

где  $V$  — напряжение на трубке. Тогда после сокращения на  $\mathcal{F}$  мы приходим к уравнению вида

$$F\left(\frac{V}{l\mathcal{F}}\right) = 0,$$

где  $F$  — некоторая функция аргумента  $V/(l\mathcal{F})$ . Решая это уравнение, найдем «потенциал зажигания»  $V_{\text{зж}} = V_{\text{зж}}(l\mathcal{F})$ . Отсюда следует, что *разность потенциалов между электродами трубки, при которой начинается пробой газа, есть функция произведения давления газа  $\mathcal{F}$  на расстояние между электродами*. Если в нескольких разрядных трубках с плоскими электродами создать условия, при которых произведения  $\mathcal{F}l$  постоянны, то для всех трубок потребуется одна и та же разность потенциалов, чтобы вызвать газовый разряд. Этот закон был установлен экспериментально Пашеном (1865—1947) еще до создания Таунсендом теории пробоя газа.

Закон Пашена можно вывести и из более общего условия пробоя (115.15), если только  $\gamma$ , наряду с  $\alpha/\mathcal{F}$  и  $\beta/\mathcal{F}$ , также является функцией  $E/\mathcal{F}$ . Такое предположение весьма правдоподобно, так как оно означает, что  $\gamma$  есть функция лишь кинетической энергии, приобретаемой в среднем положительным ионом на каждом свободном пробеге перед ударом о катод. При высоких давлениях газа (порядка сотен атмосфер) наблюдаются отступления от закона Пашена.

## § 117. Тлеющий разряд

1. Тлеющим разрядом обычно называют самостоятельный разряд, в котором катод испускает электроны вследствие бомбардировки его положительными ионами и фотонами, образующимися в газе. В отличие от таунсендовского разряда, где плотности электрического тока невелики, а влияние пространственного заряда не существенно, в тлеющем разряде плотности тока значительно больше, а пространственные заряды, возникающие из-за большого различия в массах электронов и положительных ионов (см. § 112, пункт 3), делают электрическое поле в газе существенно неоднородным. Для тлеющего разряда характерна большая напряженность электрического поля и соответствующее ей большое падение потенциала вблизи катода (так называемое *катодное падение*).

2. Возьмем стеклянную трубку длиной 30—50 см, в которую впаяны два электрода (рис. 283). Приложим между ними постоянное напряжение в несколько сот вольт. При атмосферном давлении такое напряжение недостаточно для пробоя газа, и трубка остается темной. Будем откачивать газ из трубки. При давлении  $\approx 50$  мм рт. ст. возникает самостоятельный разряд в виде светящегося шнура красноватого цвета, идущего от катода к аноду. При давлении  $\approx 2$ —3 мм рт. ст. свечение заполняет всю трубку. При давлении

газа порядка 0,1—0,01 мм рт. ст. разряд имеет вид, изображенный на схематическом рис. 283. На том же рисунке представлено примерное распределение потенциала  $V$  в трубке.

Непосредственно к катоду примыкает узкое так называемое *астоново темное пространство* (на рис. 283 обозначенное цифрой 1), где электроны, исходящие из катода, еще не успели приобрести скорости, достаточной для возбуждения атомов и молекул газа. Оно впервые наблюдалось Астоном (1877—1945) в гелии, неоне

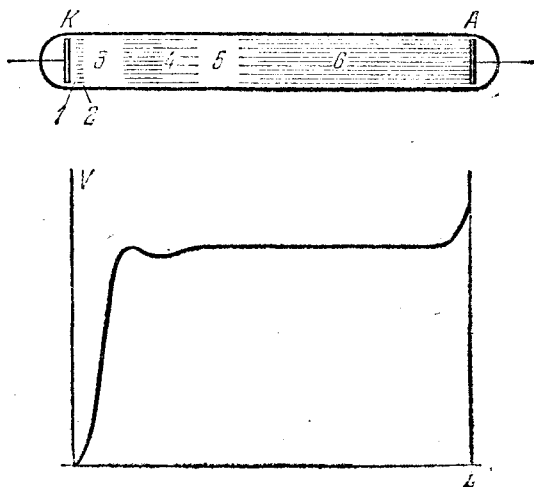


Рис. 283.

