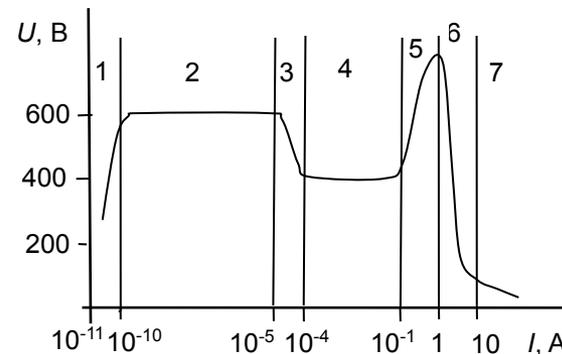


Лекция 5

ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД

Тлеющий разряд имеет свои принципиальные особенности по сравнению с другими видами газовых разрядов. Ввиду этого, рассмотрим сравнительную вольтамперную характеристику основных газовых разрядов (рис.1). Для получения данной экспериментальной зависимости использовался разряд в неоне при давлении 1 торр с медными электродами: расстояние между электродами 50 см, площадь поверхности электрода 10 см^2 . Наиболее слаботорочная область (1) соответствует несамостоятельному разряду, когда для зажигания разряда требуется внешний ионизатор (УФ -излучение, электронный пучок и т.д.).

Рис.1

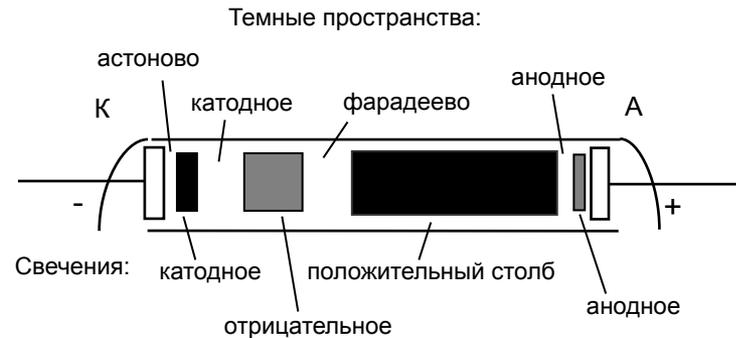


Следующая область (2) принадлежит таунсендовскому самостоятельному разряду, в котором существуют механизм ионизации электронным ударом и процесс ион -электронной эмиссии на катоде. Заметим, что таунсендовский разряд не обладает свечением, т.е. считается темновым разрядом. При увеличении тока в области (3) таунсендовский разряд постепенно переходит в тлеющий разряд, что сопровождается падением напряжения на разряде. Область (4) соответствует нормальному тлеющему разряду, в котором разряд характеризуют светящиеся области, и процессы свойственные тлеющему разряду. Дальнейший рост тока в области (5) приводит к аномальному тлеющему разряду, в котором возникает нагрев катода и появление термоэмиссии, присущей дуговому разряду. В последующей области (6) напряжение на разряде резко уменьшается и разряд окончательно переходит в дуговую (7), который характеризует небольшое напряжение и дальнейший рост силы тока.

Исследования тлеющего разряда, начатые в начале XIX века Фарадеем, были затем продолжены многими известными учеными. Модифицированный тлеющий разряд при уменьшении давления использовался затем в конце XIX века Рентгеном в его знаменитых экспериментах с катодными лучами.

Традиционно тлеющие разряды создавались в стеклянных трубках на остаточном воздухе, либо при газовом заполнении при пониженном давлении (10^{-2} - 10^2 торр) (рис.2). Наибольшей светимостью, как правило, обладает положительный столб, который в зависимости от газа принимает различную окраску. Так, например, для воздуха цветовые тона фиолетово-розовые, для гелия – зеленые, для аргона и ртути – голубые, для неона – оранжево-желтые и т.д.

Рис.2



Свечение тлеющего разряда связано с наличием определенных областей, которым свойственны характерные процессы (рис.2). Ближайшим к катоду находится катодное свечение, которое в некоторых тлеющих разрядах обладает достаточной яркостью за счет процессов ионизации электронным ударом.

