

Газовый разряд в неоновой лампе

Бояринцева Н.А.

Можаров А.Р.

19 декабря 2023

Теоретическая часть

Газовый разряд

Плазма — четвёртое агрегатное состояние вещества, представляющее собой ионизированный газ. В классическом понимании, плазма представляет собой газ из свободных электронов (*электронный газ*) и ионов, однако, в широком смысле, плазма может состоять из любых заряженных частиц. Ввиду того, что заряженные частицы в плазме обладают подвижностью, она способна проводить электрический ток.

Газовый разряд — явление протекания электрического тока через газ. Протекание тока через газ становится возможным при ионизации газа. Газовые разряды можно классифицировать:

1. По изменения характеристик газа с течением времени
 - (1) *Стационарный* — газовый разряд, характеристики которого меняются слабо или вовсе не меняются с течением времени.
 - (2) *Нестационарный* — характеристики которого, соответственно, заметно меняются с течением времени.
2. По состоянию ионизированного газа
 - (1) *Пробой газа* — нестационарный процесс интенсивной ионизации газа под действием внешнего поля при достижении некоторой пороговой величины.
 - (2) *Неравновесная плазма* — плазма, не находящаяся в термодинамическом равновесии, т.е. температура электронного газа намного выше температуры тяжёлых частиц.
 - (3) *Равновесная плазма* (также *максвелловская плазма*) — плазма, находящаяся в термодинамическом равновесии.

Причём наиболее распространёнными являются:

1. *Коронный* — стационарный газовый разряд, наблюдающийся в резко неоднородных полях у тел с большой кривизной поверхности. Пример: *огни Святого Эльма*.
2. *Искровой* — нестационарный газовый разряд, наблюдающийся при атмосферном давлении и мощности источника, недостаточной для поддержания стационарного дугового разряда. Пример: *молния*.
3. *Дуговой* — стационарный газовый разряд, наблюдающийся при атмосферном давлении. Для стационарности разряда требуется мощности источника, достаточная для поддержания стационарного дугового разряда. В противном случае будет искровой разряд.
4. *Тлеющий* — стационарный газовый разряд, наблюдающийся при давлении, ниже атмосферного.

Рассмотрим также процесс неупругого соударения электроном с молекулами газа. Все неупругие соударения делятся на два типа:

$$\begin{array}{ll} \text{Первого рода} & \text{Второго рода} \\ e' + X = X^* + e & e' + X = X^+ + e + e \\ X^* = X + \gamma & \end{array}$$

Тип неупругого соударения зависит от энергии ударяющегося электрона e' . Если его энергия достаточна или даже превышает *энергию ионизации* молекулы, то произойдёт соударение второго рода. В противном случае произойдёт соударение первого рода.

В результате соударения первого рода, поступательная энергия движения электрона переходит во внутреннюю энергию молекулы, в результате чего молекула переходит в *возбуждённое состояние* X^* , которое заключается в переходе электронов молекулы на более высокий *энергетический уровень*.

Но в результате *спонтанного перехода*, который рано или поздно происходит ввиду того, что *любая система стремится в состояние с наименьшей потенциальной энергией*, электрон с более высокоэнергетического уровня перейдёт на уровень с меньшей энергией, испустив при этом *квант света* γ — *фотон*.

При неупругом соударении второго рода, ударяющийся электрон просто вышибет один из электронов молекулы, что приведёт к её ионизации. Неупругое соударение второго рода называется *ударной ионизацией*.

Заметим, что при неупругом соударении обоих родов выполняется *закон сохранения энергии*.

Тлеющий разряд

Тлеющий разряд — стационарный газовый разряд, зажигающийся в разреженном газе и имеющий *холодный катод* (т.е. не требуется нагревание катода для запуска процесса термоэлектронной эмиссии).

Рассмотрим внутреннюю структуру тлеющего разряда, следуя от катода к аноду, одновременно составляя качественную картину происходящего. Сначала рассмотрим картину уже зажжённого разряда.

