

## Работа 2

# ПОЛНАЯ ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ГАЗЕ

*Цель: ознакомление с основными видами электрического разряда в газах низкого и среднего давления, исследование вольтамперной характеристики (ВАХ) газоразрядного промежутка.*

## ВВЕДЕНИЕ

Электрический ток, проходящий через газ, сопровождается рядом своеобразных явлений. Так, наблюдаются разнообразные виды свечения газа – от слабого, еле заметного сияния до ослепительного яркого света электрической дуги. Кроме этого, электрические токи через газы подчиняются своим определенным законам. Электропроводность газа непостоянна и может зависеть как от внешних воздействий на газ, так и от силы тока через газ. Зависимость между током и напряжением не однозначна и часто выражается так называемой падающей вольтамперной характеристикой, когда при возрастании тока уменьшается разность потенциалов, приходящаяся на газовый промежуток.

Электрические разряды в газах имеют внешние и внутренние параметры. К числу внешних относятся:

- напряжение на разрядном промежутке  $U$ ;
- протекающий ток  $I$ ;
- индуктивность  $L$ ;
- емкость  $C$ ;
- сопротивление: резистивное, статическое  $R_c$  и дифференциальное  $R_d = dU/dI$  ;
- полное сопротивление  $Z$ ;
- внешнее магнитное поле, если оно используется.

Внешние параметры связаны между собой и зависят от материала и формы электродов, давления и природы газа.

Внешние параметры электрических разрядов в газах измеряются при помощи приборов постоянного или переменного тока, импульсной аппаратурой, в том числе различными осциллографами, мостами для измерения индуктивностей и емкостей.

Расчет этих параметров с использованием внутренних параметров сложен и произведен до сих пор не для всех видов электрических разрядов в газах.

К числу внутренних параметров электрических разрядов в газах относятся:

- напряженность поля  $E$  в различных точках пространства разряда;
- плотность тока в объеме газа и на электродах  $j$ ;
- плотности зарядов ионов положительных, отрицательных и электронов  $\rho_+$ ,  $\rho_-$ ,  $\rho_e$ ;
- функции распределения ионов и электронов по скоростям  $f_e, f_+, f_-$ ;
- средние значения скоростей частиц хаотических  $\bar{v}$  и направленных  $\bar{v}'$ ;
- температуры ионов, электронов и нейтральных газовых молекул  $T_+$ ,  $T_e$ ,  $T_n$ .

Если сопротивление внешней цепи не слишком мало и давление газа невелико, то при зажигании разряда получается форма самостоятельного разряда, называемая тлеющим разрядом.

Тлеющий разряд характеризуется чередованием светящихся и темных участков разрядного промежутка, сравнительно малой плотностью тока и наличием около катода узкой области с падением потенциала порядка сотен вольт. Температура электродов при тлеющем разряде невелика. Если же постепенно увеличивать силу тока, уменьшая при этом сопротивление внешней цепи, то постепенно увеличиваются интенсивность свечения газа и температура катода. Затем ток резко возрастает, а напряжение, приходящееся на разрядный промежуток, уменьшается. Светящиеся части разряда перестраиваются. Катод сильно накаляется, и тлеющий разряд переходит в дуговой.

Внешний вид тлеющего разряда хорошо известен. Основные области разряда легко различить, например, при следующих условиях: диаметр разрядной трубки – несколько сантиметров, расстояние между электродами 20–30 см, давление газа – порядка 10 Па ( $10^{-1}$  торр), ток разряда – единицы или десятки миллиампер. На рис.1 представлен внешний вид тлеющего разряда при указанных условиях. В разряде различим ряд светящихся и относительно темных областей:

