

Лекция 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗЕ

Одной из первых теорий газовых разрядов явилась теория Таунсенда. Данный вид разряда, названный его именем – таунсендовский имеет очень слабый ток $I=10^{-10}$ - 10^{-5} А и практически не имеет видимого свечения (темновой разряд). При увеличении силы тока до 10^{-4} А разряд постепенно переходит в тлеющий, который обладает достаточно интенсивным свечением. Наиболее известным применением таунсендовского разряда явился созданный в начале XX века счетчик Гейгера (радиоактивных излучений).

Для описания таунсендовского разряда требуется понимание процессов, происходящих в электронных лавинах в газе. Первоначальные наблюдения электронных лавин в газе были выполнены с помощью камеры Вильсона. Для электронной концентрации в лавине можно записать следующие уравнения.

$$\frac{dn_e}{dt} = \nu_i n_e$$

ν (с^{-1}) - частота ионизации – число ионизаций атомов электронами (в среднем) в 1 с.

После интегрирования находится следующая экспоненциальная зависимость:

$$n_e = n_0 e^{\nu_i t}$$

Для связи длины свободного пробега λ_i , частоты ионизации ν_i и скорости дрейфа u_d справедлива следующая формула:

$$\lambda_i = \frac{u_d}{\nu_i}$$

Пространственная зависимость для концентрации в одномерном случае представляется следующим уравнением:

$$\frac{dn_e}{dx} = \alpha n_e$$

В данное уравнение входит так называемый первый ионизационный коэффициент Таунсенда (см^{-1}) - число ионизаций на расстоянии в 1 см.

Интегрирование уравнения дает следующую экспоненциальную зависимость:

$$n_e = n_0 e^{\alpha x}$$

Первый коэффициент Таунсенда связан с частотой ионизации и дрейфовой скоростью электронов с помощью следующего уравнения:

$$\alpha = \frac{V_i}{u_0}$$

При создании теории Таунсендом (1910 г.) были сделаны следующие исходные предположения относительно характерных особенностей данного разряда:

- 1) Сила тока считается малой и искажением электрического поля ввиду наличия пространственных зарядов можно пренебречь.
- 2) Имеют место ионизация газа соударениями электронов и развитие электронных лавин.
- 3) Разряд может быть несамостоятельным и самостоятельным.
- 4) Таунсендовский разряд переходит в тлеющий, а затем в дуговой (при увеличении тока).

В теории вводятся следующие коэффициенты:

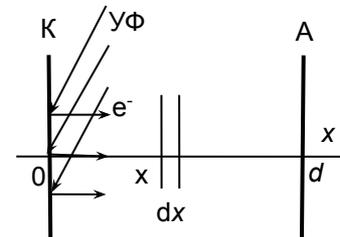
α (см^{-1}) – первый ионизационный коэффициент Таунсенда, т.е. число электрон-ионных пар, образованных одним электроном на пути в 1 см в направлении от катода к аноду вследствие неупругих столкновений электронов с нейтральными частицами газа;

β (см^{-1}) – аналогичный коэффициент для ионов, т.е. число свободных электронов, образованных положительным ионом на пути в 1 см при движении от анода к катоду;

γ - количество электронов (в среднем) выделяющихся с катода при попадании на него одного иона вследствие ион-электронной эмиссии.

При построении теории предполагалось наличие внешнего ионизатора (источника ультрафиолетового излучения), с помощью которого происходило облучение поверхности катода (рис.1)

Рис.1



Были введены следующие исходные величины:

n_0 (част/см²·с) - число электронов, выделяющихся с 1 см² поверхности катода в 1 с,

$i_0 = en_0$ (А/см²) - плотность электронного тока с катода.

В простейшем варианте теории ионизация ионами не учитывается, т.е. полагается $\beta \ll \alpha$.

$$dn = n\alpha \cdot dx$$

при $x = 0$, $n = n_0$ и $\alpha = const$ при $E = const$

Интегрирование данного уравнения дает экспоненциальную зависимость для концентрации электронов и плотности тока:

$$n = n_0 e^{\alpha x}$$

$$i = i_0 e^{\alpha x}$$

Для числа электронов, достигших анода записывается выражение:

$$n_0 e^{\alpha d}$$

Число ионизаций или число образовавшихся ионов имеет вид:

$$n_0 e^{ad} - n_0 = n_0 (e^{ad} - 1)$$

Для рассмотрения стационарного режима разряда все пространство от катода до анода образно разбивается на участки длиной равной длине ионизации электронами - λ_i . Предполагается, что имеет место образование электронных лавин на расстоянии равном λ_i . В стационарном режиме считается, что число электронов в последующей лавине равно числу электронов, участвующих в развитии предыдущей лавины.

Вводятся следующие обозначения:

n_1 - общее число электронов, вылетевших с катода в 1 с при стационарном режиме.

Выражение для n_1 в стационарном режиме разряда может быть записано в виде:

$$n_1 = n_0 + n_1 \gamma (e^{ad} - 1)$$

$$n_1 = n_0 + n_1 \gamma (e^{ad} - 1) \quad - \text{число образовавшихся ионов}$$

$$\gamma n_1 (e^{ad} - 1) \quad - \text{число выбитых электронов с катода ионами}$$

Для числа электронов, достигших анода можно записать следующее выражение:

$$n_a = n_1 e^{ad} \quad , \quad \text{где} \quad n_1 = \frac{n_0}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)}$$

В результате концентрация электронов и плотность тока на аноде записываются в виде:

$$n_a = \frac{n_0 e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)}$$

$$i = i_0 \frac{e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)}$$

Предполагается, что эмиссия ионов с поверхности анода под действием электронов пренебрежимо мала. В данной теории изначально предполагалось действие внешнего ионизатора (источника УФ-излучения), создающего вблизи катода исходную концентрацию заряженных частиц n_0 . В данном случае разряд считается несамостоятельным.

