

#### 1.5.4. Пропорциональные счетчики

**Пропорциональный счетчик** – газоразрядный прибор для регистрации ионизирующих излучений, создающий сигнал, амплитуда которого пропорциональна энергии регистрируемой частицы, теряемой в его объеме на ионизацию.

Недостатком ионизационной камеры являются очень низкие токи. Этот недостаток преодолевается в ионизационных детекторах с газовым усилением, что дает возможность регистрировать частицы с энергией менее 10 кэВ, в то время как сигналы от частиц таких энергий в ионизационных камерах «тонут» в шумах усилителя.

Работа пропорционального счетчика основана на явлении газового усиления.

**Газовое усиление** – это увеличение количества свободных зарядов в объеме детектора за счет того, что первичные электроны на своем пути к аноду в больших электрических полях приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации нейтральных атомов рабочей среды детектора. Возникшие при этом новые электроны в свою очередь успевают приобрести энергию, достаточную для ионизации ударом. Таким образом, к аноду будет двигаться нарастающая электронная лавина. Это «самоусиление» электронного тока (коэффициент газового усиления) может достигать  $10^3$ – $10^4$  раз. Такой режим работы отвечает пропорциональному счетчику (камере). В названии отражено то, что в этом приборе амплитуда импульса тока (или полный собранный заряд) остается пропорциональной энергии, затраченной заряженной частицей на первичную ионизацию среды детектора. Таким образом, пропорциональный счетчик способен выполнять функции спектрометра, как и ионизационная камера. Энергетическое разрешение пропорциональных счетчиков лучше, чем сцинтилляционных, но хуже, чем полупроводниковых.

Заряженная частица, проходя через газ, наполняющий пропорциональный счетчик, создает на своем пути пары ион – электрон, число которых зависит от энергии, теряемой частицей в газе. При полном торможении частицы в пропорциональном счетчике импульс пропорционален энергии частицы. Как и в ионизационной камере, под действием электрического поля электроны движутся к аноду, ионы – к катоду. В отличие от ионизационной камеры вблизи анода пропорционального счетчика поле столь велико, что электроны приобретают энергию, достаточную для вторичной ионизации. В результате вместо каждого первичного электрона на анод приходит лавина электронов и полное число электронов, собранных на аноде пропорционального счетчика, во много раз превышает число первичных электронов (рис. 27).

Отношение числа ионов  $n$ , образовавшихся в результате газового усиления, к первоначальному числу ионов  $n_0$ , образованных частицей, называется **коэффициентом газового усиления  $M$** :

$$M = n_0 / n.$$

Форма электронно-ионной лавины вблизи анода сильно зависит от значения  $M$ . При  $10 < M < 100$  лавина приобретает форму капли в направлении прихода электронов на анод; при  $10^2 < M < 10^4$  лавина становится сердцевидной, вытянутой в направлении прихода электронов; при  $M > 10^4$  лавина полностью охватывает анод, в результате чего нарушается пропорциональность между  $n_0$  и амплитудой сигнала.

Размер лавины вдоль проволочного анода растет с увеличением  $M$  от долей миллиметра до нескольких миллиметров.

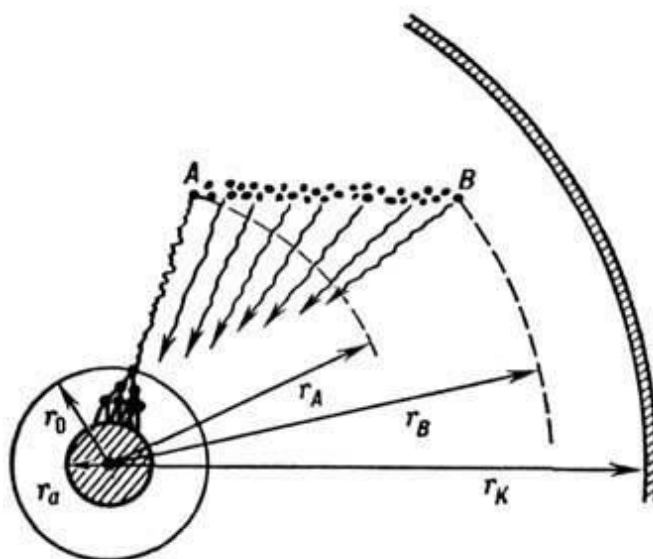


Рис. 27. Механизм работы пропорционального счетчика:  
 $r_k - r_0$  – зона дрейфа первичных электронов;  $r_0 - r_a$  – зона лавин

При столкновениях образуются также возбужденные атомы, которые «высвечиваются» (УФ-излучение) за время  $\sim 10^{-8}$  с. Энергия фотонов  $h\nu$  почти всегда превосходит работу выхода электронов с поверхности

катода, поэтому вырванные (с вероятностью  $\sim 10^{-4}$ ) фотоэлектроны также движутся к аноду, усложняя картину разряда и образуя лавинные серии – последовательно затухающую цепочку импульсов, отстоящих друг от друга на время дрейфа электронов от катода к аноду.