### *Темные пространства*

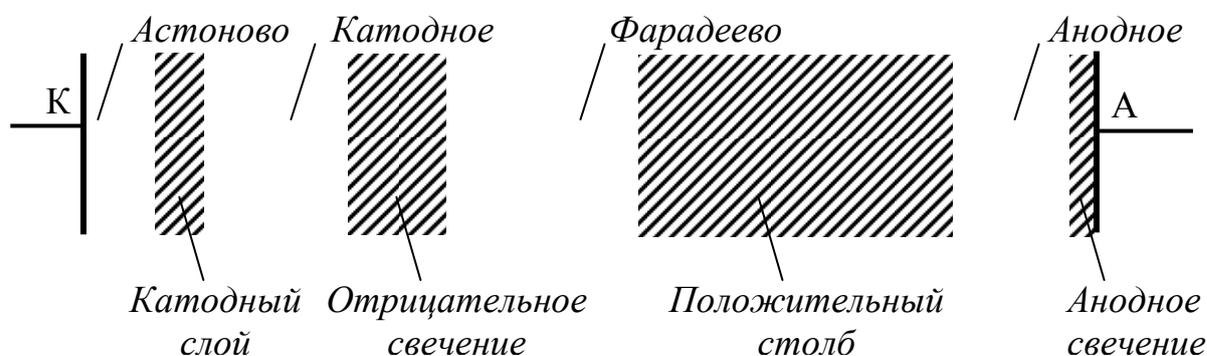


Рис. 1. Внешний вид тлеющего разряда

1) на катоде виден тонкий светящийся слой газа (светящаяся пленка), называемый первым катодным свечением;

2) катодное свечение не лежит непосредственно на катоде, а отделено от него темным слоем, обычно очень тонким. Это так называемое темное астоново пространство;

3) за катодной светящейся пленкой следует второе катодное темное (круксово) пространство;

4) темное пространство резко переходит в отрицательное тлеющее свечение, ограниченное четко только со стороны катода;

5) в противоположную от катода сторону яркость тлеющего свечения ослабевает, постепенно переходя в так называемое фарадеево темное пространство.

Все эти части разряда называются катодными. В первых четырех частях сосредоточены все процессы, необходимые для поддержания разряда;

б) далее идут положительный столб, темное анодное пространство и, на самой поверхности анода, анодное свечение.

Рассмотрим элементарные процессы, протекающие в отдельных областях газового разряда.

*Первая область* (темное астоново пространство, непосредственно примыкающее к катоду, катодный слой и часть отрицательного тлеющего свечения). Область положительного объемного заряда у катода и тесно связанная с ней область отрицательного тлеющего свечения представляют собой плазму. Обе эти части образуют катодную часть тлеющего разряда, на которой сосредоточено катодное падение потенциала  $U_k$ , составляющее значение от 20 до  $10^4$  В. Эта область представляет пространство с избытком положительного объемного заряда у катода, в котором за счет лавин образуются ионы и электроны, создающие ток. В ней выполняются условия самостоятельности разряда:  $\gamma(e^{a_d} - 1) = 1$ .

*Вторая область* (вторая часть отрицательного свечения и фарадеево темное пространство). Здесь высокая концентрация заряженных частиц поддерживается ионизацией газа, потоком быстрых электронов, поступающих из второго катодного темного пространства. Это – область пассивной плазмы.

*Третья область* – положительный столб – представляет собой плазму, ограниченную близко расположенными стенками. На стенки за счет амбиполярной диффузии текут равные токи электронов и ионов с последующей рекомбинацией. Уход зарядов на стенки компенсируется, при стационарном состоянии положительного

столба, ионизацией электронами, возникающей за счет осевого электрического поля  $E$ . Положительный столб не является существенной частью разряда.

Если в катодных частях разряда преобладающим является направленное движение заряженных частиц (электронов и положительных ионов), то положительный столб представляет собой типичный пример газоразрядной изотермической плазмы, в которой доминирует хаотическое движение зарядов. В соответствии с этим роль стенок, ограничивающих ионизованный газ в катодных частях, незначительна, а в положительном столбе она является существенной.

*Четвертая область* (анодная), замыкающая цепь тока в газе. Здесь плазма находится в контакте с металлом анода, и в зависимости от ряда условий возникает положительное, отрицательное или близкое к нулю анодное падение потенциала. Знак и величина анодного падения потенциала является тем регулятором, который поддерживает концентрацию заряженных частиц перед анодом на уровне, обеспечивающем подведение к нему требуемого внешней цепью разрядного тока.

