Любой пропорциональный детектор может работать как счетчик частиц.

При измерениях загрязнений внешней среды наибольшее распространение получили приборы с полупроводниковыми, сцинтилляционными и газоразрядными детекторами, которые обладают высокой чувствительностью и позволяют вести счет отдельных частиц и фотонов, а также измерять их энергию. Реже для оценки загрязнений внешней среды используют приборы с ионизационными камерами, имеющими меньшую чувствительность.

Одна из основных характеристик счетчика – **эффективность регистрации частиц**. Она определяется из следующего отношения:

$$\eta_p = \frac{N_p}{N},$$

где  $N_p$  – число зарегистрированных частиц (квантов);

$N$  – число частиц (квантов), попавших за это же время в рабочий объем детектора.

Эффективность регистрации зависит от многих факторов, в частности, от вида излучения и его энергии, поэтому она различна не только для разных счетчиков, но и для одного и того же.

**Спектральной характеристикой счетчика** называется зависимость эффективности регистрации частиц (квантов) от энергии частицы (или энергии кванта) при прочих равных условиях.

**Счетной характеристикой (СХ)** называют зависимость скорости счета, т. е. числа зарегистрированных в единицу времени импульсов, от напряжения  $U$  между электродами счетчика при неизменном числе частиц, попадающих в объем счетчика в единицу времени.

Как правило, СХ имеет плато, т. е. участок, где скорость счета практически не зависит от напряжения между электродами.

Если число частиц (квантов), проходящих через счетчик, известно, то удобно построить зависимость эффективности регистрации частиц от напряжения между электродами. Эта нормированная счетная характеристика облегчает выбор режима работы счетчика. Очевидно, что эффективность регистрации не может быть больше единицы, поэтому измерение зависимости эффективности регистрации частиц от напряжения между электродами счетчика позволяет выявить «ложные» импульсы.

**Эффективность регистрации энергии (ЭРЭ)** определяют как отношение поглощенной в объеме детектора энергии к падающей на поверхность входного окна.

Эффективность регистрации энергии показывает, какая доля энергии излучения, падающего на входное окно, поглощается в рабочем объеме детектора. Если поглощается вся падающая энергия излучения, то детектор в данном эксперименте является детектором полного поглощения. Его эффективность равна единице.

Эффективность регистрации энергии всегда меньше или равна эффективности регистрации частиц (или квантов). При эффективности регистрации частиц, равной единице, ЭРЭ может отличаться от единицы на много порядков. Это обусловлено тем, что для образования сигнала на выходе детектора требуется энергия от единиц до сотен электрон-вольт, в то время как энергия регистрируемой частицы может составлять  $10^6$ – $10^{12}$  эВ. Поэтому, если каждая регистрируемая частица теряет только часть своей кинетической энергии, то эффективность регистрации энергии меньше, чем эффективность регистрации частиц.

Наиболее общей характеристикой любого детектора является его **функция отклика (ФО)**. Для детектора, используемого для измерения энергетического спектра частиц, **функция отклика  $G(E, V)$  определяет вероятность образования сигнала с амплитудой  $V$  при попадании в детектор частицы или фотона с энергией  $E$ .**

Вероятность регистрации может быть нормирована по-разному:

- к активности источника;
- к числу частиц, попавших в детектор;

- к потоку частиц в том месте, где расположен детектор.

В зависимости от этого величины вероятности регистрации будут различными и функции отклика носят разные названия. Дадим определения некоторым из них, наиболее распространенным.

**Эффективность детектора  $\epsilon_d$**  – это отношение числа зарегистрированных сигналов (импульсов, треков, световых вспышек и т. д.) к числу частиц, попавших в детектор.

**Чувствительность детектора  $S_d$**  – это отношение числа зарегистрированных сигналов в единицу времени к потоку частиц в месте, где расположен детектор излучения.

