

1.3 Пропорциональный счётчик

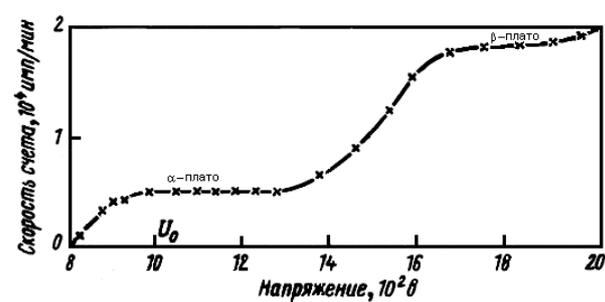
Пропорциональный счётчик, газоразрядный прибор для регистрации ионизирующих излучений, создающий сигнал, амплитуда которого пропорциональна энергии регистрируемой частицы, теряемой в его объеме на ионизацию.

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

Работа пропорционального счётчика основана на явлении газового усиления.

Газовое усиление это увеличение количества свободных зарядов в объёме детектора за счёт того, что первичные электроны на своём 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 . Такой режим работы отвечает *пропорциональному счётчику (камере)*. В названии отражено то, что в этом приборе амплитуда импульса тока (или полный собранный заряд) остаётся пропорциональной энергии, затраченной заряженной частицей на первичную ионизацию среды детектора. Таким образом, пропорциональный счётчик способен выполнять функции спектрометра, как и ионизационная камера. Энергетическое разрешение пропорциональных счётчиков лучше, чем у сцинтилляционных, но хуже, чем у полупроводниковых.

Заряженная частица, проходя через газ, наполняющий пропорциональный счётчик, создаёт на своём пути пары ион — электрон, число которых зависит от энергии, теряемой частицей в газе. При полном торможении частицы в пропорциональном счётчике 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 счётчика 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 счётчика, во много раз превышает число первичных электронов. Отношение полного



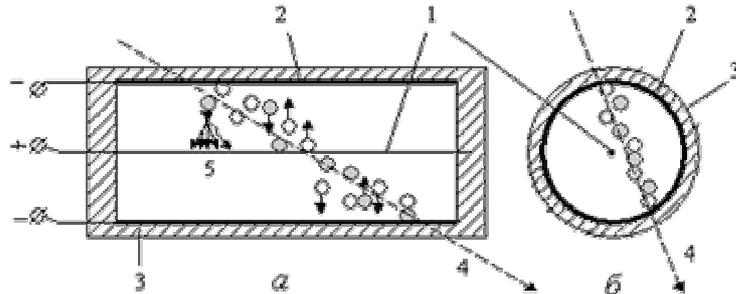
числа собранных электронов к первоначальному количеству называется коэффициентом газового усиления (в формировании импульса участвуют также и ионы).

Рис. 14. Счётная характеристика пропорционального счётчика, полученная с комбинированным источником β и α -частиц.

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

$$M = \frac{n}{n_0} \quad (6)$$

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 (счёт или измерение энергии) и оптимального соотношения сигнал-шум. При измерении энергии величину M стремятся брать по возможности меньше, т.к. в этом случае напряжение на счётчике соответствует более пологому участку его вольт-амперной характеристики и не требуется слишком высокая стабильность напряжения от источника питания. При счёте 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 счётчики, для которых характерны низкие значения рабочего напряжения, широкие возможности применения и компактность.

Рис. 15. Схема пропорционального счётчика в продольном (а) и поперечном (б) разрезе (аналогично устроен счетчик Гейгера и цилиндрическая ионизационная камера): 1 — нить-анод, 2 — цилиндрический катод, 3 — изолятор, 4 — траектория заряженной частицы, 5 — электронная лавина. Электроны и ионы, созданные частицей в результате первичной ионизации атомов инертного газа, показаны соответственно темными и белыми кружочками.

Конструктивно пропорциональный счётчик 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 вольт напряжённость поля вблизи нити-анода может достигать 40000 вольт/см., в то время как у катода она равна сотням в/см. 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.

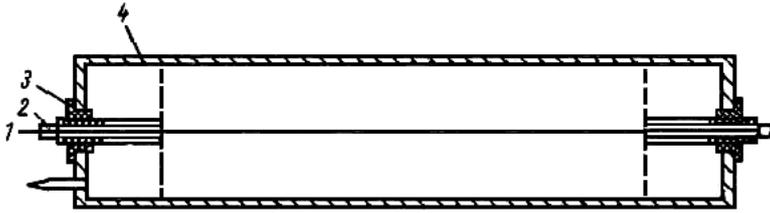


Рис. 16. Конструкция цилиндрического пропорционального счётчика: 1 – собирающий электрод; 2 – охранный кольцо; 3 – изолятор; 4 – корпус.