Развившийся тлеющий разряд имеет устойчивый вид. Теперь, если уменьшать расстояние между электродами  $d$  (при неизменном токе разряда), то катодные части изменяться не будут, а положительный столб станет сокращаться, уменьшается и общее падение потенциала  $U_{\text{тл}}$ . При определенном критическом расстоянии между электродами  $d=d_{\text{кр}}$ , исчезнут анодное свечение и анодное падение потенциала. Далее, при уменьшении расстояния  $d$  величина  $U_{\text{тл}}$  почти не изменяется. Эту величину и принимают за катодное падение потенциала  $U_{\text{к}}$  тлеющего разряда.

Такое изменение формы свечения тлеющего разряда показывает, что катодная часть является основной и может существовать самостоятельно. Положительный столб и фарадеево темное пространство являются побочными областями и без катодной части существовать не могут.

Основные процессы на катоде, которые поддерживают тлеющий разряд, – это эмиссия электронов под действием положительных ионов, фотонов и возбужденных атомов, создаваемых самим разрядом. Термоэлектронная эмиссия не играет заметной роли – тлеющий разряд легко возникает при комнатной и еще более низкой температуре катода. Если разряд происходит при напряжениях около 1 кВ и более низком давлении газа, то приобретает значение также кинетическая эмиссия электронов из катода за счет как ионов, так и быстрых нейтральных атомов, которые возникают в области объемного заряда у катода при перезарядке положительных ионов. Если катодное падение  $U_{\text{к}}$  составляет величину от 20 до 1000 В, процесс

перезарядки не является существенным, так как кинетическая эмиссия в соответствующей области энергии очень мала.

Число электронов, которые эмиттируются из катода за счет всех процессов в расчете на один положительный ион, достигающий катода, составляет общий коэффициент  $\gamma$  тлеющего разряда. Из отдельных видов эмиссии наибольшее значение имеет ионно-электронная эмиссия, являющаяся при  $U_k < 1$  кВ потенциальной эмиссией. Коэффициент  $\gamma_p$  составляет для ионов различных газов и материалов катода величину от  $10^{-3}$  до 0,4. Примерно в этих же пределах находится и общий коэффициент  $\gamma$ .

Электроны эмиттируются из катода со средней энергией порядка 1 эВ. В сильном поле около катода электроны быстро приобретают энергию. Как только энергия достигнет потенциала возбуждения  $eU_b$ , появятся возбужденные атомы, которые затем переходят снова в невозбужденное состояние с излучением. Чем ближе к аноду произошло неупругое столкновение электрона, тем большую он имел энергию и тем сильнее возбудил атом. Поэтому энергия квантов, испускаемых возбужденными атомами, и частота излучения увеличиваются в той части участка первого катодного свечения, которая расположена ближе к аноду.

Однако в дальнейшем большинство электронов приобретет энергию, большую соответствующего максимума сечения возбуждения, и свечение во втором темном пространстве несколько уменьшается. Здесь мало возбужденных атомов, поскольку мала вероятность возбуждения при таких энергиях электронов. Рекомбинация электронов и ионов также маловероятна ввиду их большой относительной скорости. Подвижность электронов значительно выше подвижности положительных ионов, поэтому в области второго катодного темного пространства преобладает положительный заряд медленно движущихся ионов.

Второе темное пространство и начало отрицательного тлеющего свечения – основные области, в которых происходит ионизация. Электроны в первой части 2-го темного пространства, в основном, накапливают энергию (это особенно справедливо для так называемого аномального тлеющего разряда, где отношение  $E/p$  у катода очень велико), а во второй его части и в начале отрицательного свечения производят ионизацию с большей вероятностью. Электроны, потерявшие энергию на ионизацию, возбуждают атомы в основном состоянии, если же их энергия невелика, то они могут довозбудить ранее возбужденные атомы. Все это приводит к интенсивному излучению атомов в отрицательном тлеющем свечении. Свечение обусловлено не только высвечиванием возбужденных атомов, но и рекомбинацией медленно движущихся электронов и положительных ионов. По мере удаления от катода скорость

электронов постепенно снижается, что уменьшает вероятность возбуждения и интенсивность свечения. Правую границу тлеющего свечения можно считать пределом, до которого долетают быстрые электроны, разогнавшиеся на участке второго катодного темного пространства.