**Светосила  $L$**  – это отношение числа зарегистрированных сигналов к числу частиц, испущенных источником. Светосила, как это следует из определения, существенно зависит от взаимного расположения детектора и источника излучений, поэтому она, скорее, характеризует измерительное устройство в целом по сравнению с самим детектором.

Экспериментально ФО определяется обычно следующим образом. При фиксированных значениях энергии  $E_i$  измеряют распределение импульсов по амплитудам  $G(E_i, V)$ . В таких измерениях используют моноэнергетические источники излучения. Функцию  $G(E_i, V)$  называют **формой линии детектора**. На рис. 12 и рис. 13 приведены два распределения, существенно отличающихся друг от друга.

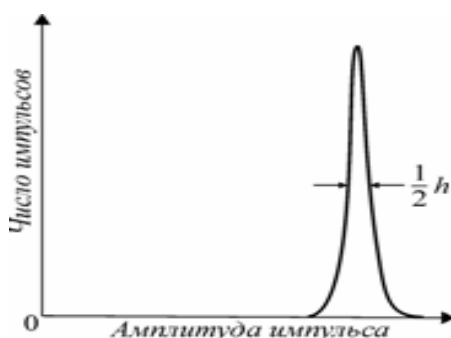


Рис. 12. Функция отклика полупроводникового детектора при облучении его моноэнергетическими альфа-частицами

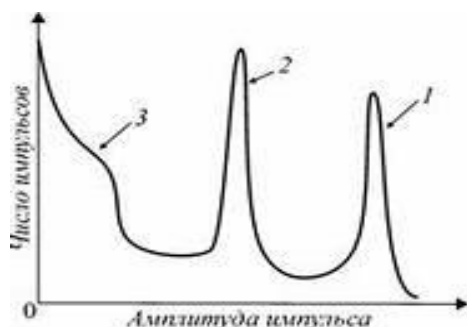


Рис.13. Функция отклика ионизационного детектора (сферическая ионизационная камера для измерения спектров нейтронов с помощью реакции (ядро гелия-3 (гелион)  ${}^3\text{He} (n, p) {}^3\text{H}$ ) при облучении его моноэнергетическими нейтронами с энергией  $\approx 400$  кэВ:

- 1 – пик 400 кэВ нейтронов;
- 2 – пик тепловых нейтронов;
- 3 – плато рассеяния нейтронов на ядрах  ${}^3\text{He}$

Очевидно, что ФО зависит от механизма регистрации. Если при регистрации альфа-частиц полупроводниковым детектором энергия частиц напрямую преобразуется в сигнал детектора, то в аппаратном распределении импульсов ионизационной камеры (рис. 13) помимо пиков ядерной реакции  ${}^3\text{He} (n, p) {}^3\text{H}$  появляется широкая ступенька (3), связанная с упругим рассеянием нейтронов на ядрах  ${}^3\text{He}$ . В каждом из этих процессов реализуется разная доля энергии нейтронов, поэтому и функция отклика такого детектора имеет столь сложный вид.

Для многих детекторов форма линии представляет собой распределение, более или менее близкое к гауссовскому (рис. 14).

Важным параметром этой функции, а следовательно, и характеристикой детектора, является **ширина распределения на половине высоты  $\Delta V$** . Ширину распределения  $\Delta V$  обычно выражают в единицах энергии и называют **энергетическим разрешением детектора  $\Delta E$** .