Газовое усиление осуществляется вблизи анода на расстоянии, сравнимом с диаметром нити, а весь остальной путь электроны дрейфуют под действием поля без «размножения». Пропорциональный счётчик 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 счётчика пригодны медь, латунь, алюминий и другие материалы. Минимальная толщина стенок $\delta \sim 0,05$ мм ограничивается прочностью материалов и условием герметичности рабочего объёма. Корпус счётчика, наполненного газом под небольшим давлением, должен выдерживать внешнее атмосферное давление.

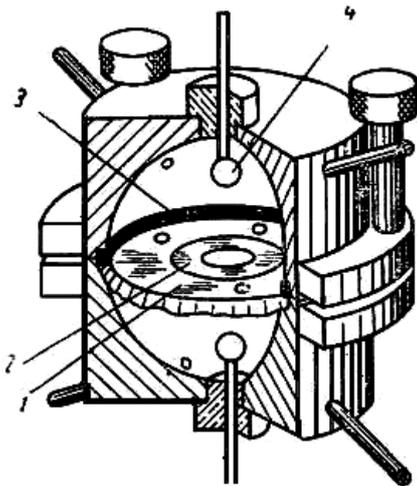


Рис. 17. Конструкция 4π-счётчика для измерения абсолютной β-активности: 1 – диафрагма; 2 – держатель источника; 3 – резиновое уплотнение; 4 – собирающий электрод.

Абсолютную β-активность источников измеряют 4π-счётчиками (Рис.17), представляющими собой спаренные полусферические пропорциональные счётчики. Внутри каждой полусферы на фольге, расположенной симметрично относительно счётчиков. Он испускает β-частицы в телесный угол 4π. Почти все испущенные β-частицы регистрируются счётчиком, и его скорость счёта приблизительно равна активности источника. При определении активности 4π-счётчиком вводят поправки на поглощение β-частиц в фольге и слое активного вещества. Кроме сферических применяют и другие формы 4π-счётчиков. Катоды 4π-счётчиков могут быть прямоугольными и полуцилиндрическими.

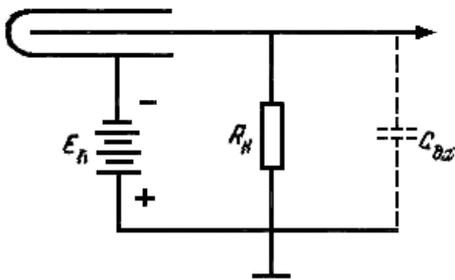


Рис.18. Схема включения пропорционального счётчика.

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

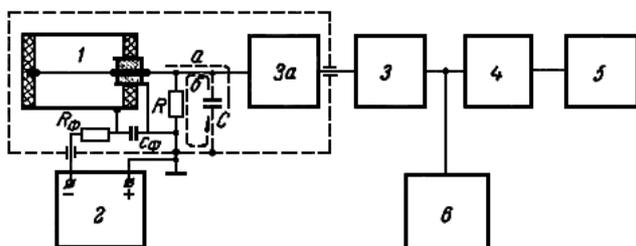


Рис. 19. Блок-схема пропорционального счетчика: 1 – пропорциональный счётчик; 2 – высоковольтный стабилизированный источник напряжения; 3 – широкополосный линейный усилитель; 3а – выносной блок усилителя (катодный повторитель); 4 – амплитудный дискриминатор; 5 – регулирующее устройство; 6 – импульсный осциллограф.

Если ещё больше увеличить разность потенциалов между анодом и катодом и увеличить коэффициент газового усиления до значений $>10^4$, то 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 лишь как счётчик частиц. Временное разрешение пропорционального счетчика может достигать 10^{-7} с.

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

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

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

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

Пропорциональные счётчики используются для регистрации всех видов ионизирующих излучений. Существуют пропорциональные счётчики для регистрации α -частиц, электронов, осколков деления ядер и т.д., а также для нейтронов, гамма- и рентгеновских квантов. В последнем случае используются процессы взаимодействия нейтронов, γ - и рентгеновских квантов с наполняющим счётчик газом, в результате которых образуются регистрируемые пропорциональным счётчиком вторичные заряженные частицы.

Пропорциональный счётчик сыграл важную роль в ядерной физике 30 - 40-х гг. 20 в., являясь наряду с ионизационной камерой практически единственным спектрометрическим детектором. Второе рождение пропорциональный счётчик получил в физике частиц высоких энергий в конце 60-х гг. в виде пропорциональной камеры, состоящей из большого числа (10^2 — 10^3) пропорциональных счётчиков, расположенных в одной плоскости и в одном газовом объёме. Такое устройство позволяет не только измерять ионизацию частицы в каждом отдельном счётчике, но и фиксировать место её прохождения. Типичные параметры пропорциональных камер: расстояние между соседними анодными нитями $\sim 1 - 2$ мм,

расстояние между анодной и катодной плоскостями ~ 1 см; разрешающее время $\sim 10^{-7}$ сек.

