

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ПРОТЯЖЕННОМ ДИОДЕ

1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ

М. К. Дятлов, Ю. Н. Куликов, Е. П. Остапченко и В. А. Степанов

В плоском протяженном диоде в неоне и криптона измерено распределение электронов по энергиям. Обнаружено существование группы быстрых электронов с монокинетичностью 2—3 эв. Показано, что энергия и число быстрых электронов зависят от анодного напряжения. Приведено решение кинетического уравнения для плоского диода. Сравниваются экспериментальные результаты с теоретическими. Установлено, что уменьшение числа быстрых электронов при увеличении их энергии происходит вследствие неупругих столкновений электронов с атомами газа.

В связи с созданием сред с отрицательным поглощением, использующих прикатодную область разряда [1], представляют значительный интерес исследования распределения электронов по энергиям и процессов возбуждения уровней в этом типе разряда.

Методика эксперимента

Разрядная трубка (рис. 1) представляла собой стеклянную колбу, в которую монтировались протяженные плоские оксидный катод и молибденовый анод длиной 10 и шириной 1 см. Расстояние между электродами 4 мм. Через отверстия, имеющиеся в аноде, в область разряда вводились подвижные плоские зонды (плоскость зондов бралась параллельной и перпендикулярной катоду) с сечением 0,3 мм². Использование подвижных зондов позволило измерять распределение электронов по энергиям на различных расстояниях от катода.

Измерение распределения электронов по энергиям проводилось на установке, описанной в [2]. Давление неона 4 мм рт. ст., криптона — 0,5 мм рт. ст. и плотность тока 20 ма/см² поддерживались неизменными. Анодное напряжение изменялось от 12 до 30 в.

При использованных в эксперименте давлениях газов, токе разряда и выбранном интервале напряжений наблюдалось равномерное горение разряда по всей длине электродов.

Измерение тока параллельным (I_{\parallel}) и перпендикулярным (I_{\perp}) поверхности катода зондами позволило установить, что на расстоянии 1 мм от

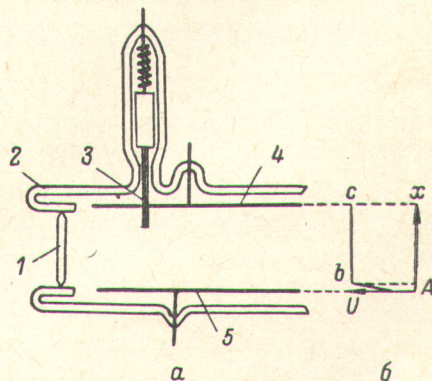


Рис. 1. Схема трубки (а) и ход потенциала в разрядном промежутке (б).

1 — выходное окно; 2 — стеклянная колба; 3 — подвижный плоский зонд; 4 — анод; 5 — оксидный катод.

катода $i_{z_{\parallel}} = 1.2i_{z_{\perp}}$, а на расстоянии 1.5 мм $i_{z_{\parallel}} = i_{z_{\perp}}$. Следовательно, начиная с точки, удаленной на 1.5 мм от катода, направленной составляющей электронов при измерении вторых производных зондового тока по потенциалу зонда можно пренебречь. Измерения распределения электронов по энергиям в связи с этим проводились на расстояниях не ближе 1.5 мм от катода.

Результаты эксперимента

Результаты измерений распределения электронов по энергиям в зависимости от анодного напряжения представлены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 и 3 видно, что распределение электронов по энергиям состоит из группы медленных и группы быстрых электронов. Энергия медленных электронов при изменении условий разряда остается примерно постоянной; энергия быстрых электронов возрастает с увеличением анодного на-