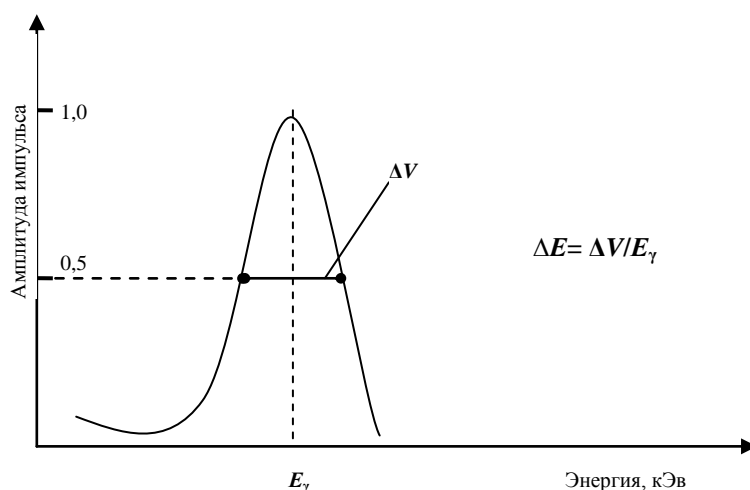


Рис. 14. Относительное энергетическое (амплитудное) разрешение детектора

Ширина пика  $\Delta V$  отражает флуктуацию. **Флуктуация** (от лат. *Fluctuatio* – колебание) – термин, характеризующий любое колебание или любое периодическое изменение амплитуд сигналов на выходе детектора, обусловленных, главным образом, статистическим разбросом числа носителей заряда ( $n_e$ ).

Энергетическое разрешение детекторов тем лучше, чем большее число носителей заряда образуется в детекторе, т. е. чем выше энергия излучения и меньше удельная энергия образования носителей заряда.

Наименьшую удельную энергию образования одной пары носителей заряда (электрон-дырка) имеют полупроводниковые детекторы (ППД) – от 2,9 до 3,7 эВ в зависимости от типа, что обеспечивает полупроводниковым детекторам наилучшее энергетическое разрешение по сравнению с другими типами детекторов. Удельная энергия ионизации среды в газовых детекторах (образование пары «ион – электрон») на порядок выше и составляет от 20 до 32 эВ в зависимости от типа среды, и энергетическое разрешение газовых детекторов практически в три раза хуже разрешения ППД. В сцинтилляционных детекторах энергия излучения конвертируется в фотоны света (коэффициент преобразования – не более 0,1), а первичными носителями заряда являются фотоэлектроны, которые выбиваются с фотокатода ФЭУ световыми фотонами (вероятность – не более 0,1 на фотон). Отсюда следует, что удельная энергия образования первичных носителей заряда в сцинтилляционных детекторах практически на порядок больше, чем в газонаполненных, и на два порядка больше, чем в ППД, а энергетическое разрешение соответственно в 3–4 раза хуже, чем в газонаполненных детекторах, и на порядок хуже, чем в ППД.

В табл. 1 приведены средние значения удельной энергии и энергетического разрешения по энергии 662 кэВ изотопа  $^{137}\text{Cs}$  для наиболее распространенных типов детекторов, по которым нетрудно выполнить оценку разрешения детекторов для любой другой энергии излучения.

Таблица 1. Удельная энергия преобразования и энергетическое разрешение детекторов по энергетической линии излучения 662 кэВ

Детекторы	Материал рабочей среды	$\epsilon$ , эВ	R, %
Полупроводниковые	Германий	2,96	0,2–0,8
	Кремний	3,67	0,3–1,0
Газонаполненные	Ксенон	21	1,2–1,6
	Криптон	23	1,4–1,8
	Аргон	26	1,5–1,9
Сцинтилляционные	NaI(Tl)	250–300	6–8
	CsI(Tl)	600–700	8–9
	Антрацен	500–600	7–9
	Стильбен	900–1100	10–12
	Пластмасса	1000–1500	10–15
	Жидкость	1000–2000	10–17

Разрешение может существенно ухудшаться, если энергия излучения соизмерима с энергией собственных тепловых шумов детектора. При регистрации гамма-квантов в нормальных температурных условиях среднее значение энергетического эквивалента тепловых шумов для пропорциональных счетчиков составляет 0,2–0,5 кэВ, для фотоумножителей в энергетической шкале NaI(Tl) – 0,3–1 кэВ, для кремниевых ППД может достигать 10 кэВ. Для снижения уровня шумов ППД используются с охлаждением до 70–100 °К, при этом уровень шумов может быть снижен на порядок. Кроме того, при регистрации низкоэнергетического излучения приобретают значение шумы первого каскада усиления сигнала.

