

1.1 Газонаполненные детекторы ионизационного типа

Ионизационные детекторы излучения представляют собой заполненный газом объём для создания в нём соответствующего электрического поля.

Ядерное излучение, попавшее в объём детектора, производит в нём первичную ионизацию газа либо непосредственно за счёт потери энергии излучением (в случае заряженных частиц), либо через вторичные эффекты взаимодействия с газовой средой (в случае нейтральных частиц или γ -квантов). Электроны или ионы, образовавшиеся в результате ионизации газа, движутся в электрическом поле между электродами, создавая тем самым ионизационный ток. При этом происходит собирание и накопление зарядов на электродах, а также «разряд» источника питания через среду рабочего объёма детектора. Под действием приложенного напряжения, образовавшиеся в результате электроны (ионы) собираются на электродах. Наличие ионизационного тока на нагрузке в виде разности потенциалов, можно зарегистрировать радиометрическим устройством и фиксировать тем самым попадание излучения в объём детектора.

В зависимости от режима работы детектора выходной сигнал с него может поступать в непрерывном или дискретном виде. В первом случае интенсивность излучения, попавшего в объём детектора, определяется средней величиной ионизационного тока (интегральный режим), а во втором случае – числом импульсов в единицу времени (импульсный режим). Энергия излучения определяется по амплитуде выходного сигнала в импульсном режиме.

Сама детектирующая среда может быть газообразной, жидкой или твердой. Наиболее обширную группу детекторов этого типа образуют газонаполненные детекторы.

Газонаполненные ионизационные детекторы (счетчики) благодаря хорошей чувствительности к излучениям разных видов, относительной простоте и дешевизне являются широко распространенными приборами регистрации излучений. Такой детектор представляет собой наполненную газом оболочку, в объём которой введены два или три электрода. В газонаполненных детекторах для регистрации частиц используется ионизация газа.

При измерении излучений необходимо обеспечение пропорциональности между параметрами выходного сигнала (средний ток, или частота следования; амплитуда) и соответствующими параметрами измеряемого излучения. Следует отметить, что на выходной сигнал влияет величина первичной ионизации, т.е. число первичных пар ионов, создаваемых в объёме детектора. Первичная ионизация зависит от удельной величины ионизационных потерь (т.е. от энергии, необходимой для образования одной пары ионов), связанной с типом излучения и свойствами среды. Так, потери энергии заряженной частицы (α - или β -частицы) на ионизацию и возбуждение молекул газа зависят от массы, скорости и заряда частицы, а также от плотности и других свойств газа. В случае γ -квантов первичная ионизация определяется эффектами взаимодействия их с рабочей средой (фотоэффект, эффект Комптона, образование пар), вероятность возникновения которых зависит от энергии γ -излучения и свойств среды. При регистрации нейтронов первичная ионизация связана с вероятностью n - p – столкновений в водородсодержащей среде (протоны отдачи), вероятностью реакций захвата нейтрона лёгким ядром (^{10}B) или деления тяжёлых ядер (^{235}U).

Кроме того, на выходной сигнал детектора существенно влияет характер происходящего в нём газового разряда, а также входные электрические параметры последующего регистрирующего устройства.

В соответствии с характером процесса, обеспечивающего регистрацию излучения, различают ионизационные камеры, пропорциональные счетчики, счетчики Гейгера-Мюллера. Наиболее обширную группу детекторов этого типа образуют газонаполненные детекторы. Простейшим из газонаполненных детекторов является ионизационная камера. Она представляет собой систему двух электродов в объёме, заполненном инертным газом (чаще всего аргоном и неоном). Если частица полностью останавливается в объёме камеры, то по величине собранного заряда (количеству электронов, пришедших на анод) легко определить энергию частицы.

Недостатком ионизационной камеры являются очень низкие токи, которые трудно регистрировать. Этот недостаток преодолевается в ионизационных детекторах с газовым усилением. 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. Такой режим работы отвечает пропорциональному счётчику. Пропорциональный счётчик способен выполнять функции спектрометра, как и ионизационная камера. Если ещё больше увеличить разность потенциалов между анодом и катодом и довести коэффициент газового усиления до 10^4 - 10^5 , 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.

При дальнейшем увеличении напряжённости электрического поля (и газового усиления) счётчик переходит в такой режим работы, когда достаточно появления в его объёме одного электрона, чтобы он запустил столь мощный лавинообразный процесс, который способен ионизовать всю область вблизи нити-

анода. При этом импульс тока достигает предельного значения (насыщается) и не зависит от первичной ионизации. Счётчик, работающий подобным образом, называется счётчиком Гейгера-Мюллера. Если разность потенциалов между анодом и катодом в газонаполненном счетчике превысит некоторое критическое значение, то появление в его объёме свободных носителей зарядов вызовет искровой пробой (разряд). При этом амплитуда электрического сигнала с такого счётчика (называемого *искровым*) может достигать сотен вольт.

Детектор включается в электрическую цепь, схема которой показана на **Рис.1**. Здесь C_1 - общая емкость счетчика и входа усилителя; R_1 - сопротивление нагрузки. На счетчик подают высокое напряжение V , создающее в газовом объеме счетчика электрическое поле E .