Следующее за ним отрицательное свечение обычно более слабое по интенсивности и присутствует не у всех разрядов. Яркий для газоразрядных стеклянных трубок положительный столб обладает наибольшими размерами. Положительный столб характеризуется дрейфом заряженных частиц в электрическом поле и процессами их диффузии. Анодное свечение, как правило, слабое и наблюдается редко. Области свечения разделяются темными пространствами (рис.2), в которых возбуждение и ионизация частиц незначительная.

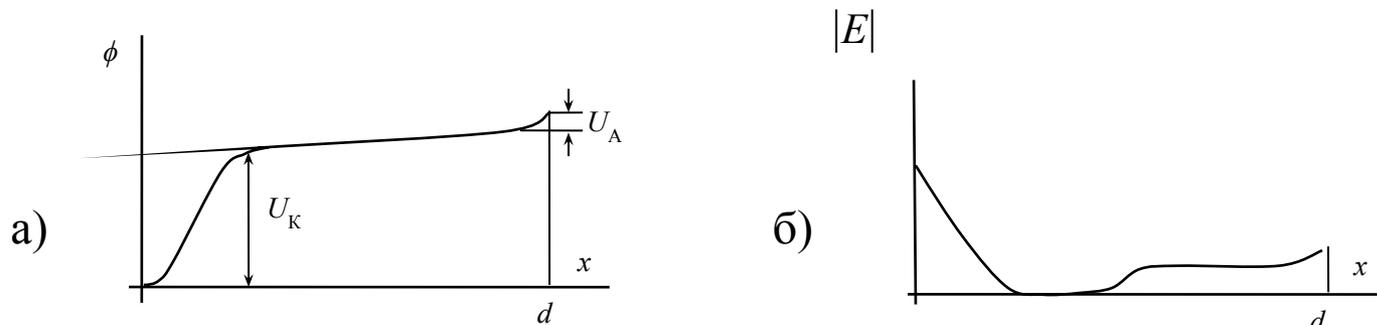


Рис.3

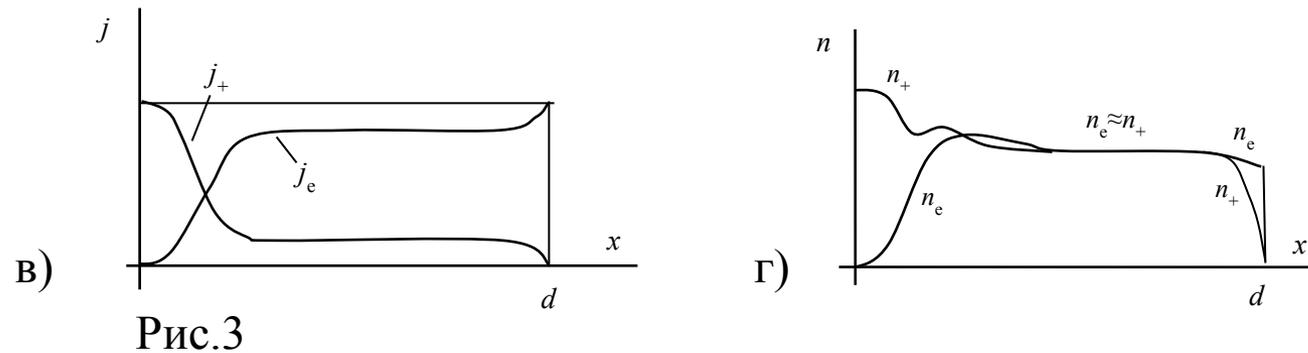


Рис.3

Рассмотрим характерные зависимости потенциала, напряженности электрического поля, плотности тока и концентрации заряженных частиц тлеющего разряда (рис.3). Зависимость для потенциала содержит характерный подъем в области катодного слоя с последующим медленным ростом в области положительного столба (рис.3а). Катодное падение потенциала U_K составляет около $2/3$ всего приложенного напряжения к разряду и значительно превышает анодное U_A . Максимальная напряженность электрического поля (рис.3б) соответственно существует также в области катодного слоя.