Зона, непосредственно прилегающая к катоду, называется *астоновым пространством*. В этой зоне электроны, вылетевшие с катода, под действием внешнего поля не успели набрать достаточную энергию для возбуждения или ионизации молекул, поэтому в этой зоне нет свечения.

Далее следует *катодное свечение*. Здесь энергии электроном уже достаточно для возбуждения молекул газа, но не достаточно для ионизации. Катодное свечение может иметь несколько слоёв разных цветов.

Следом за ним следует *тёмное катодное пространство*. Здесь энергии электронов уже достаточно ионизации, соответственно, здесь и зарождается *электронная лавина*. При чём граница между катодным свечением и тёмным катодным пространством нечёткая.

Астоново пространство, катодное свечение и тёмное катодное пространство вместе образуют зону, именуемую *катодным слоем*. В тёмном катодном пространстве в результате лавинной ионизации образуются положительные ионы, которые под действием внешнего поля дружно ускоряются и выбивают из катода новые электроны. Таким образом на протяжении катодного слоя от его катодной границы и вплоть до катодной границы тёмного катодного пространства образуется положительный пространственный заряд, причём к тёмному катодному пространству заряд возрастает. В тёмном катодном пространстве при движении к его анодной границе будет преобладать отрицательный заряд.

Далее следует зона *отрицательного свечения*. Здесь лавина электронов, которые находятся в возбуждённом состоянии, переходят в основное состояние, испуская при этом лишнюю энергию в качестве квантов света. В следствии того, что сначала электроны будут испускать фотоны более высоких частот (более высоко-энергетических

уровней), в начале слоя будут наблюдаться спектральные линии более высоких энергий, в отличие от катодного свечения, где сначала наблюдаются спектральные линии более низких частот.

Далее следует *фарадеево пространство*, в котором происходит плавное возрастание поля после спада в тёмном катодном пространстве до значений *положительного столба*.

В *положительном столбе* находится газ, перешедший в состояние неравновесной плазмы, с хаотическим распределением электронов по скоростям, хотя распределение электронов по скоростям имеет смещение в виде скорости дрейфа электронов к аноду. Кроме того, до положительного столба долетает некоторое количество возбуждённых электронов из катодного слоя, что обуславливает его свечение.

Далее, вблизи анода, располагается *анодный слой*. Этому слою соответствует пространство, в котором поле анода начинает ускорять электроны, вытягивая их из положительного столба. В анодном слое выделяются две зоны — *тёмное анодное пространство*, в котором электроны начинают ускоряться полем анода, но их энергии ещё недостаточно для возбуждения молекул газа, и *анодное свечение*, где энергии ускоренных полем анода электронов уже стало достаточно для возбуждения молекул газа, в результате чего наблюдается свечение.

При зажигании заряда первичными электронами будут выступать те электроны, молекулы которых ионизировались в результате естественной ионизации. Для зажигания требуется некоторое напряжение, называемое *напряжением зажигания*. При этом гаснуть разряд будет при напряжении называемом *напряжением гашения*. Напряжение зажигания будет строго выше напряжения гашения.

В неоновой лампе катодное свечение будет жёлтого цвета, отрицательное свечение оранжевое, а положительному столбу будет соответствовать красный цвет, причём наибольшую интенсивность будет иметь отрицательно, т.е. оранжевое, свечение.

Релаксационный генератор

Рассчитаем период колебаний генератора. Уравнение цепи для токов имеет вид:

$$C \frac{dU}{dt} + I = \frac{\mathcal{E} - U}{R}$$

При постоянном напряжении на конденсаторе, сила тока в цепи определяется соотношением:

$$I_{\text{ст.}} = \frac{\mathcal{E} - U}{R}$$

Для установления стационарного режима, сопротивление

$$R_{\text{кр.}} = \frac{\mathcal{E} - U_{\text{г.}}}{I_{\text{г.}}}$$

является максимально возможным. При дальнейшем увеличении сопротивления, в системе установятся колебания.