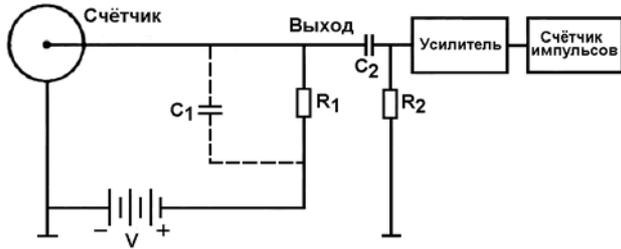


Рис.1. Схема включения счётчика радиоактивных излучений.

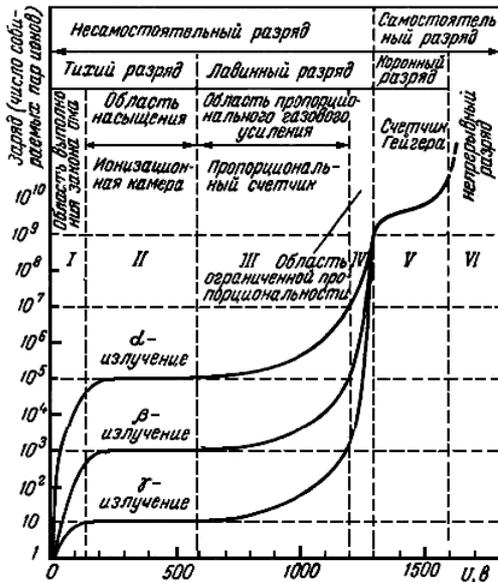
Рабочее напряжение, подаваемое на электроды счетчика, зависит от давления газа, которое для различных режимов работы детектора может меняться в широких пределах.

Для выяснения процессов в газовом разряде и выделения характерных областей работы различных типов ионизационных детекторов целесообразно рассмотреть его вольт-амперную характеристику в координатах зависимости величины полного заряда q (выражаемого для простоты числом пар ионов) собираемого в результате единичного акта начальной ионизации, от напряжения на электродах U . При этом предполагается: наиболее распространённая геометрия электродов в виде цилиндрического катода и аксиально натянутого тонкого анода; заполнение рабочего объёма инертным газом при нормальных условиях; использование источника ограниченной мощности.

Регистрация частиц происходит следующим образом. Частица, попадая внутрь счетчика, вызывает ионизацию газа. Электроны, тяжелые положительные и отрицательные ионы, образованные ионизирующей частицей, двигаясь в электрическом поле, испытывают многократные столкновения, упругие и неупругие, с молекулами газа. Средняя скорость направленного движения электронов и ионов пропорциональна напряженности электрического поля и обратно пропорциональна давлению газа.

Возникающий ток обусловлен в основном электронами, так как их подвижность на три порядка выше, чем подвижность тяжелых ионов. Импульс напряжения на сопротивление R_1 усиливается и подается на регистрирующую аппаратуру.

На **Рис.2** схематически представлены вольт-амперные характеристики газоразрядного промежутка $q=f(U)$ для трёх значений начальной ионизации n_0 : 10^5 пар ионов от α -частицы, 10^3 от β -частицы и 10 от γ -излучения. Здесь предполагается, что постоянная времени $\tau = R_1 C_1$ много больше времени собирания заряда в детекторе.



Каждую кривую можно разделить на характерные участки.

В отсутствие электрического поля ($U=0$) все ионы, созданные начальной ионизацией, полностью рекомбинируют в нейтральный газ. В электрическом поле ионы приобретают направленное движение к электродам, причём их скорость зависит от напряжённости поля и подвижности ионов.

Рис. 2. Счётная характеристика газового детектора

При малых значениях U (участок I) происходят два конкурирующих процесса: собирание зарядов на электродах и рекомбинация ионов в газовом объёме. При увеличении поля скорость ионов увеличивается, что уменьшает вероятность рекомбинации. Однако здесь число пар ионов, уносимых полем из рабочего объёма на электроды, ещё незначительно по сравнению с числом ионов, которые рекомбинируют в том же объёме или вне его вследствие диффузии ионов в газе. На участке I газ имеет, как и любой проводник со свободными носителями заряда, постоянную электропроводность, т.е. здесь выполняется закон Ома. По мере увеличения напряжения число собираемых ионов возрастает (участок I) до насыщения, при котором все ионы, созданные начальной ионизацией, оказываются полностью собранными на электродах. Рекомбинация при этом практически отсутствует.

Насыщение сохраняется при дальнейшем увеличении U (горизонтальный участок II) Этот участок кривой называют областью насыщения. Именно в этой области работают ионизационные камеры. При дальнейшем увеличении напряжения электроны, созданные в результате первичной ионизации, ускоряются

полем настолько, что становятся способными при столкновении с нейтральными атомами газа ионизировать их, т.е. создавать некоторое число вторичных ионов. Происходит газовое усиление. При этом амплитуда импульса сначала растёт пропорционально первичной ионизации - это пропорциональная область (ПО). В этой области III работают так называемые пропорциональные счётчики. Область работы пропорциональных счётчиков затем сменяется областью ограниченной пропорциональности IV (ООП).

