

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ПРОТЯЖЕННОМ ДИОДЕ

II. ПРОЦЕССЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ УРОВНЕЙ

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

В плоском протяженном диоде проведено исследование процессов возбуждения и разрушения ряда уровней неона. Установлено, что большинство $2p$ уровней неона возбуждается преимущественно вследствие ступенчатых, а уровни $3s$, $4s$, $5d$ и другие вследствие прямых соударений с электронами. Определены сечения ступенчатого возбуждения уровней $2p$ и сечения ступенчатой ионизации с более высоких уровней.

Методика эксперимента

В разрядной трубке, описанной в первой части статьи, проведены измерения как распределения и концентрации электронов, так и абсолютной интенсивности, коэффициента поглощения многих линий неона, рассчитаны заселенности уровней $1s_{2-5}$. Давление неона 4 мм рт. ст. под-

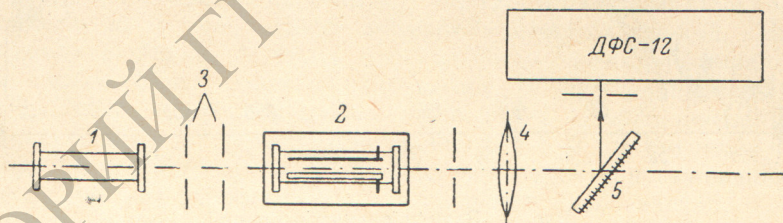


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения коэффициента поглощения и абсолютной интенсивности линий.

1 — дополнительный источник, 2 — исследуемый диод, 3 — диафрагма, 4 — коллимирующая линза, 5 — поворотное зеркало.

держивалось неизменным. Плотность тока и анодное напряжение изменялись в пределах 0—120 ма/см² и 20—30 в соответственно.

Коэффициент поглощения и абсолютная интенсивность линий измерялись на установке, блок-схема которой приведена на рис. 1. Свет от источника 1, диаметром 20 и длиной 150 мм, ширина пучка которого ограничивалась диафрагмами 3 до 6 мм, проходил через исследуемую трубку 2, коллимирующую линзу 4, на поворотное зеркало 5, попадал на входную щель спектрометра ДФС-12 и регистрировался милливольтметром М-193 с одновременной записью на потенциометре ЭПП-09. Для измерения коэффициента поглощения, абсолютной интенсивности и заселенности уровней по сечению исследуемый диод закреплялся на столике, который мог перемещаться строго параллельно оптической оси установки с помощью микрометрического винта. Параллельность плоскости катода оптической оси установки выставлялась с помощью газового лазера. Давление неона и плотность тока в дополнительном источнике 1 поддер-

живались такими, чтобы температура газа и, следовательно, контуры спектральных линий в обеих трубках были идентичными, что позволяло применять метод поглощения для измерения реабсорбции на линиях неона.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Измерены абсолютные интенсивности большинства линий переходов $2p - 1s$ и линий 4433, 4715, 5037, 4837 Å и т. д. с более высоких энергетических уровней неона. По измеренным коэффициентам поглощения на многих линиях переходов $2p - 1s$ определены заселенности на уровнях $1s_{2-5}$. Некоторые из результатов исследований представлены на рис. 2—4.

На рис. 2 представлены зависимости концентрации возбужденных атомов на уровнях $1s_{2-5}$ при напряжении 25 в от плотности тока разряда.

Анализ результатов показывает на существование между уровнями $1s$ значительного перемешивания. Обращают на себя также внимание большие абсолютные значения заселенности на уровнях $1s$, достигающие в условиях эксперимента значений, близких к 10^{12} см^{-3} , что значительно превышает величины концентрации атомов на этих уровнях в положительном столбе разряда для трубок малого диаметра.

При составлении уравнения баланса и сравнении чисел возбуждений и чисел квантов данные по электрическим параметрам разряда и сечениям возбуждения использовались из первой части работы и из [1-3].