Рассмотрим колебательный режим работы схемы. Заметим, что т.к. лампа и конденсатор соединены параллельно, то напряжения на них совпадают. (На самом деле, чтобы в момент зажигания лампы ток через лампу не превышал значений, при которых электроды лампы разрушатся, последовательно с лампой включён резистор сопротивлением 10 кОм). Если напряжение U на конденсаторе меньше напряжения на зажигании $U_{\text{з.}}$, то он начинает заряжаться. При напряжении U на конденсаторе больше или равном напряжению зажигания $U_{\text{з.}}$, конденсатор начнёт разряжаться вплоть до установления напряжения напряжения гашения $U_{\text{г.}}$.

Вычислим период колебаний T генератора. За одно колебания генератор успевает зарядиться за время $\tau_{\text{з.}}$ и разрядиться за время $\tau_{\text{р.}}$, соответственно, тогда $T = \tau_{\text{з.}} + \tau_{\text{р.}}$.

При зарядке конденсатора, т.к. лампа не проводит ток, то уравнение цепи примет вид:

$$RC \frac{dU}{dt} = \mathcal{E} - U$$

Если отсчитывать время от момента, когда на лампе напряжение равно напряжению гашения, то получаем начальное условие $U(0) = U_{\Gamma}$. Тогда решим дифференциальное уравнение с разделяемыми переменными:

$$\begin{aligned} -RC \frac{d(U - \mathcal{E})}{dt} &= U - \mathcal{E} \\ \frac{d(U - \mathcal{E})}{U - \mathcal{E}} &= -\frac{dt}{RC} \\ \ln(U(t) - \mathcal{E}) &= -\frac{t}{RC} + C_1 \\ U(t) - \mathcal{E} &= C_2 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}, \text{ где } C_2 = e^{C_1} \end{aligned}$$

Подставим начальные условия:

$$U_{\Gamma} - \mathcal{E} = C_2 \cdot e^0 = C_2$$

Тогда перенеся \mathcal{E} в правую часть и подставив значение константы интегрирования C_2 получим:

$$U(t) = \mathcal{E} - (\mathcal{E} - U_{\Gamma}) \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

По прошествии времени зажигания получим $U(\tau_{3.}) = U_{3.}$. Подставив это в уравнение получим:

$$U_{3.} = \mathcal{E} - (\mathcal{E} - U_{\Gamma}) \cdot e^{-\frac{\tau_{3.}}{RC}}$$

Преобразуем выражение:

$$\begin{aligned} U_{3.} - \mathcal{E} &= -(\mathcal{E} - U_{\Gamma}) \cdot e^{-\frac{\tau_{3.}}{RC}} \\ \frac{\mathcal{E} - U_{3.}}{\mathcal{E} - U_{\Gamma}} &= e^{-\frac{\tau_{3.}}{RC}} \\ -\frac{\tau_{3.}}{RC} &= \ln\left(\frac{\mathcal{E} - U_{3.}}{\mathcal{E} - U_{\Gamma}}\right) \\ \frac{\tau_{3.}}{RC} &= \ln\left(\left(\frac{\mathcal{E} - U_{3.}}{\mathcal{E} - U_{\Gamma}}\right)^{-1}\right) \end{aligned}$$

Тогда время зарядки $\tau_{3.}$:

$$\tau_{3.} = RC \cdot \ln\left(\frac{\mathcal{E} - U_{\Gamma}}{\mathcal{E} - U_{3.}}\right)$$

Найдём теперь время разрядки $\tau_{p.}$. Рассмотрим приближение, при котором вольт-амперная характеристика лампы представляет собой линейную зависимость тока от напряжения:

$$I(U) = k \cdot U + b = \frac{U - U_0}{R_0}$$

Тогда уравнение цепи примет вид:

$$C \frac{dU}{dt} + \frac{U - U_0}{R_0} = \frac{\mathcal{E} - U}{R}$$

Пусть:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_0} \quad \rho = \frac{RR_0}{R + R_0}$$