и водороде, почему и получило его имя. Ширина астонова темного пространства (порядка десятых долей мм) обратно пропорциональна давлению газа и уменьшается с увеличением плотности тока.

Затем идет тонкая светящаяся пленка, называемая *катодным слоем* (2), где происходит возбуждение атомов и молекул ударами электронов, но еще нет ионизации. Возвращаясь в нормальное состояние, возбужденные атомы излучают световые кванты, чем и объясняется свечение.

За катодным слоем следует *темное катодное пространство*, называемое также *темным кружковым* или *темным гитторфовым пространством* (3). На самом деле оно не совсем темное, но кажется таковым лишь на фоне примыкающих к нему более светлых областей разряда. В этой части пространства начинается *ионизация атомов и молекул* и *нарастание электронных лавин*. Из-за возможности ионизации уменьшается вероятность возбуждения атомов, с чем и связано ослабление свечения газа. Область темного катодного пространства наиболее важна для поддержания раз-

ряда, так как созданные здесь положительные ионы обеспечивают необходимую эмиссию электронов с катода.

Темное катодное пространство резко переходит в *отрицательное тлеющее свечение*, иногда называемое просто *тлеющим свечением* (4). Это свечение резко ограничено только со стороны катода. Свечение возникает из-за *рекомбинации* электронов с положительными ионами, а также вследствие *квантовых переходов* возбужденных атомов на более низкие энергетические уровни.

При продвижении к аноду яркость тлеющего свечения ослабевает, и оно постепенно переходит в так называемое *фарадеево темное пространство* (5), в которое уже не долетают быстрые электроны электронных лавин.

Перечисленные пять областей называются *катодными частями разряда*. В них происходят все процессы, необходимые для поддержания разряда.

3. За фарадеевым темным пространством следует так называемый *остов разряда*. В более или менее узких трубках он представляет собой столб ионизованного светящегося газа (6) и называется *положительным свечением* или *положительным столбом разряда*. Обычно положительный столб простирается до самой поверхности анода. При некоторых условиях между положительным столбом и анодом видно *темное анодное пространство*, а на самой поверхности анода — *анодное свечение*, или *анодная светящаяся пленка*. Положительный столб иногда разделяется на отдельные чередующиеся светлые и темные полосы — *страты*. Тогда разряд называется *сложным*. Наличие положительного столба несущественно для поддержания разряда, хотя он и имеет большое значение в применениях разряда. В очень коротких трубках положительный столб отсутствует. В длинных трубках он служит проводящим мостом, соединяющим фарадеево темное пространство с анодом. Для положительного столба характерна относительно высокая степень ионизации и связанная с ней высокая проводимость газа. По той же причине плотность пространственного заряда в положительном столбе невелика (и даже равна нулю). Свечение в положительном столбе происходит в основном за счет рекомбинации электронов с положительными ионами. На последних нескольких свободных пробегах (в области так называемого анодного падения) электроны могут накопить достаточную кинетическую энергию, чтобы вызвать возбуждение атомов, в то время как положительные ионы оттягиваются от анода. Это приводит к анодному свечению.