Замечание. На участках III и IV образуются лавины электронов и положительных ионов, а возникший при этом разряд называется лавинным или таусендовским. Форма разряда, соответствующая начальной части вольтамперной характеристики, включая и область насыщения (участки I и II), называется тихим разрядом. Тихий и лавинный разряды прекращаются по достижении «первичными» электронами (ионами) или их лавиной поверхности электродов, поэтому они относятся к категории несамостоятельного разряда. Лавинный разряд сопровождается явлением газового усиления, которое связано с процессами вторичной ионизации и сопровождается увеличением заряда, собираемого на электродах, по сравнению с зарядом «первичных» пар ионов. Коэффициент газового усиления, выражающий отношение этих зарядов, равен единице в области насыщения (участок II). Пройдя затем через переходную область сравнительно медленного подъёма (начало участка III), коэффициент газового усиления растёт далее с увеличением напряжения экспоненциально (участок III), а при больших напряжениях ещё быстрее из-за появления вторичных лавин от дополнительных электронов вследствие фотоэффекта на катоде и частично в газе, сопровождающего с определённой вероятностью процесс возбуждения атомов и молекул газа (участок IV). На участке напряжений III каждая лавина развивается независимо от других лавин, так что величина начальной ионизации не влияет на коэффициент газового усиления, который является здесь действительно пропорциональной константой, а сама область носит название пропорциональной области. На участке IV наиболее сильного роста газового усиления с напряжением уже сказывается влияние пространственного заряда положительных ионов и соседних лавин, мешающих взаимному развитию. В этом случае величина начальной ионизации влияет на коэффициент газового усиления таким образом, что его возможный рост ограничивается при сильной первичной ионизации по сравнению с наиболее быстрым увеличением при слабой ионизации. Процессы тихого и лавинного несамостоятельного разрядов наблюдаются практически при любой геометрии электродов и не требуют большой мощности источника напряжения.

На участке V газовое усиление возрастает настолько, что собираемый заряд не зависит от первичной ионизации. Это так называемая область Гейгера. Однако разряд, как и в предыдущих областях, остается вынужденным, т. е. начинается после прохождения ионизирующей частицы. Это область работы счётчиков Гейгера-Мюллера.

Замечание. Из-за большой концентрации зарядов и недостатка нейтрального газа в местах образования лавин разряд за счёт фотоионизации начинает распространяться в область большого градиента поля (вдоль нити анода) и из несамостоятельного переходит в самостоятельный. Характер перехода и тип возникающего самостоятельного разряда зависят от геометрии электродов, характера питающего напряжения и мощности его источника, а также от природы и состояния наполняющего газа. Из существующих видов самостоятельного разряда для регистрации излучений широко используется коронный разряд (счётчики Гейгера-Мюллера и коронные счётчики). Коронный разряд возникает при сравнительно больших давлениях газа во всех тех случаях, когда поле в разрядном промежутке очень неравномерно из-за малого радиуса кривизны поверхности одного или обоих электродов и достаточного расстояния между ними. Ионизация, а также свечение газа происходит лишь около электрода с малым радиусом кривизны в тонком слое, называемом короной. Коронирующий слой занимает область пробега электронных лавин, оставляющих позади себя положительные пространственные заряды большой плотности. Во внешней области коронного разряда, так называемой «тёмной», свободных электронов нет, ионизация столкновения первого рода не происходит, и ток осуществляется движением ионов. Характерной особенностью коронного разряда является то, что сила тока в нём обусловлена не сопротивлением внешней цепи, а ограниченной проводимостью внешней области разряда, которая зависит от геометрии электродов, напряжения между ними, а также от природы и состояния газа.

Коронный разряд возникает на участке напряжений V и прекращается после каждого единичного акта начальной ионизации принудительно: либо добавкой к наполняющему рабочий объём инертному газу одного из галогенов или органических молекул, ликвидирующих опасность вторичных лавин; либо резким ограничением мощности источника напряжения путём последовательного включения высокоомного сопротивления (10^9 ом), которое на время движения положительных ионов к катоду сохраняет напряжение на электродах ниже порога зажигания самостоятельного коронного разряда, уменьшенного за счёт накопления отрицательного заряда на аноде в процессе разряда.

Дальнейшее увеличение напряжения приводит к непрерывному разряду (область VI), поэтому эта область для регистрации частиц не используется.

Замечание. Ширина области существования прерываемой короны (участок напряжений V), после которой начинается непрерывный самостоятельный разряд (участок VI), пропорциональна величине сопротивления, включаемого последовательно с детектором для снятия выходного сигнала.

Газонаполненные детекторы имеют два недостатка. Во-первых, плотность газа низка и энергия, теряемая частицей в объёме детектора мала, что не позволяет эффективно регистрировать высокоэнергичные и слабоионизирующие частицы. Во-вторых, энергия, необходимая для рождения пары электрон-ион в газе велика (30-40 эВ), что увеличивает относительные флуктуации числа зарядов и ухудшает энергетическое разрешение.