Фотоэлектронную эмиссию можно ослабить, если в состав газа кроме инертных (Ar, Kr, Xe) ввести многоатомные газы ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и т. д.), поглощающие УФ-излучение. Так как электроны поглощают газы и пары со сродством к электрону ( $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , галогены), то их в смеси пропорционального счетчика должно быть минимальное количество (концентрация  $\text{O}_2 \sim 10^{-5} \text{ см}^3$ ).

Область  $M \sim 10^4 - 10^6$  называется областью ограниченной пропорциональности. Большие  $M$  могут привести к пробое (рис. 28).

Чтобы не допустить пробоя, применяют гасящие примеси – органические газы ( $\text{CH}_4$ , пропан, изобутан,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , метилаль и т. п.), которые обладают большим сечением фотопоглощения, диссоциации и передачи возбуждения сложной молекуле. Добавка органического газа стабилизирует процесс газового усиления в широком диапазоне  $U_0$ , хотя само напряжение, необходимое для требуемого  $M$ , возрастает.



Рис. 28. Вольт-амперная характеристика газового разряда

Для практических целей значение коэффициента газового усиления варьируется в пределах  $10 \leq M \leq 10000$ . Коэффициент  $M$  выбирается в зависимости от энергии частицы, рода работы (счет или измерение энергии) и оптимального соотношения сигнал – шум. При измерении энергии величину  $M$  стремятся брать по возможности меньше, так как в этом случае напряжение на счетчике соответствует более пологому участку его вольт-амперной характеристики и не требуется слишком высокая стабильность напряжения от источника питания. При счете частиц высокая стабильность напряжения не нужна и можно использовать высокие значения  $M$ , включая и область ограниченной пропорциональности.

Газовое усиление имеет место при любой геометрии электродов, однако наибольшее распространение получили цилиндрические пропорциональные счетчики, для которых характерны низкие значения рабочего напряжения, широкие возможности применения и компактность.

Конструктивно пропорциональный счетчик обычно изготавливают в форме цилиндрического конденсатора с анодом в виде тонкой металлической нити по оси цилиндра, что обеспечивает вблизи анода напряженность электрического поля значительно большую, чем в остальной области детектора. При разности потенциалов между анодом и катодом 1000 В напряженность поля вблизи нити-анода может достигать 40000 В/см, в то время как у катода она равна сотням вольт на сантиметр. Диаметр нити (вольфрам или сталь) выбирают в пределах от 0,05 до 0,3 мм. Поверхность нити полируют, так как незначительные шероховатости поверхности сильно искажают электрическое поле вблизи собирающего электрода.

Конструкция цилиндрического пропорционального счетчика представлена на рис. 29.

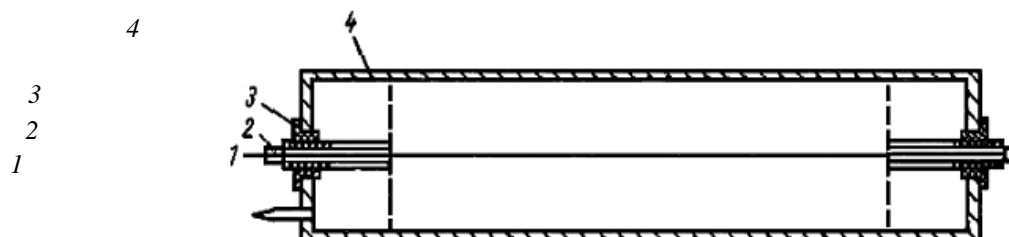


Рис. 29. Конструкция цилиндрического пропорционального счетчика:  
1 – собирающий электрод; 2 – охранный кольцо; 3 – изолятор; 4 – корпус

Газовое усиление осуществляется вблизи анода на расстоянии, сравнимом с диаметром нити, а весь остальной путь электроны дрейфуют под действием поля без «размножения». Пропорциональный счетчик

заполняют инертными газами (рабочий газ не должен поглощать дрейфующие электроны) с добавлением небольшого количества многоатомных газов, которые поглощают фотоны, образующиеся в лавинах. Давление газа изменяется в широких пределах – от 50 до 760 мм рт. ст. Для корпуса счетчика пригодны медь, латунь, алюминий и другие материалы. Минимальная толщина стенок  $\delta \sim 0,05$  мм ограничивается прочностью материалов и условием герметичности рабочего объема.