На практике часто применяют также термин «**относительное энергетическое разрешение**»:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{f(E) \cdot \Delta V}{f'(E) \cdot E \cdot V},$$

где  $f$  – **индекс разброса дисперсии (ИРС)**, или фактор Фано (используется для изучения поведения процессов радиоактивного распада).

Эта величина определяется как отношение дисперсии количества событий (в нашем случае – количества распадов) на заданном окне наблюдений  $k$  к соответствующему математическому ожиданию:

$$f(k) = \frac{\sigma^2(k)}{m(k)}.$$

Для пропорционального детектора это выражение упрощается:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta V}{V}.$$

Нижний предел этой величины определяется статистическим характером взаимодействия излучения с веществом. Так, в пропорциональном детекторе амплитуда импульса пропорциональна количеству пар носителей, образованных частицей:  $V \approx N$ .

#### **Временное разрешение, мертвое время и восстановительное время.**

Перед рассмотрением принципов работы различных типов газонаполненных детекторов важно уяснить понятия «временное разрешение», «мертвое время» и «восстановительное время». Если время временного разрешения велико, при высокой скорости счета импульсы с детектора могут располагаться так близко во времени, что большое количество информации будет утеряно. Это означает, что общее количество отсчетов может быть значительно недооценено.

**Временное разрешение** детектора определяется как минимальное время, которое должно разделять два импульса, чтобы они были зарегистрированы как два отдельных события. Временное разрешение зависит от следующих факторов:

**мертвого времени** детектора (т. е. отрезка времени, в течение которого сигнал или импульс возрастает до величины, достаточной для его регистрации);

**восстановительного времени** (т. е. времени, в течение которого детектор восстанавливается после ионизационного воздействия и возвращается в исходное состояние).

Временное разрешение детектора будет зависеть от того, какой тип взаимодействия произошел в детекторе. Однако полное временное разрешение прибора также будет зависеть от мертвых времен, связанных с электронными компонентами счетной системы.

**Эффективность регистрации излучения** является энергетической пространственно-угловой функцией вероятности процесса взаимодействия излучения с рабочей средой детектора.

Вероятность регистрации ионизирующей частицы при прохождении через рабочую среду детектора определяется вероятностью передачи частицей своей энергии частично или полностью рабочей среде. Эта вероятность зависит:

- от вида излучения;
- энергии излучения;
- плотности рабочей среды детектора;
- размеров детектора;
- геометрии измерений.

В первом приближении она определяется выражением:

$$\rho = 1 - e^{(-\mu l)},$$

где  $\mu$  – массовый коэффициент поглощения излучения данного вида и энергии в рабочей среде, см/г;

$\rho$  – плотность среды;

$l$  – средняя длина пробега частиц в среде.

Приведенное выражение не учитывает факторов конкретной конструкции детектора и условий проникновения излучения в рабочую среду детектора, что немаловажно для низкоэнергетических видов излучений. Эффективность регистрации может иметь средние значения от 0 до 1.

Расчет практической эффективности регистрации производится по формуле

$$\mathcal{E}(E) = m / (s - \phi(E)),$$

где  $s$  – площадь входного окна детектора (для изотропных детекторов – площадь сечения);

$\phi(E)$  – плотность потока излучения;

$m$  – частота актов регистрации выходных сигналов детектора.

Самым проникающим видом излучения с большой длиной пробега квантов является гамма-излучение, в связи с чем для их детектирования используются сцинтилляторы и ППД, эффективность регистрации которых тем больше, чем больше их плотность, геометрические размеры и эффективный атомный номер вещества детектора.

На рис. 15 приведены графики спектральной эффективности регистрации гамма-излучения неорганическими сцинтилляторами NaI(Tl) различных размеров.