4. Если анод трубки сделать подвижным и постепенно подвигать его к катоду, то катодные части разряда по своей форме и величине остаются неизменными вплоть до границы положительного столба, в то время как длина последнего уменьшается. При дальнейшем передвижении анода к катоду укорачивается длина фарадеева темного пространства, а затем и тлеющего свечения. При этом положе-

ние резкой границы тлеющего свечения со стороны катода остается неизменным. Когда расстояние от этой границы до анода уменьшается до долей миллиметра, тлеющий разряд прекращается. Аналогичные явления наблюдаются, если, оставляя анод неподвижным, передвигать к нему катод. При этом без изменения размеров и формы передвигаются и все катодные области разряда вместе с границей положительного столба. Затем положительный столб, фарадеево темное пространство и тлеющее свечение постепенно «съедаются» анодом. Разряд прекращается, когда толщина тлеющего свечения уменьшается до долей миллиметра. Если расстояние между катодом и анодом недостаточно, чтобы на нем поместить темное катодное пространство и начало тлеющего свечения, то разряд, когда это позволяет конструкция трубки, выбирает более длинный путь (рис. 284).

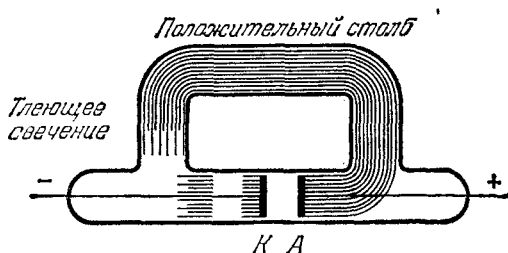


Рис. 284.

5. При больших внешних сопротивлениях, когда сила тока в разрядной трубке невелика, поверхность катода, покрытая свечением и принимающая участие в разряде, пропорциональна силе тока в трубке (*закон Геля*). При изменении тока плотность его остается приблизительно постоянной. Вместе с ней остается постоянным и катодное падение потенциала. В этом случае оно называется *нормальным катодным падением*. До давлений в несколько десятков мм рт. ст. нормальное катодное падение не зависит от давления газа, а определяется только материалом катода и составом газа. В большинстве случаев оно лежит в пределах 100—300 В. Температура катода не оказывает влияния на величину нормального катодного падения, пока не возрастет заметно термоэлектронная эмиссия с поверхности катода. С хорошим приближением нормальное катодное падение пропорционально работе выхода электрона из катода. Это используется для устройства *газосветных трубок* с очень малым потенциалом зажигания. Такова, например, *неоновая лампочка*, в которой электродами служат два железных листочка, покрытых слоем бария для уменьшения работы выхода. Катодное падение составляет в этом случае всего 70 В, и тлеющий разряд

зажигается в неоновой лампочке уже при включении в обычную осветительную сеть.

Когда с увеличением тока вся поверхность катода оказывается покрытой свечением, начинает возрастать и катодное падение. В этом случае оно называется *аномальным катодным падением*, а самый разряд — *аномальным тлеющим разрядом*.

6. Электроны, выбиваемые с поверхности катода положительными ионами, ускоряются в области катодного падения потенциала. Когда давление в трубке относительно велико (выше 0,1 мм рт. ст.), электроны теряют свои скорости в результате столкновений с частицами газа. При уменьшении давления газа увеличивается средняя длина свободного пробега электронов, а с ней и катодное темное пространство. При давлении 0,01—0,001 мм рт. ст. (в зависимости от размеров трубки) катодное темное пространство заполняет почти всю трубку и электронный пучок движется в трубке почти без столкновений. Такие электронные пучки получили название *катодных лучей*. Последние были открыты Круксом в конце 70-х годов 19 века, еще до установления их физической природы (и до открытия самого электрона). Если на пути катодных лучей поставить металлический экран, то за ним на противоположной стороне трубки наблюдается его тень. При поднесении магнита пучок лучей и образуемая им тень смещаются в сторону. Эти явления и наблюдались Круксом. Обычно в опытах с катодными лучами применяются короткие, но широкие стеклянные трубки, в которых анод помещается сбоку электронного пучка, исходящего из катода. Электроны, вышедшие с катода, ускоряются электрическим полем вблизи его поверхности и далее движутся перпендикулярно к ней по инерции. Попадая на стенки трубки, электроны сообщают им отрицательный заряд. Однако последний нейтрализуется положительными ионами, подтекающими из газа к стенкам трубки, а отрицательные ионы газа попадают на анод. Если поверхности катода придать вогнутую сферическую форму, то катодные лучи сфокусируются в центре этой сферы. Когда давление в трубке настолько мало, что область катодного темного пространства захватывает анод, тлеющий разряд в трубке прекращается. Вместе с ним прекращается также испускание катодных лучей и свечение стенок трубки.