Тогда уравнение цепи примет вид:

$$C\rho \frac{dU}{dt} + U = \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{U_0}{R_0} \right)$$

Будем теперь отсчитывать время от момента максимальной зарядки конденсатора. Тогда получим начальное условие $U(0) = U_{з.}$. Решив ещё одно уравнение с разделяющимися переменными, получим:

$$U(t) = \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{U_0}{R_0} \right) + \left(U_{з.} - \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{U_0}{R_0} \right) \right) \cdot e^{-\frac{t}{C\rho}}$$

После прошествии времени разрядки конденсатора получим $U(\tau_{р.}) = U_{г.}$, тогда:

$$U_{г.} = \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{U_0}{R_0} \right) + \left(U_{з.} - \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{U_0}{R_0} \right) \right) \cdot e^{-\frac{\tau_{р.}}{C\rho}}$$

Тогда получим время разрядки $\tau_{р.}$:

$$\tau_{р.} = C\rho \cdot \ln \left(\frac{(U_{з.} - U_0)R + (U_{з.} - \mathcal{E})R_0}{(U_{г.} - U_0)R + (U_{г.} - \mathcal{E})R_0} \right)$$

Однако в данной работе последовательно к лампе включён резистор сопротивлением $R_{з.} = 3,3$ кОм. Он нужен для того, чтобы в момент зажигания разряда ток не достигал значений, при которых электроды лампы разрушаются. Однако заметим, что в таком случае вольт-амперная характеристика лампы будет выглядеть несколько иначе, чем указано выше, в результате чего требуется подкорректировать все те формулы, которые были получены с использованием вольт-амперной характеристики лампы.

Вольт-амперная характеристика лампы будет преобразуется в:

$$I(U) = \frac{U - U_0}{R_0 + R_{з.}}$$

Замена ρ примет вид:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_0 + R_{з.}} \quad \rho = \frac{R(R_0 + R_{з.})}{R + R_0 + R_{з.}}$$

Решением второго ДУ станет функция:

$$U(t) = \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{U_0}{R_0 + R_{з.}} \right) + \left(U_{з.} - \rho \left(\frac{\mathcal{E}}{R} + \frac{U_0}{R_0 + R_{з.}} \right) \right) \cdot e^{-\frac{t}{C\rho}}$$

А время разрядки $\tau_{р.}$ будет вычисляться как:

$$\tau_{р.} = C\rho \cdot \ln \left(\frac{(U_{з.} - U_0)R + (U_{з.} - \mathcal{E})(R_0 + R_{з.})}{(U_{г.} - U_0)R + (U_{г.} - \mathcal{E})(R_0 + R_{з.})} \right)$$

Практическая часть

1. Снята ВАХ неоновой лампы.
2. Дополнительно проведено определение напряжения зажигания $U_{з.}$ и напряжения гашения $U_{г.}$ тлеющего разряда в неоновой лампе.
3. ВАХ неоновой лампы аппроксимирована линейной зависимостью с помощью метода наименьших квадратов.

$$I(U) = k \cdot U + b = \frac{U - U_0}{R_0} \quad k = \frac{1}{R_0} \quad b = \frac{U_0}{R_0}$$