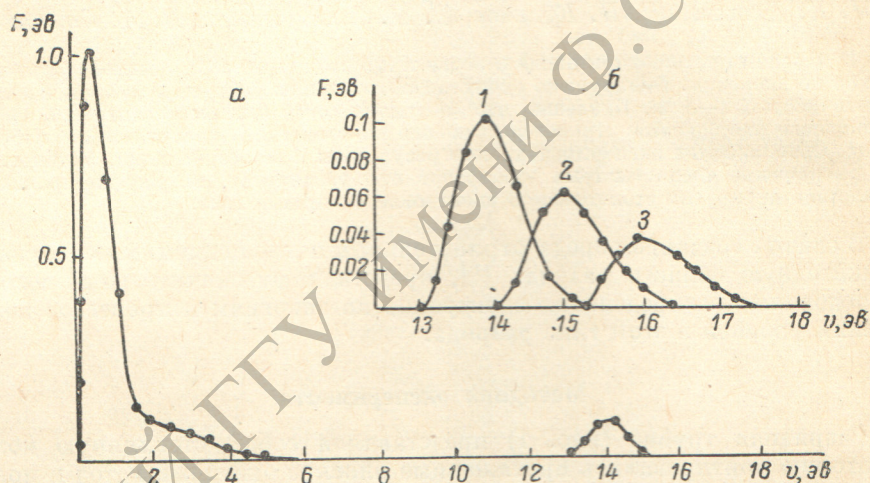


Рис. 2. Распределение электронов по энергиям в протяженном плоском диоде. Давление криптона 0.5 мм рт. ст. Расстояние зонд—катод 2 мм. *a* — анодное напряжение 14 в; *б* — группа быстрых электронов при разных анодных напряжениях (в вольтах): 1 — 14; 2 — 15; 3 — 16.

пряжения. Зависимость энергии быстрых электронов от анодного напряжения можно выразить формулой

$$\epsilon = (U_a + U_0) e, \quad (1)$$

где ϵ — энергия быстрых электронов; U_a — анодное напряжение; U_0 — небольшое добавочное напряжение ($\sim 1-2$ в), величина которого определяется анодным падением напряжения и контактной разностью потенциалов; e — заряд электрона.

При увеличении анодного напряжения число быстрых электронов начинает уменьшаться, а группа медленных электронов деформируется с образованием протяженного плато. Вероятно, при увеличении анодного напряжения до нескольких сотен вольт это плато увеличится и распределение электронов по энергиям будет иметь вид, аналогичный распределению электронов по энергиям в полом катоде [3].

Измерение распределения электронов по энергиям на различных расстояниях от катода показали, что вид распределения электронов не изменяется, меняется лишь соотношение чисел быстрых и медленных электронов. При увеличении расстояния до катода концентрация быстрых электронов уменьшается, а медленных имеет пологий максимум при расстоянии 1.8–2 мм от катода.

Для выяснения причины уменьшения числа быстрых электронов при увеличении анодного напряжения и расстояния катод—анод в области b — c решим уравнение баланса для числа частиц, следующее из кинетического уравнения.

Уравнение баланса в общем случае имеет вид [4]

$$\frac{dn}{dt} + \text{div}(n\bar{u}) - I + R = 0, \quad (2)$$

где n — концентрация быстрых электронов; \bar{u} — скорость переноса частиц; I и R — приращение и потеря числа частиц в единице объема в единицу времени соответственно.

Рассмотрим одномерный случай: катод и анод — бесконечные плоскопараллельные электроды.