Корпус счетчика, наполненного газом под небольшим давлением, должен выдерживать внешнее атмосферное давление.

Схема включения пропорционального счетчика представлена на рис. 30.

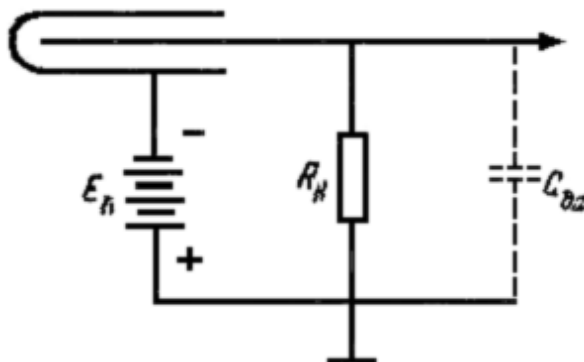


Рис. 30. Схема включения пропорционального счетчика

Типичные характеристики пропорционального счетчика: коэффициент газового усиления  $\sim 10^3 - 10^4$  (но может достигать  $10^6$  и больше); амплитуда импульса  $\sim 10^{-2}$  В при емкости пропорционального счетчика  $C \approx 20$  пкф; время развития лавины происходит за время  $\sim 10^{-9} - 10^{-8}$  с, однако момент появления сигнала на выходе счетчика зависит от места прохождения ионизирующей частицы, т. е. от времени дрейфа электронов до нити. При радиусе  $\sim 1$  см и давлении  $\sim 1$  атм. время запаздывания сигнала относительно пролета частицы  $\sim 10^{-6}$  с. По энергетическому разрешению пропорциональный счетчик превосходит сцинтилляционный, но уступает полупроводниковому детектору. Однако пропорциональные счетчики позволяют работать в области энергий менее 1 кэВ, где полупроводниковые детекторы неприменимы.

При еще большем увеличении разности потенциалов между анодом и катодом и коэффициента газового усиления до значений более  $10^4$  начинает нарушаться пропорциональность между потерянной частицей в детекторе энергией и величиной импульса тока. Прибор переходит в режим ограниченной пропорциональности и уже не может быть использован как спектрометр, а может применяться лишь как счетчик частиц. Временное разрешение пропорционального счетчика может достигать  $10^{-7}$  с.

Скорость счета импульсов при постоянной интенсивности излучения и чувствительности системы зависит от напряжения на электродах. Эту зависимость называют счетной характеристикой. На участке напряжений  $U > U_0$  счетная характеристика имеет горизонтальный участок (плато), на котором скорость счета постоянна. Амплитуда импульса от всех заряженных частиц на плато больше порога чувствительности схемы. Поэтому схема регистрирует все заряженные частицы, поступающие в пропорциональный счетчик.

Плато пропорциональных счетчиков для  $\alpha$ -частиц начинается при небольших напряжениях. Резкий выход на плато наблюдается только для параллельного пучка моноэнергетических  $\alpha$ -частиц. Если  $\alpha$ -частицы движутся в газе с неодинаковыми энергиями по различным направлениям, то происходит плавный подход к плато в более высокой области напряжений. Для  $\beta$ -частиц плато достигается или при использовании высокочувствительных схем, или при наполнении газом под давлением больше 1 атм. Это один из недостатков пропорциональных счетчиков, затрудняющих их применение для регистрации  $\beta$ -частиц.

Плато наклонено к оси напряжений под небольшим углом. Наклон плато (0,1 %) объясняется появлением ложных разрядов в газе, обусловленных первичной ионизацией от посторонних источников.

Пропорциональный счетчик, работающий на плато, регистрирует все заряженные частицы. В области ниже плато не все частицы регистрируются счетчиком и его эффективность уменьшается. Поэтому наиболее приемлем режим работы пропорционального счетчика в области плато, на котором эффективность для заряженных частиц близка к 100 %.

Пропорциональные счетчики используются для регистрации всех видов ионизирующих излучений.