Исследование электрических параметров разряда показали, что концентрация быстрых и медленных электронов изменяется в условиях эксперимента соответственно в диапазонах $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$ и $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Вследствие существования двух резко выраженных и далеко отстоящих друг от друга групп электронов полное распределение электронов по скоростям $F(v)$ можно разделить на распределение медленных электронов $f(v)$ и распределение монокинетической группы электронов $\delta(v - v_0)$, где v_0 — скорость быстрых электронов.

При этом для полной концентрации электронов справедливо соотношение

$$n_e = \int_0^\infty n_e F(v) dv = \int_0^\infty n_{em} f(v) dv + \int_0^\infty n_{e0} \delta(v - v_0) dv, \quad (1)$$

где n_{em} и n_{e0} — концентрация медленных и быстрых электронов.

Для чисел прямых электронных возбуждений уровней неона можно записать

$$Z_{пр.} = n_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_{U_a}^\infty n_e F(eU) Q_{ок}(eU) \sqrt{U} dU. \quad (2)$$

Учитывая (1) и то, что медленные электроны не могут возбуждать неон прямым электронным ударом, получим

$$Z_{пр.} = n_{e0} \sqrt{\frac{2e}{m}} U_0 Q_{ок}(eU_0). \quad (3)$$

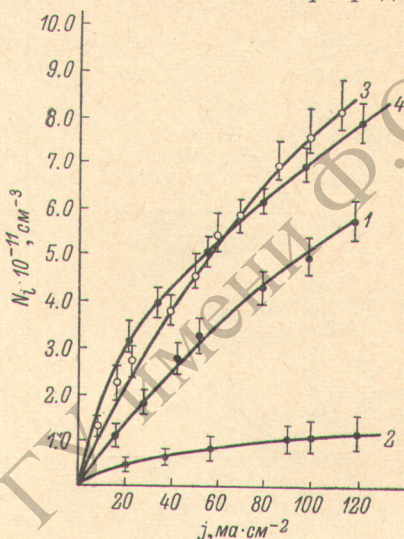


Рис. 2. Зависимость концентрации возбужденных атомов на уровнях $1s_{2-5}$ от плотности тока.

Напряжение 25 в. Расстояние от катода 2 мм. 1 — $1s_2$, 2 — $1s_3$, 3 — $1s_4$, 4 — $1s_5$.

Числа ступенчатых возбуждений уровней неона вследствие соударений электронов с атомами на уровнях $1s$ определяются для прикатодной области разряда из следующего выражения:

$$Z_{\text{ст.}} = n_s \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_{U_a - U_s}^{\infty} n_e F(eU) q_{ik}(eU) \sqrt{U} dU = n_s n_{em} \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_{U_a - U_s}^{\infty} f(eU) q_{ik}(eU) \sqrt{U} dU + \\ + n_s n_{e0} \sqrt{\frac{2eU_0}{m}} q_{ik}(eU_0). \quad (4)$$

Так как сечение ступенчатого возбуждения $q_{ik}(eU)$ уровней неона имеет максимум в области малых энергий электронов (например, для уровней $2p$ при 4.9 эв [1]) и при увеличении энергии резко уменьшается,