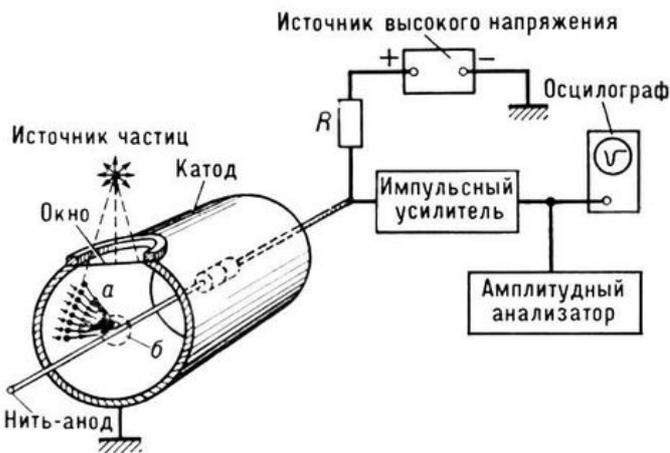


Рис. 20. Схема пропорционального счетчика: а — область дрейфа электронов; б — область газового усиления.

Развитие микроэлектроники и внедрение в экспериментальную технику ЭВМ позволили создать системы, состоящие из десятков тысяч отдельных нитей, соединённых непосредственно с ЭВМ, которая запоминает и обрабатывает всю информацию от пропорциональной камеры. Таким образом, она является одновременно быстродействующим спектрометром и трековым детектором. В 70-х гг. появилась дрейфовая

камера, в которой для измерения места пролёта частицы используется дрейф электронов, предшествующий образованию лавины. Чередую аноды и катоды отдельных пропорциональных счётчиков в одной плоскости, и измеряя время дрейфа электронов, можно измерить место прохождения частицы через камеру с высокой точностью ($\sim 0,1$ мм) при числе нитей в 10 раз меньше, чем в пропорциональной камере. Пропорциональные счётчики применяются не только в ядерной физике, но и в физике космических лучей, астрофизике, в технике, медицине, геологии, археологии и т.д. Например, с помощью установленного на «Луноходе-1» пропорционального счётчика по рентгеновской флуоресценции производился химический элементный анализ вещества поверхности Луны.

Использование газового усиления в пропорциональных счётчиках даёт возможность значительно повысить чувствительность измерений по сравнению с ионизационными камерами, а наличие

пропорциональности усиления в счётчиках позволяет определять энергию ядерных частиц и изучать их природу, так же, как и в ионизационных камерах.

Пропорциональные счётчики 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.

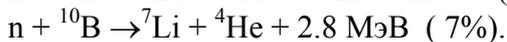
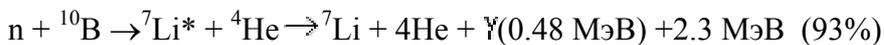
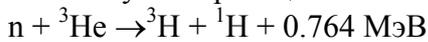
Пропорциональные счетчики используются для регистрации альфа-, бета-частиц, протонов, гамма-квантов и нейтронов. Пропорциональные счетчики чаще всего заполняют гелием или аргоном. При регистрации заряженных частиц и гамма-квантов для того, чтобы избежать потерь энергии частицами до регистрации используют тонкие входные окна. Иногда источник помещают в объём счетчика. Эффективность регистрации для мягких гамма-квантов с энергией меньше 20 кэВ более 80%. Для повышения эффективности регистрации более энергетичных гамма-квантов используют ксенон.

Необходимым условием регистрации заряженной частицы или γ -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 как Z^5 . Поэтому, для увеличения эффективности регистрации фотонов, необходимо счетчик наполнять газом с большим Z (криптон или ксенон).

Поскольку пропорциональные счетчики используются в основном для измерения излучения малых энергий (порядка десятков килоэлектронвольт), то определенные требования предъявляются к материалу окна, пропускающего излучение в рабочий объем счетчика. Материал окна выбирается таким, чтобы поглощение в нем для исследуемого диапазона энергий было минимальным. Типичным пропорциональным счётчиком является детектор с бериллиевым окном толщиной 70 мкм, наполненный смесью газов 90% Хе + 10% СН₄ до общего давления $P = 0,8$ атм. Такой счётчик имеет почти 100% эффективность при энергии γ -квантов 10 кэВ.

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



Эффективное сечение последней реакции для тепловых нейтронов очень велико. 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.