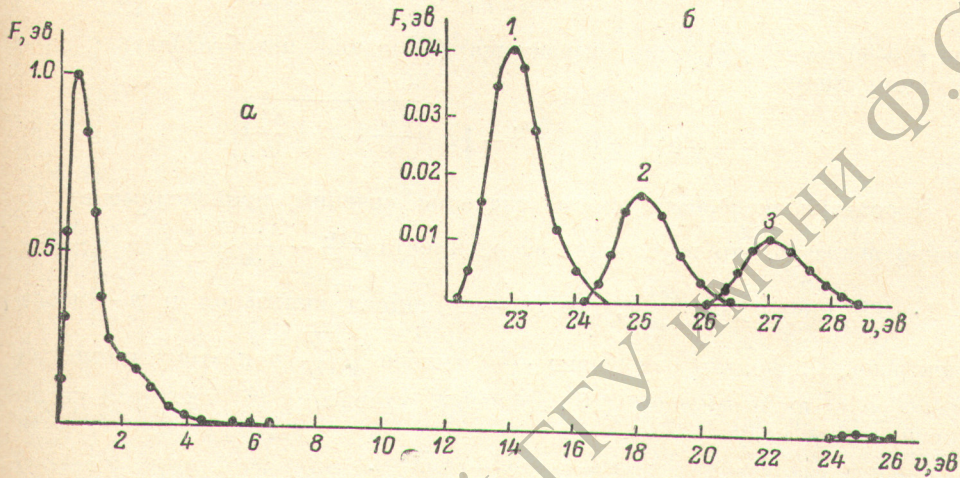


Рис. 3. Распределение электронов по энергиям в протяженном плоском диоде. Давление неона 4 мм рт. ст. Расстояние зонд—катод 2 мм. a — анодное напряжение 25 в, b — группа быстрых электронов при разных анодных напряжениях (в вольтах): 1 — 23, 2 — 25, 3 — 27.

Примем форму распределения потенциала между катодом и анодом следующей:

$$U = \frac{U_0}{\Delta x} x \text{ при } \Delta x < x < 0 \text{ и } U = U_a \text{ при } x \geq 0 \quad (3)$$

(Δx — область катодного падения).

Будем считать быстрые электроны частицами одной энергии.² Пренебрегая рекомбинациями и ударами второго рода, можно записать

$$I = 0, \quad R = n_a n S^* v, \quad (4)$$

где n_a — концентрация нейтральных атомов газа; v — скорость быстрых электронов; S^* — сечение неупругих столкновений.

Так как вид распределения электронов не зависит от координат в условиях эксперимента, можно записать [5]

$$n\bar{u} = -D \frac{dn}{dx} + n\bar{u}_{др}, \quad (5)$$

где D — коэффициент диффузии; $\bar{u}_{др}$ — дрейфовая скорость быстрых электронов.

¹ В настоящей работе экспериментально получено, что область катодного падения много меньше расстояния катод—анод и напряженность поля E близка к нулю.

² Монокинетичность группы быстрых электронов, как показано на рис. 3, не превышает 2—3 эв.

С учетом стационарности задачи уравнение баланса запишется в виде

$$\frac{d^2n}{dx^2} - \frac{\bar{u}_{др.}}{D} \frac{dn}{dx} + \frac{n_a v S^*}{D} n = 0. \quad (6)$$

Решением этого уравнения при граничных условиях

$$n|_{x=0} = n_0 \text{ и } n|_{x \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (7)$$

будет выражение

$$n = n_0 \exp \left[x \frac{\bar{u}_{др.} - \sqrt{\bar{u}_{др.}^2 + 4n_a v S^* D}}{2D} \right]. \quad (8)$$

Пользуясь известным соотношением [6]

$$D = \frac{1}{3} \frac{v}{n_a Q}, \quad (9)$$

где Q — сечение диффузии, выражение (8) можно преобразовать к следующему виду:

$$n = n_0 \exp \left\{ \frac{3}{2} n_a Q x \left[\frac{\bar{u}_{др.}}{v} - \sqrt{\left(\frac{\bar{u}_{др.}}{v} \right)^2 + \frac{4}{3} \frac{S^*}{Q}} \right] \right\}. \quad (10)$$

Используя экспериментальные значения сечений, приведенные в [4-7], можно показать, что в условиях эксперимента $\frac{\bar{u}_{др.}}{v} \sim \frac{3 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^2} \sim 10^{-2}$ и $\frac{S^*}{Q} \sim 2 \cdot 10^{-2}$ при $v > \sqrt{\frac{2eU_i}{m}}$, где U_i — потенциал ионизации и m — масса электрона. Видно, что отношение $\frac{\bar{u}_{др.}}{v}$ меньше $\sqrt{\frac{S^*}{Q}}$ и поэтому им можно пренебречь в выражении (10). Решение уравнения (6) сводится после упрощений к виду

$$n = n_0 \exp [-x \sqrt{3S^*Q}]. \quad (11)$$

Найдем теперь зависимость концентрации быстрых электронов от их энергии.