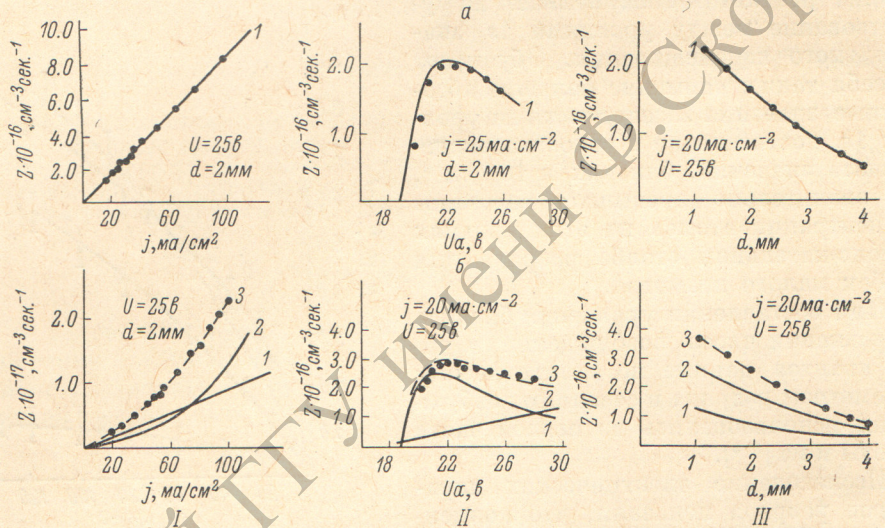


Рис. 3. Зависимость чисел квантов (экспериментальные точки) и чисел прямых (I) и ступенчатых (II) возбуждений и их суммы (III) для уровней $2p_1$ (а) и $2p_4$ (б) от плотности тока (I), напряжения (II) и расстояния от катода (III).

то в ряде случаев, в частности для уровней $2p$ неона, при исследуемом диапазоне токов, напряжений разряда и давлений газа, когда $n_{em} \gg n_{e0}$, первый член в выражении (4) много больше второго и соотношение (4) преобразуется к виду

$$Z_{\text{ст.}} \approx n_s n_{em} \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_{U_a - U_s}^{\infty} f(eU) q(eU) \sqrt{U} dU. \quad (5)$$

Таким образом, пренебрежимо малое число электронов с промежуточными значениями энергии обуславливает то, что быстрые электроны возбуждают прямым образом, а медленные ответственны за ступенчатые процессы.

Обратимся к рассмотрению заселения уровней $2p$ неона. На рис. 3 приведены результаты сравнения чисел возбуждений и чисел квантов для уровней $2p_1$ и $2p_4$. Для уровня $2p_1$ при всех изменениях плотности тока, напряжения и расстояния от катода наблюдается хорошее совпадение чисел прямого возбуждения и чисел квантов. Это говорит о том, что уровень $2p_1$ возбуждается в основном вследствие прямых электронных соударений.

Для уровня $2p_4$ число квантов равно сумме чисел прямых и ступенчатых возбуждений. Аналогичные зависимости от плотности тока, напряжения и расстояния наблюдаются и для других уровней $2p$. Это показывает, что все уровни $2p$ неона, за исключением $2p_1$ уровня, в прикатодной обла-

сти разряда возбуждаются как вследствие прямых, так и ступенчатых соударений. При малых токах и напряжениях преобладает прямое электронное возбуждение, а при увеличении тока и напряжения основную роль начинают играть ступенчатые соударения электронов с атомами, находящимися на уровнях $1s$.

Существование четкого разделения между прямыми и ступенчатыми возбуждениями позволило с малыми погрешностями определить сечения ступенчатых возбуждений для уровней $2p_{2-10}$ и сравнить значения этих сечений с известными в литературе (табл. 1).

Видно, что сечения, измеренные в настоящей работе, практически совпадают со значениями, полученными в работе [2].

Вследствие того что в разряде мало электронов с энергией $3.5-4$ эв, роль ступенчатого возбуждения верхних уровней неона $3s_2$, $4s_4$, $5d_4$ и т. д. очень мала и они возбуждаются преимущественно за счет прямых электронных соударений. Зависимости чисел квантов для линий с этих уровней от плотности тока разряда представлены на рис. 4. Видно, что зависимость чисел квантов для линий с высоко расположенными верхними уровнями стремится к насыщению уже при плотности тока $j=80-100$ ма/см².

Уравнение баланса для этих уровней имеет вид

$$Z_{пр.} = N_{кв.} + \Delta N, \quad (6)$$

где ΔN — число безызлучательных переходов с высокоэнергетических уровней, сильно зависящее от тока разряда.