7. Катодные лучи используются в так называемых *ионных рентгеновских трубках* для получения *рентгеновских лучей*. Устройство такой трубки показано на схематическом рис. 285. Трубка имеет вогнутый катод *K* и два положительных электрода *A* и *A<sub>к</sub>*. Один из них *A*, называемый *анодом*, более удален от катода и расположен в области тлеющего свечения. Он предназначен для поддержания в трубке тлеющего разряда. Вторым электродом *A<sub>к</sub>* называется *антикатодом* и состоит из тугоплавкого металла (вольфрама, молибдена и пр.). На этом электроде фокусируются пучки электронов, испускаемые катодом. При их торможении из антикатада выходят

рентгеновские лучи, представляющие собой очень короткие электромагнитные волны (длина волны порядка  $10^{-8}$  см и меньше). Их свойства будут рассмотрены в четвертом и пятом томах нашего курса. Под действием бомбардирующих электронов антикатод сильно раскаляется. Поэтому в мощных рентгеновских трубках антикатод изнутри охлаждается проточной водой.

Ионные рентгеновские трубки обладают тем недостатком, что в результате различных процессов количество газа в трубке уменьшается с течением времени. Когда давление газа в трубке делается меньше 0,001—0,0001 мм рт. ст., тлеющий разряд не зажигается, и трубка перестает работать. В настоящее время применяются почти исключительно *электронные рентгеновские трубки*, обладающие

большой устойчивостью в работе, чем ионные трубки. В них тлеющий разряд не используется, а потому не нужен вспомогательный анод, служащий для поддержания такого разряда. Анод (в мощных трубках охлаждаемый) делается из таких же тугоплавких металлов, как и антикатод в ионных трубках. Катодом служит вольфрамовая спи-

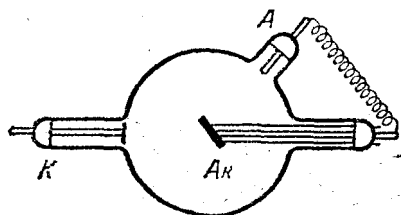


Рис. 285.

раль, накалываемая электрическим током. Электроны, испускаемые катодом, образуются вследствие термоэлектронной эмиссии. Ускоренные электрическим полем, они бомбардируют анод и при торможении на нем испускают рентгеновские лучи.

8. Если в катод просверлить малые отверстия, то положительные ионы, бомбардирующие катод, пройдя через эти отверстия, попадают в закатодное пространство и там распространяются в виде прямолинейных лучей (такой опыт впервые был произведен Гольдштейном в 1882 г.). Эти лучи были названы *положительными*, или *канальными*, *лучами*, поскольку они выходят из отверстий катода, как из каналов. Канальные лучи заметны в трубке в виде слабо светящихся пучков. Они, как и катодные лучи, вызывают свечение стекла трубки. Из-за наличия процессов *перезарядки* в пучке канальных лучей имеются не только положительные, но и отрицательные ионы, а также быстрые, отчасти возбужденные нейтральные частицы. В магнитном поле такой пучок разделяется на три пучка: положительные ионы отклоняются в одну сторону, отрицательные — в противоположную, а нейтральные молекулы и атомы не испытывают никакого отклонения. При повторном пропускании этих пучков через магнитное поле каждый из них снова распадается на три пучка. Отсюда следует, что процессы перезарядки происходят не только перед катодом, но и продолжают в закатодном пространстве.