$$k = 0,00020442 \text{ Ом}^{-1} \quad b = -0,023238 \text{ А}$$

$$R_0 = \frac{1}{k} \quad U_0 = -\frac{b}{k}$$

$$R_0 = 4892 \text{ Ом} \quad U_0 = 113 \text{ В}$$

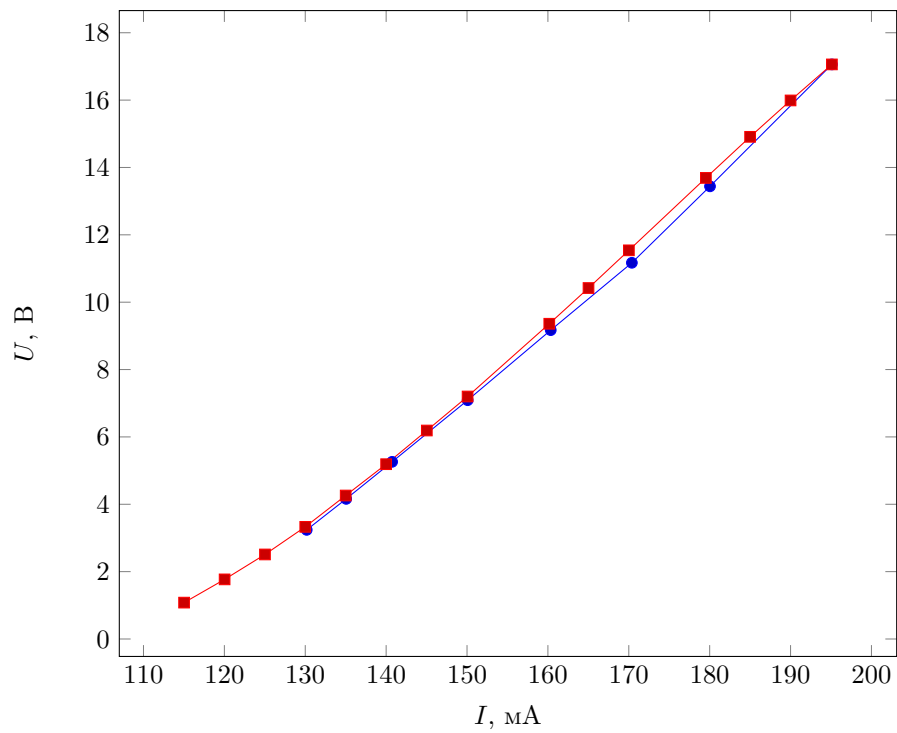


Рис. 1: ВАХ неоновой лампы

$U_{з.}, \text{ В}$	$U_{з.ср.}, \text{ В}$	$U_{г.}, \text{ В}$	$U_{г.ср.}, \text{ В}$
128	128,357	111,83	112,61
129,87		112,91	
127,2		113,09	

Таблица 1: Напряжение зажигания и напряжение гашения

4. Построена теоретическая и практическая зависимости $T(C)$ на рис. 2.
5. Построена теоретическая и практическая зависимости $T(R)$ на рис. 3.
6. Построена теоретическая и практическая зависимости $T(\mathcal{E})$ на рис. 4.