Размеры монокристаллов NaI (диаметр × высота):  
 — 30 × 20 мм; - - 60 × 40 мм; - - - 120 × 120 мм;  
 — 30 × 20 мм с экраном 2 мм Fe

Рис. 15. Эффективность регистрации гамма-квантов сцинтилляторами NaI(Tl)

При регистрации низкоэнергетических гамма-квантов (менее 100 кэВ) существенную роль начинает играть поглощение излучения в контейнере детектора и в защитной конструкции блока детектирования, если он не имеет специального входного окна.

Эффективность регистрации гамма-излучения газонаполненными счетчиками в интервале энергий от 100 кэВ до 3 МэВ не превышает 2 % и практически не зависит от размеров счетчиков, а в области энергий ниже 200 кэВ существенно зависит от материала корпуса (катода) счетчика, в котором осуществляется конверсия гамма-квантов в электроны. В качестве материала катода обычно используется вольфрам, медь и железо. Пример эффективности регистрации гамма-квантов газонаполненными счетчиками приведен на рис. 16.

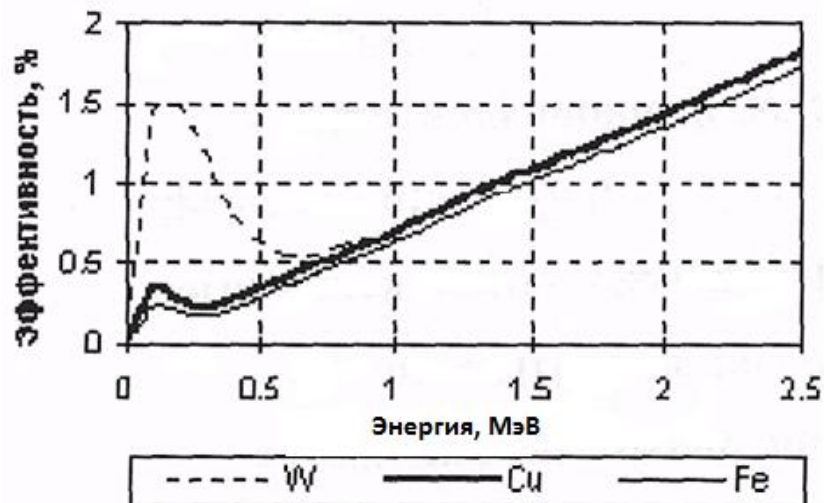


Рис. 16. Эффективность регистрации гамма-квантов газонаполненными счетчиками

Что касается эффективности регистрации бета- и альфа-частиц, то практически для всех видов детекторов она близка к 100 % в связи с малой проникающей способностью этих видов излучения. Последнее обстоятельство выводит на первое место по влиянию на эффективность регистрации фактор поглощения излучения во входном окне детектора, особенно при регистрации низкоэнергетических частиц.

Понятие практической эффективности регистрации обычно применяется к датчику в целом (с данным типом детектора) и выражается в процентах (от 0 до 100 %).

Для характеристики блоков детектирования и устройств с фиксированной геометрией измерений применяется также понятие **светосилы**, как отношения числа регистрируемых частиц к числу частиц, испускаемых источником излучения. Значение светосилы является безразмерной величиной в интервале 0–1.

**Избирательность детекторов.** Детекторы различных типов, размеров и конструкций, с различным состоянием агрегатной среды могут отличаться на 1, 2 и более порядков как по эффективности регистрации различных видов излучения, так и по эффективности регистрации в различных диапазонах спектра излучения. Это позволяет специализировать детекторы по измерительным задачам и производить измерение одних видов и энергий излучения на сопутствующем фоне излучения других видов и энергий. Качество

работы детекторов при этом может прямо оцениваться избирательностью – отношением эффективности регистрации измеряемого и фоновое излучения при равных значениях плотности потоков. Избирательность в значительной степени может быть усилена геометрией измерений и конструкцией блока детектирования в целом (экранирование, коллимация и т. п.).