Для перехода разряда из несамостоятельного в самостоятельный требуется выполнение, согласно Таунсенду, условия равенства нулю знаменателя в формуле для плотности тока:

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

Эта выражение обычно считается условием зажигания таунсендовского разряда.

В качестве одной из характеристик разряда вводится также величина:

$\eta = \frac{\alpha}{F}$ (В⁻¹) - ионизационная способность – число пар ионов, которое в среднем рождает электрон, проходя в однородном поле разность потенциалов в 1 В.

Также можно построить величину, обратную к ионизационной способности:

η^{-1} - количество эВ, которое в среднем затрачивается на образование пары ионов,

(эВ) - константа Столетова, т.е. максимальное значение величины η^{-1} .

$$\eta_{\max}^{-1}$$

Приведем примеры констант Столетова для некоторых газов:

воздух: $\eta_{\max}^{-1} \approx 66$ эВ ($E/p \approx 365$ В/см · торр)

гелий: $\eta_{\max}^{-1} \approx 83$ эВ ($E/p \approx 50$ В/см · торр),

водород: $\eta_{\max}^{-1} \approx 70$ эВ ($E/p \approx 140$ В/см · торр)

Рассмотрим вопрос, связанный с потенциалом зажигания таунсендовского разряда. Для первого коэффициента ионизации Таунсендом была выведена полуэмпирическая формула, учитывающая зависимость данной величины от давления газа и напряжения электрического поля в виде:

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{Bp}{E}}$$

Где A и B являются постоянными коэффициентами, определенными для каждого конкретного газа в диапазоне значений E/p . Приведем примеры для значений данных коэффициентов: воздух $A \approx 15$ (см · торр) $^{-1}$, $B \approx 365$ (В/см · торр), при $E/p \approx 100-800$ (В/см · торр); гелий $A \approx 3$ (см · торр) $^{-1}$, $B \approx 34$ (В/см · торр), при $E/p \approx 20-150$ (В/см · торр).

Для вывода условия зажигания используется также условие стационарности таунсендовского разряда:

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

В результате потенциал зажигания разряда выражается в виде:

$$U_3 = \frac{Bpd}{\ln pd + C} \quad C = \ln \frac{A}{\ln(1 + \frac{1}{\gamma})}$$

Экспериментальные кривые для потенциала зажигания таунсендовского разряда впервые были измерены Пашеном. Представим зависимости, полученные для различных газов (рис.2).

Данные кривые хорошо согласуются с формулой, выведенной для U_3 . Для значений в минимуме получают следующие выражения:

$$(pd)_{\min} = \frac{e}{A} \ln(1 + \frac{1}{\gamma}) \quad (\frac{E}{p})_{\min} = B$$
$$U_{\min} = \frac{eB}{A} \ln(1 + \frac{1}{\gamma})$$

Так, например, для воздуха при $A \approx 15 \text{ (см} \cdot \text{торр)}^{-1}$, $B \approx 365 \text{ В/см} \cdot \text{торр}$, $\gamma = 10^{-2}$, $C = 1,18$:

$$(pd)_{\min} = 0,83 \text{ торр} \cdot \text{см}, \quad (E/p)_{\min} = 365 \text{ В/см} \cdot \text{торр}, \quad U_{\min} \approx 300 \text{ В}.$$

Значения E/p в минимумах данных кривых Пашена соответствуют точке Столетова, где ионизационная способность электрона максимальна и равна:

$$\eta = \frac{\alpha}{E} = \frac{A}{Be}$$

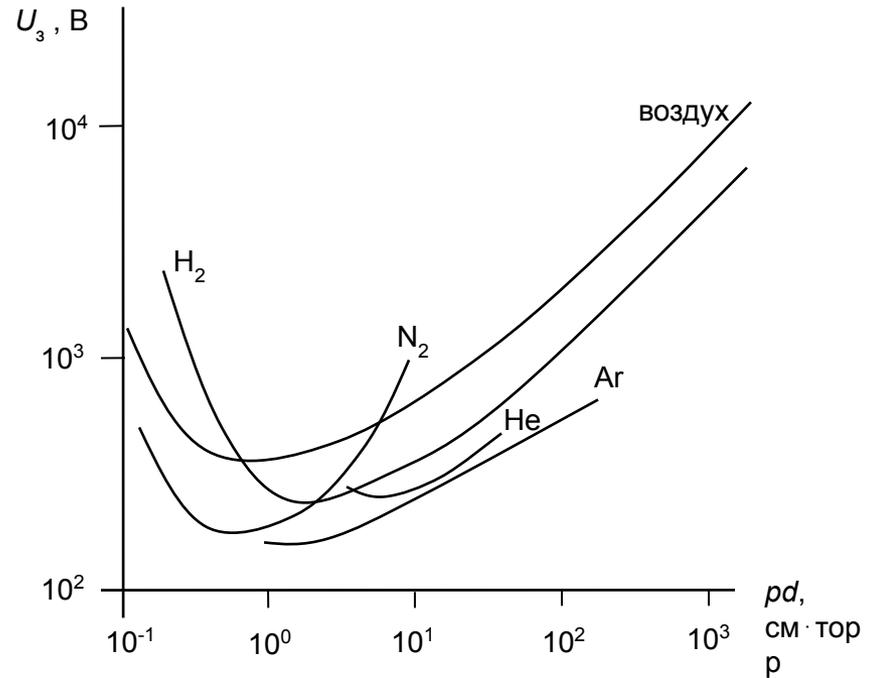


Рис.2