В результате неупругих столкновений энергия электронов уменьшается настолько, что они становятся способными совершать лишь упругие столкновения, и путем диффузии переходят в фарадеево темное пространство. Диффузия носителей заряда на стенки в области фарадеева темного пространства и остова разряда вызывает уменьшение их концентрации в объеме и снижение проводимости. Поэтому вдоль всего столба разряда потенциал несколько повышается и электронный газ разогревается в электрическом поле до температур, при которых энергия электронов становится достаточной для ионизации газа в той мере, чтобы восполнять убыль зарядов на стенки. Чем больше диаметр разрядной трубки, тем меньше диффузия зарядов к стенкам и градиент потенциала вдоль столба разряда, а, следовательно, температура электронного газа. Соответственно уменьшается и интенсивность свечения газоразрядной плазмы, возбуждаемой электронными ударами. Когда столб отсутствует (при небольших расстояниях между электродами), положительные ионы для компенсации отрицательного объемного заряда электронов образуются в области анодного падения, когда же столб имеется (большие расстояния между электродами), то эта компенсация осуществляется ионами, диффундирующими в фарадеево темное пространство из начального участка столба.

В фарадеевом темном пространстве и столбе концентрации электронов и ионов приблизительно равны:  $n_e = n_+$  и  $\rho_e = \rho_+$ . Имея в виду, что  $j = \rho v'$  и  $j_e/v'_e = j_+/v'_+$ , а также то, что  $v'_e \gg v'_+$ , получаем, что  $j_e \gg j_+$ , т.е. плотность электронного тока во много раз превосходит плотность тока положительных ионов. (Известно, что для одной и той же величины  $E/p$  направленная скорость электронов, для всех газов, на два-три порядка превосходит направленную скорость ионов.)

В области давлений газов от сотен Па (несколько торр) до  $10^4$  Па (100 торр) наблюдается тлеющий разряд, при котором катодная часть разряда покрывает не всю его поверхность, а только ее часть. При этом выполняются две важные закономерности: катодное падение потенциала и плотность тока оказываются постоянными  $U_k = \text{const}$  и  $j_k = \text{const}$ . Увеличение тока разряда вызывает расширение площади катода  $S$ , покрытой областью объемного заряда и отрицательным тлеющим свечением, при снижении тока площадь уменьшается. Эта форма разряда называется *нормальным тлеющим разрядом*. Когда вся площадь катода покрывается отрицательным тлеющим свечением, разряд

переходит в форму *аномального тлеющего разряда*. Теперь за счет увеличения объемного заряда происходит изменение ширины катодной части разряда, что приводит к тому, что при увеличении тока разряда начинает увеличиваться плотность тока и катодное падение потенциала  $U_k$ . При этом катод начинает разогреваться и при определенных условиях появляется термоэмиссия, которая становится настолько значительной, что прекращается рост напряжения на приборе, и по мере роста тока напряжение понижается. Напряжение на разрядном промежутке падает до значения, при котором лавины уже не могут образовываться, токопрохождение целиком обеспечивает термоэлектронная эмиссия. Разряд переходит в термоэлектронную дугу.

Схематически вольтамперная характеристика (ВАХ) для плоскопараллельных электродов показана на рис.2. Произведение давления газа  $p$  и расстояния между электродами  $d$  взято достаточно большим, чтобы разряд не был затруднен, но, с другой стороны, настолько малым, чтобы не образовался положительный столб. Таким образом, для большинства газов это диапазон  $2 < pd < 30$  см·торр. В этом случае, в области тлеющего и дугового разряда, величина  $U$  будет мало отличаться от катодного падения.