Так как безызлучательные переходы с высокоэнергетических уровней осуществляются, вероятно, вследствие ступенчатой ионизации неона с этих уровней, то нетрудно из соотношения

$$\Delta N = n_{em} n_a \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_{v_t - U_a}^{\infty} f(eU) q_{kj}(eU) \sqrt{U} dU \quad (7)$$

Таблица 1

Значения эффективных сечений ступенчатого возбуждения $2p$ уровней неона $q_{ik} \cdot 10^{16} \text{см}^2$

	$2p_1$	$2p_2$	$2p_3$	$2p_4$	$2p_5$	$2p_6$	$2p_7$	$2p_8$	$2p_9$	$2p_{10}$
Вычисленные значения	—	5.0	4.0	7.0	4.0	14	5.0	—	10	—
Значения сечений, измеренных в [2]	9.3	6.5	1.7	8.3	5.4	10	3.5	5.5	9.1	4.3

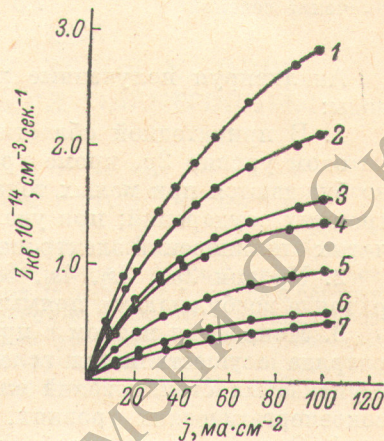


Рис. 4. Зависимость чисел квантов для линий с верхних возбужденных уровней неона от плотности тока разряда.

Напряжение 25 в. Расстояние от катода 2 мм. Длина волны, Å: 1 — 5037, 2 — 5433, 3 — 5222, 4 — 4704, 5 — 4880, 6 — 4788, 7 — 4752.

определить сечение ступенчатой ионизации $q_{kj}(eU)$ с верхних уровней неона.

Значения сечений ступенчатой ионизации с уровней $3s_2$, $4s_4$, $5d_4$ и т. д. приведены в табл. 2. Обращают на себя внимание большие значения сечений ступенчатой ионизации, приближающиеся к величине 10^{-12}см^2 .

Таблица 2

Значения эффективных сечений ступенчатой ионизации
некоторых верхних уровней неона $q_{kj} \cdot 10^{13} \text{ см}^2$

	$5d_3$	$6d_4$	$5s_5$	$4s_5$	$5d_4$	$4s_2$	$3s_2$
Потенциал возбуждения, эВ	21.01	21.18	21.14	20.94	20.01	20.95	20.66
Значение сечений	7.0	9.0	5.0	7.0	3.0	6.0	5.0

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. В прикатодной области разряда протяженного диода с оксидным катодом уровни $2p$, кроме уровня $2p_1$, при исследуемых давлениях газа возбуждаются при малых токах и напряжениях вследствие прямых электронных соударений; при увеличении тока и напряжения за счет ступенчатых столкновений электронов с атомами на уровнях $1s$.

2. Уровни $2p_1$, $3s_2$, $4s_4$, $5d_4$ и т. д. при всех исследуемых условиях разряда возбуждаются прямым электронным ударом.

3. Ионизация неоном в прикатодной области и исследуемых условиях разряда осуществляется вследствие прямых электронных соударений и ступенчатых столкновений электронов с атомами, находящимися на высокоэнергетических уровнях.

4. Сечение ступенчатой ионизации с уровнями $3s_2$, $4s_4$, $5d_4$ и т. д. равно $10^{-13} - 10^{-12} \text{ см}^2$.

Литература

- [1] В. С. Кривченко, А. Д. Хахаев. Электронная техника, сер. 3, газоразрядные приборы, № 1, 3, 1969.
- [2] С. Э. Фриш, В. Ф. Ревалд. Опт. и спектр., 15, 726, 1963.
- [3] И. П. Запесочный, П. В. Фельцан. Ж. прикл. спектр., 6, 111, 1967.

Поступило в Редакцию 5 февраля 1970 г.