Плотности электронного и ионного токов достигают максимумов соответственно на аноде и на катоде соответственно (рис.3в). Электронная и ионная концентрации имеют сложные зависимости и приблизительно одинаковы в области положительного столба (рис.3г).

Рассмотрим теоретическое описание процессов области близлежащей к катоду – катодного слоя. Данную область характеризуют сильный рост потенциала и соответственно высокие значения напряженности электрического поля (рис.3 а,б). В катодном слое доминирующими считаются процессы ионизации и дрейфового движения в электрическом поле. Процессами диффузии и рекомбинации обычно пренебрегают, т.е. считают их незначительными. Выражения для плотностей токов представляются в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dj_e}{dx} &= \alpha j_e & j_e &= -en_e u_e & \alpha &= const \\ \frac{dj_+}{dx} &= -\alpha j_e & j_+ &= en_+ u_+ \\ j &= j_e + j_+ \end{aligned}$$

Граничные условия для значений плотностей токов на катоде и аноде записываются следующим образом:

$$j_e^k = \gamma j_+^k = \frac{\gamma}{1+\gamma} j$$

$$j_+^a = 0$$

$$j_e^a = j$$

Поэтому выражения переписываются в форме:

$$j_e = \frac{\gamma}{1+\gamma} j e^{\alpha x}$$

$$j_+ = j \left(1 - \frac{\gamma}{1+\gamma} e^{\alpha x} \right)$$

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$$

В результате плотности электронного и ионного токов имеют вид:

$$j_e = j e^{-\alpha(d-x)}$$

$$j_+ = j \left(1 - e^{-\alpha(d-x)} \right)$$

Полученные формулы передают характерные моменты экспериментальных зависимостей изображенных на рис.3 а,б.

Рассмотрим вывод выражения для напряженности электрического поля в катодном слое с учетом пространственных зарядов. Уравнение Пуассона в одномерном случае записывается с учетом зависимостей для концентраций заряженных частиц (рис.3г) следующим образом:

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi e(n_+ - n_e) \approx 4\pi en_+ \quad n_+ \gg n_e \quad n_+ = \frac{j}{eu_+} = \frac{j}{e\mu_+ E}$$

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi \frac{j}{\mu_+ E}$$

После интегрирования последнего уравнения получается следующее выражение для напряженности электрического поля:

$$E(x) = E_\kappa \sqrt{1 - \frac{x}{l}} \quad l = \frac{\mu_+ E_\kappa^2}{4\pi j}$$

Полученная формула передает основную тенденцию зависимости (рис.3б), которая содержит резкий спад в области катодного слоя.

К неустойчивостям тлеющего разряда следует отнести: 1) ионизационно-перегревную неустойчивость, 2) контракцию (шнурование) разряда, 3) страты. Ионизационно-перегревная неустойчивость наблюдается в некоторых видах сильноточных тлеющих разрядов. Контракция (шнурование) разряда имеет место также при достаточно сильных для тлеющих разрядов токах. При контракции происходит сжатие или уменьшение диаметра плазменного шнура аналогичное пинч-эффекту.

При определенных условиях положительный столб тлеющего разряда разделяется на светящиеся полосы, разделенные темными промежутками, т.е. происходит образование страт. Экспериментально было установлено, что для страт выполняются следующие соотношения:

$$1) \quad l_0 p^m = \text{const}$$

$$2) \quad l_0 = Cr^{1-m} p^{-m}$$

$$3) \quad l_0 \approx B^{-1}$$

Где l_0 -расстояние между соседними стратами, p -газовое давление, r -радиус плазменного столба, B -внешнее магнитное давление. Расстояние между соседними стратами (l_0) при этом остается неизменным. Для объяснения образования страт были предложены теории, учитывающие ступенчатый характер ионизации газа положительного столба электронами.