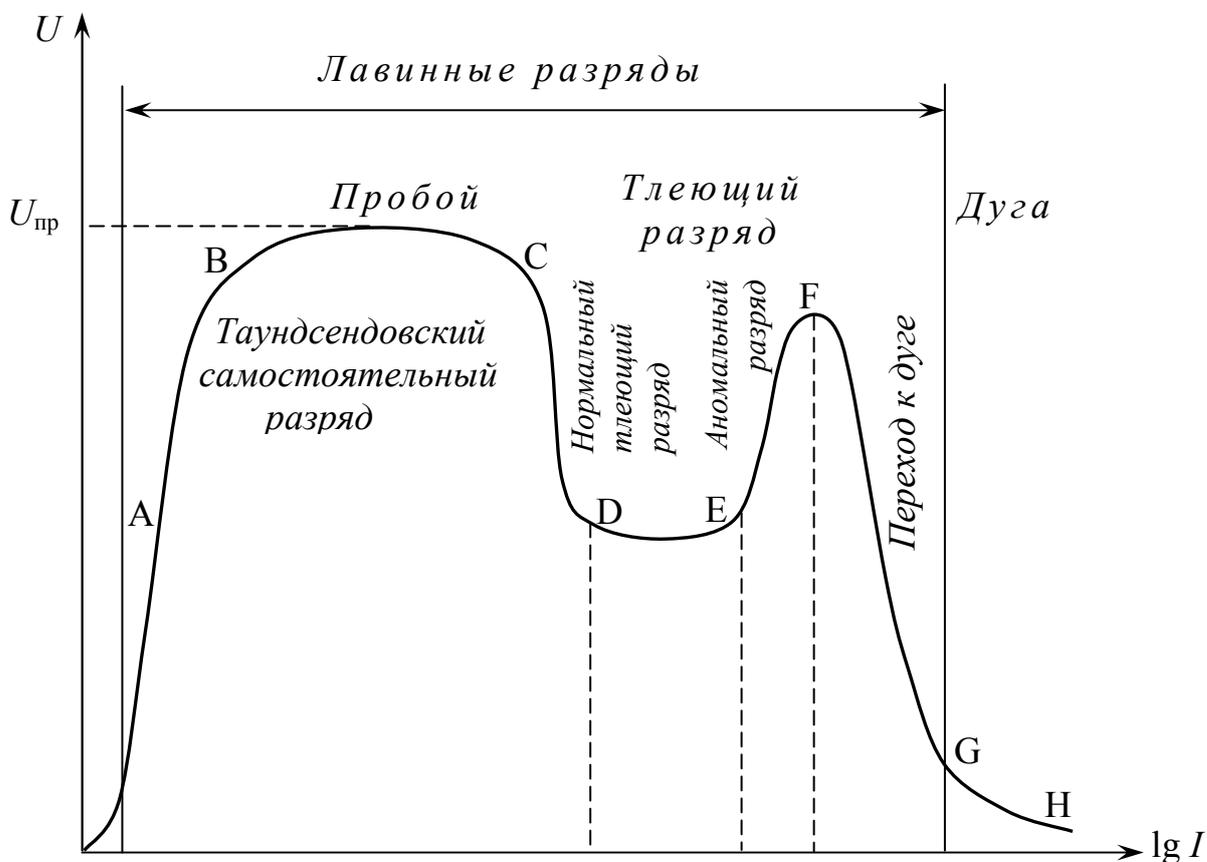


Рис. 2. ВАХ газового разряда между плоскопараллельными электродами

Для низких величин напряжения (около 10 В) газ является очень хорошим изолятором, однако между холодными электродами даже при отсутствии фото- и автоэлектронной эмиссий в газе протекает ток порядка  $10^{-18}$  А/см<sup>2</sup>, вызванный космическим излучением и радиоактивными источниками Земли. Этот ток подвержен статистическим флуктуациям (участок *A* на рис.2).

С повышением напряжения на газовом промежутке ток достигает насыщения и остаётся практически постоянным, что соответствует случаю, когда все электроны в межэлектродном пространстве достигают анода. С дальнейшим увеличением напряжения ток снова начинает возрастать в основном за счет процесса ионизации электронным ударом и образования электронных лавин, а также за счет процессов на катоде ( $\gamma$  - процессов). Этот участок также называется участком газового усиления.

Напряжение, при котором начальный ток увеличивается на 8–10 порядков (без заметного изменения этого напряжения) есть напряжение пробоя  $U_{пр}$  (участок *BC* на рис.2). Возникающий при этом электрический разряд является самостоятельным. На этом участке электрический ток в газе еще мал, заметный объемный заряд не образуется, и распределение поля в промежутке не отличается от начального. При дальнейшем увеличении тока распределение поля в промежутке становится неравномерным, что способствует росту лавин и, в свою очередь, приводит к увеличению поля в прикатодной области. Возникает известный падающий участок вольтамперной характеристики *CD*, и разряд при дальнейшем увеличении тока переходит в тлеющий.