Плотность тока j в разрядной трубке определяется соотношением

$$j = j_i + j_{eб} + j_{ем}, \quad (12)$$

где j_i , $j_{eб}$ и $j_{ем}$ — плотность тока за счет ионов, быстрых и медленных электронов соответственно. Вблизи катода, т. е. на границе катодного падения и бесполевого пространства (точка $x=0$), источником электронов служит в основном катод, и поэтому током медленных электронов можно пренебречь

$$j = j_i(0) + j_{eб}(0). \quad (13)$$

Плотность тока, созданная быстрыми электронами, определяется из выражения (5)

$$j_{eб}(0) = e \left[-D \frac{dn}{dx} + n \bar{u}_{др.} \right]_{x=0} \approx en_0 v \sqrt{\frac{S^*}{3Q}}. \quad (14)$$

Плотность тока ионов характеризует количество ионов, образующихся в пространстве катод—анод в 1 сек. в сечении 1 см^2 и определяется при совместном решении уравнений (4) и (11) из следующего соотношения:

$$j_i(0) = n_a n_0 S_i v e \int_0^d \exp [-x n_a \sqrt{3S^*Q}] dx, \quad (15)$$

где S_i — сечение ионизации атомов, d — расстояние катод—анод.

Из (15) следует, что

$$j_i(0) = \frac{n_0 S_i v e}{\sqrt{3 S^* Q}} [1 - \exp(-dn_a \sqrt{3 S^* Q})], \quad (16)$$

преобразуя совместно (13), (14) и (16), получим

$$n_0 = \frac{j}{ev \sqrt{\frac{S^*}{Q}} \left\{ 1 + \frac{S_i}{S^*} [1 - \exp(-dn_a \sqrt{3 S^* Q})] \right\}}. \quad (17)$$

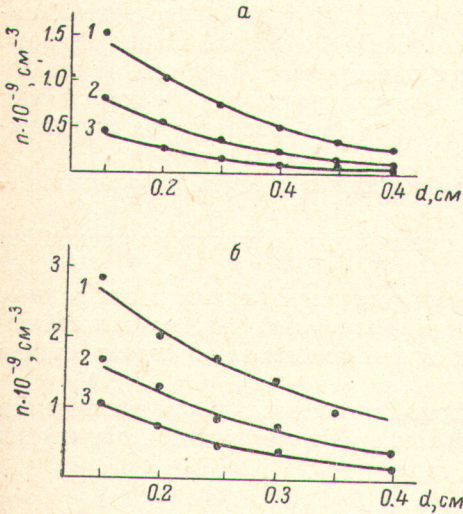


Рис. 4. Зависимость концентрации быстрых электронов от расстояния катод—анод.

a — неон, анодное напряжение (в вольтах): 1 — 22; 2 — 24; 3 — 26; б — криптон, анодное напряжение (в вольтах): 1 — 14; 2 — 15; 3 — 16 (теоретические кривые и экспериментальные точки).

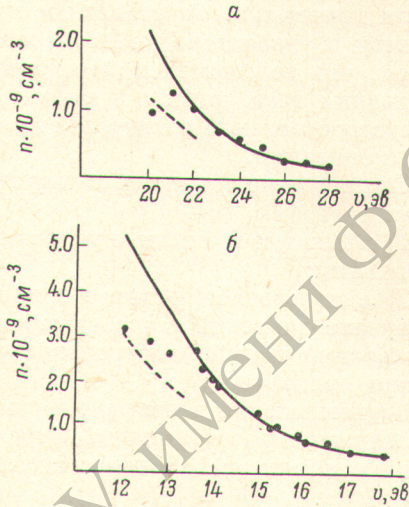


Рис. 5. Зависимость концентрации быстрых электронов от их энергии.