Существуют пропорциональные счетчики для регистрации альфа-частиц, электронов, осколков деления ядер и т. д., а также для нейтронов, гамма- и рентгеновских квантов. В последнем случае используются процессы взаимодействия нейтронов, гамма- и рентгеновских квантов с наполняющим счетчик газом, в результате которых образуются регистрируемые пропорциональным счетчиком вторичные заряженные частицы.

Пропорциональный счетчик сыграл важную роль в ядерной физике 30–40-х гг. XX в., являясь наряду с

ионизационной камерой практически единственным спектрометрическим детектором. Второе рождение пропорциональный счетчик получил в физике частиц высоких энергий в конце 60-х гг. в виде пропорциональной камеры, состоящей из большого числа ( $10^2$ – $10^3$ ) пропорциональных счетчиков, расположенных в одной плоскости и в одном газовом объеме. Такое устройство позволяет не только измерять ионизацию частицы в каждом отдельном счетчике, но и фиксировать место ее прохождения.

Типичные параметры пропорциональных камер: расстояние между соседними анодными нитями  $\sim 1$ – $2$  мм, расстояние между анодной и катодной плоскостями  $\sim 1$  см; разрешающее время  $\sim 10^{-7}$  с.

Использование газового усиления в пропорциональных счетчиках дает возможность значительно повысить чувствительность измерений по сравнению с ионизационными камерами, а наличие пропорциональности усиления в счетчиках позволяет определять энергию ядерных частиц и изучать их природу, так же, как и в ионизационных камерах.

Пропорциональные счетчики используются для регистрации числа ионизирующих частиц, определения их энергии (импульсный режим), а также для измерения потоков излучения по среднему току (интегральный режим) аналогично ионизационным камерам с соответствующими режимами работы.

Пропорциональные счетчики используются для регистрации альфа-, бета-частиц, протонов, гамма-квантов и нейтронов. Пропорциональные счетчики чаще всего заполняют гелием или аргоном. При регистрации заряженных частиц и гамма-квантов, для того чтобы избежать потерь энергии частицами, до регистрации используют тонкие входные окна. Иногда источник помещают в объем счетчика.

Эффективность регистрации для мягких гамма-квантов с энергией меньше 20 кэВ составляет более 80 %. Для повышения эффективности регистрации более энергетичных гамма-квантов используют ксенон.

Необходимым условием регистрации заряженной частицы или  $\gamma$ -кванта является создание ими в рабочем объеме счетчика хотя бы одной пары ионов. Для любой ионизирующей частицы вероятность такого события близка к единице. Гамма-кванты обладают большой проникающей способностью, и для них вероятность образования в газе счетчика вторичного электрона, а следовательно, и вероятность регистрации составляет малые доли от единицы.

При прохождении гамма-кванта через рабочий объем счетчика он создает вторичный электрон в результате фотоэффекта и эффекта образования пар. Однако для гамма-квантов малых энергий имеет значение только фотоэффект (пороговая энергия для эффекта образования пар равна 1,01 МэВ). Сечение фотоэффекта увеличивается с увеличением атомного номера вещества. Поэтому для увеличения эффективности регистрации фотонов необходимо счетчик наполнять газом с большим атомным номером  $Z$  (криптон или ксенон).

Поскольку пропорциональные счетчики используются в основном для измерения излучения малых энергий (порядка десятков килоэлектрон-вольт), то определенные требования предъявляются к материалу, из которого изготовлено окно, пропускающее излучение в рабочий объем счетчика. Поглощение в нем для исследуемого диапазона энергий должно быть минимальным. Типичным пропорциональным счетчиком является детектор с бериллиевым окном толщиной 70 мкм, наполненный смесью газов Хе и  $\text{CH}_4$  (90 и 10 % соответственно) до общего давления  $P$  равного, 0,8 атм. Такой счетчик имеет почти 100%-ную эффективность при энергии  $\gamma$ -квантов 10 кэВ.

При регистрации нейтронов пропорциональные счетчики заполняются газами  $^3\text{He}$  или  $^{10}\text{BF}_3$ .

Нейтроны регистрируются с помощью заряженных частиц, возникающих в результате этих реакций и вызывающих ионизацию в счетчике. Вероятность регистрации быстрых нейтронов значительно меньше, чем медленных, и эффективности счетчиков быстрых нейтронов не превышают долей процента.

Пропорциональные счетчики используются в астрофизике, археологии, геологии, медицине. С помощью установленного на «Луноходе-1» пропорционального счетчика по рентгеновской флюоресценции производился элементный анализ вещества поверхности Луны.