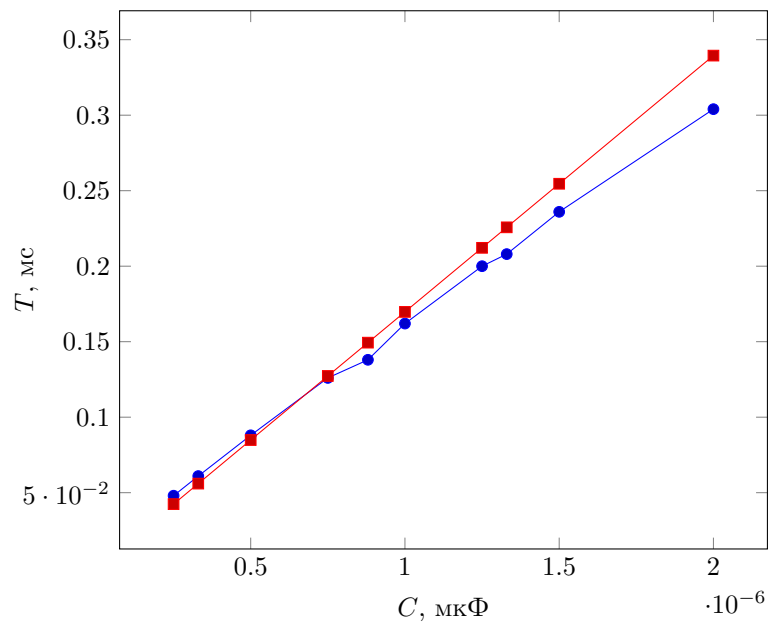


Рис. 2: Зависимость $T(C)$

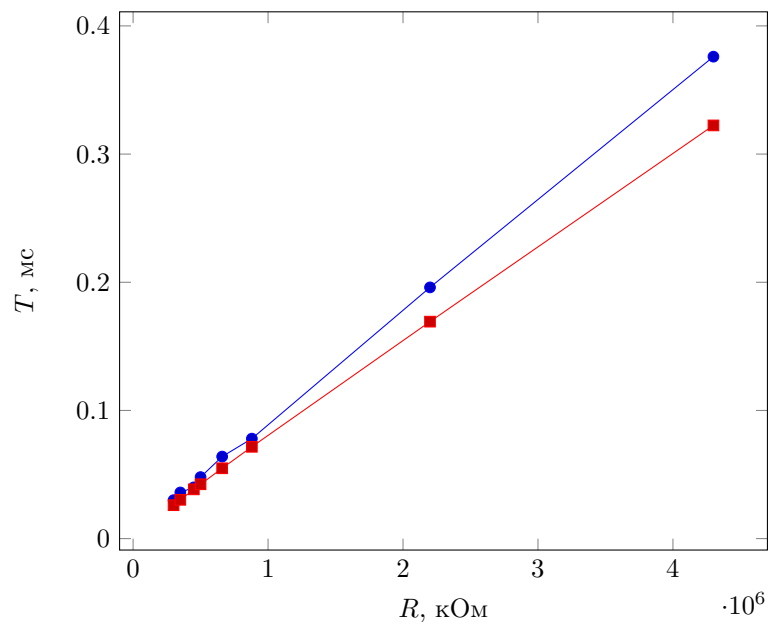


Рис. 3: Зависимость $T(R)$

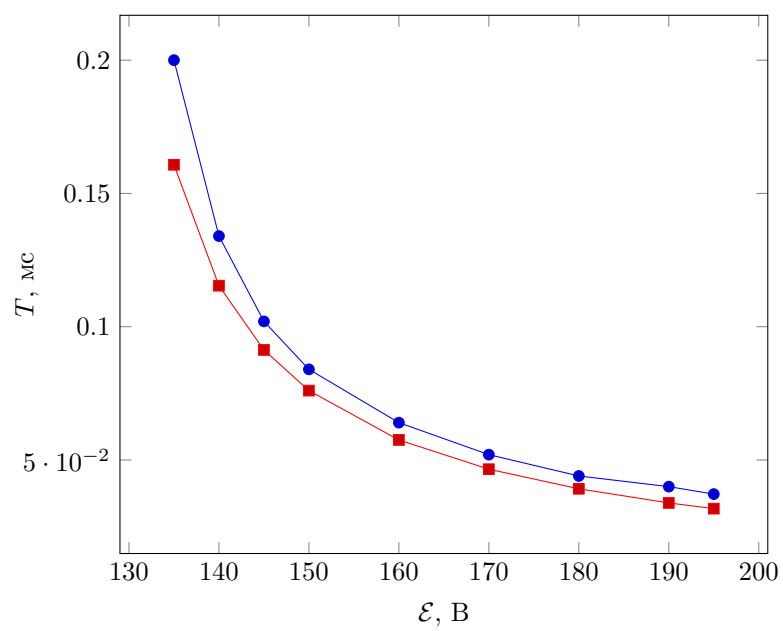


Рис. 4: Зависимость $T(\mathcal{E})$