Расстояние зонд—катод 2 мм. a — неон, б — криптон (теоретические кривые и экспериментальные точки).

Подставив (17) в (11), имеем окончательную формулу, выражающую зависимость концентрации быстрых электронов от их энергии и расстояния катод—анод

$$n = \frac{j \exp[-xn_a \sqrt{3 S^* Q}]}{ev \sqrt{\frac{S^*}{3Q}} \left\{ 1 + \frac{S_i}{S^*} [1 - \exp(-dn_a \sqrt{3 S^* Q})] \right\}}. \quad (18)$$

На рис. 4 и 5 приведены зависимости концентрации быстрых электронов от энергии и расстояния катод—анод, вычисленные по формуле (18) и измеренные экспериментально.

Видно хорошее согласие теории с экспериментальными данными при энергии электронов больше потенциала ионизации газа. Несоответствие теории и эксперимента при энергии электронов, близких к потенциалу ионизации исследуемого газа, происходит, вероятно, вследствие того, что при решении задачи не учитывалась ступенчатая ионизация.

В тех случаях, когда число ионов, образованных за счет ступенчатой ионизации, сравнимо или больше числа ионов, созданных вследствие прямого электронного соударения, в формуле (18) сечение ионизации S_i необходимо заменить на $S_i + S_{i ст.}$, где $S_{i ст.}$ — сечение ступенчатой ионизации, просуммированное по всем уровням.

Так как медленные электроны не могут возбуждать вследствие прямого соударения, то

$$S_i < S_i + S_{i ст.} < S^* \quad (19)$$

и нижний предел концентрации быстрых электронов вблизи порога ионизации определяется из следующего соотношения:

$$n = \frac{j \exp[-\alpha n_0 \sqrt{3S^*Q}]}{ev \sqrt{\frac{S^*}{3Q}} [2 - \exp(-\alpha n_a \sqrt{3S^*Q})]} \quad (20)$$

На рис. 5 штриховыми линиями приведены зависимости концентрации быстрых электронов от их энергии, рассчитанные по формуле (20). Значения концентрации быстрых электронов при энергии их меньше потенциала ионизации, определенные по формуле (20) и из эксперимента, находятся в удовлетворительном согласии. Таким образом, можно сделать вывод, что действительно при энергиях электронов, близких потенциалу ионизации газа, ионы в прикатодной области разряда образуются как вследствие прямого электронного соударения, так и вследствие ступенчатой ионизации.

Соответствие теории и эксперимента позволяет сделать некоторые выводы:

1) принятые граничные условия при решении кинетического уравнения правильны;

2) в поперечном разряде с протяженными электродами в выбранном интервале давлений газов существует диффузионный режим; направленной составляющей электронов с расстояний больших 1.5 мм от катода можно пренебречь;

3) уменьшение в разряде числа быстрых электронов при увеличении их энергии и расстояния до катода объясняется потерями при неупругих столкновениях электронов с атомами газа.

Литература

- [1] К. С. Мустафин, В. А. Селезнев, Е. И. Штырков. Опт. и спектр., 6, 780, 1966.
- [2] Г. Г. Киселева, О. Н. Орешак, Е. П. Остапченко, В. А. Степанов. Электронная техника, сер. 3, газоразрядные приборы, № 3, 10, 1966.
- [3] В. С. Бородин, Ю. М. Каган, Р. И. Лягущенко. ЖТФ, 36, 181, 1966.
- [4] В. Л. Грановский. Электрический ток в газах. Гостехтеориздат, М., 1952.
- [5] П. С. Месси, Е. Г. Бархоп. Электронные и ионные столкновения. ИЛ, М., 1958.
- [6] С. Браун. Элементарные процессы в плазме газового разряда. Госатомиздат, М., 1961.
- [7] L. Vriens. Physica, № 3, 385, 1965.

Поступило в Редакцию 29 января 1970 г.