Для детектирования заряженных частиц, в принципе, можно использовать все типы детекторов, при этом по характеру преобразования энергии частиц в заряд детекторы разделяют на **пробежные и пролетные**. К пробежным относят детекторы с толщиной чувствительного объема, превышающей длину пробега частиц в материале детектора и обеспечивающей полное поглощение энергии частиц. У пролетных детекторов толщина чувствительного объема много меньше длины пробега частиц и выходные сигналы пропорциональны произведению линейной плотности ионизации на треках частиц на длину треков, т. е. зависят от типа частиц, их массы, заряда и угла входа в детектор. Один и тот же детектор может быть пробежным к одному виду частиц и пролетным к другому, что создает условия для их селективной регистрации. Так, например, поверхностно-барьерные ППД с малой толщиной чувствительного слоя (порядка 0,05 мм) являются пробежными по альфа-излучению и пролетными по бета-излучению с энергией более 100 кэВ.

Реакция детекторов на поток нейтральных частиц и квантов имеет более сложный характер и проходит в два этапа. На первом этапе в чувствительной среде детектора или в специальных материалах его конструкции осуществляется конверсия первичного потока излучения во вторичный поток заряженных частиц, который и регистрируется на втором этапе. Эффективность процессов на этих двух этапах может изменяться отдельно и целенаправленно, что создает разнообразие детекторов по материалам и агрегатному состоянию чувствительных сред и защите от внешних потоков заряженных частиц в зависимости от специализации датчиков по видам и энергии регистрируемого излучения.

В табл. 2 приведена основная специализация детекторов по видам регистрируемого излучения и по возможностям спектрального анализа излучения.

Таблица 2. Направления основной специализации детекторов

Тип детектора	Вид излучения					Спектральный анализ				
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$x$	$n$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$x$	$n$
Камеры интегральные газовые ионизационные	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Камеры импульсные газовые ионизационные	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+
Счетчики пропорциональные газовые ионизационные	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Счетчики Гейгера–Мюллера газовые ионизационные	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
Полупроводниковые $p-n$ , твердотельные ионизационные	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-
Полупроводниковые $p-i-n$ , твердотельные ионизационные	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Сцинтилляционные газовые	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+
Сцинтилляционные жидкостные	-	+	+	-	+	-	+	+	-	-
Сцинтилляционные неорганические твердотельные	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Сцинтилляционные органические твердотельные	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Сцинтилляционные пластмассовые твердотельные	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Сцинтилляционные дисперсные твердотельные	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-

Детекторы являются неотъемлемой частью радиометров, которые состоят из различных блоков, согласованных между собой и обеспечивающих достоверность измерения. Типичная блок-схема радиометра представлена на рис. 17.

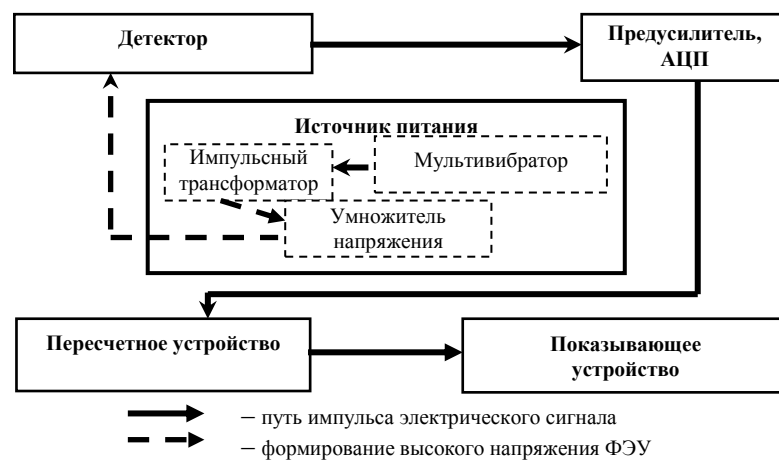


Рис. 17. Блок-схема радиометра