Для тлеющего разряда характерна большая роль положительного объемного заряда у катода, при этом образуется катодное падение потенциала величиной около 100 В. Катод остается холодным и тлеющий разряд поддерживается за счет эмиссий, не связанных с нагревом катода: ионно-электронной, фотоэлектронной и эмиссии за счет возбужденных атомов газа.

Тлеющий разряд занимает диапазон плотностей токов от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  А/см<sup>2</sup>. Переход от темного разряда к тлеющему – круто падающий участок *CD* – называется поднормальным тлеющим разрядом. При малых плотностях тока образуется нормальный тлеющий разряд (*DE*, рис.2), который характеризуется постоянством катодного падения  $U_{кн}$  и плотности тока  $j_n$ . Падение напряжения при нормальном тлеющем разряде  $U_{кн}$  меньше, чем напряжение пробоя  $U_{пр}$  из-за роста как общего коэффициента  $\gamma$ , так и ионизации в катодной области в результате резкого искажения поля пространственным зарядом и приближения основной области ионизации и возбуждения атомов к катоду.

Участок  $EF$  характеристики соответствует аномальному тлеющему разряду, при котором вся поверхность катода покрыта отрицательным тлеющим свечением, и плотность тока уже не может быть постоянной. В этой области, с ростом тока, происходит перестройка объемного заряда у катода в направлении электрического поля. Эта перестройка может происходить при условии значительного роста катодного падения потенциала.

При дальнейшем увеличении тока свечение скачком стягивается в маленькое яркое пятно. Рост плотности тока и катодного падения на участке аномального тлеющего разряда сопровождается нагревом катода и появлением заметной термоэлектронной эмиссии, что приводит вначале к замедлению темпа роста катодного падения (точка  $F$ ), а затем к резкому его снижению, вплоть до величины, приблизительно равной ионизационному потенциалу газа, заполняющего промежуток (участок  $FG$ , рис.2). Образующая при этом форма разряда с падением напряжения около 10 В и плотностью тока порядка  $100 \text{ А/см}^2$  называется термической дугой ( $GH$ , рис.2). В результате интенсивной термоэлектронной эмиссии основная часть тока в газовом промежутке переносится электронами, эмитированными из катода, и отпадает необходимость в лавинном усилении тока в газе. Это и является причиной резкого снижения катодного потенциала при переходе от тлеющего разряда к дуге.

## УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с описанием работы и рекомендованной литературой по этому вопросу.

2. Объяснить методику выполнения измерений характеристик тлеющего разряда с помощью электрической схема на рис.3. Схема содержит выпрямитель, балластное сопротивление, регулируемое в пределах от 2 кОм до 15 Мом, вольтметр и прибор для измерения тока.

Следует учесть, что при большом номинале сопротивления  $R_6$  (т.е. при малом токе в цепи) сопротивление газоразрядного прибора будет сравнимо с сопротивлением вольтметра (т.е. ток, протекающий через вольтметр, будет сравним с током, протекающим через газоразрядный прибор).

3. По экспериментальным данным, после их обработки, построить полную вольтамперную характеристику газового разряда (в полулогарифмическом масштабе). Проанализировать области характеристики, определить особенности форм тлеющего разряда и объяснить происходящие процессы в газовом разряде.

4. Провести анализ полученных результатов и сделать свое заключение по выполненной работе и изучаемым явлениям.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные параметры электрических разрядов в газе.
2. Чем характеризуется тлеющий разряд?
3. Какие области тлеющего разряда являются основными?
4. Какие основные процессы на катоде поддерживают тлеющий разряд?
5. За счет чего происходит свечение в положительном столбе?
6. Объясните причину возникновения круто падающего участка  $CD$  на ВАХ газового разряда.
7. Почему на участке ВАХ, соответствующем нормальному тлеющему разряду, катодное падение потенциала остается постоянным?
8. Объясните механизм перехода тлеющего разряда в термоэлектронную дугу.
9. Для чего нужно балластное сопротивление в электрической схеме для измерения ВАХ, изображенной на рис.3?