

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. В. Елецкий, А. О. Назарян, Б. М. Смирнов,
Баланс энергии электронов в разряде молекулярного кислорода, *ТВТ*, 1983, том 21, выпуск 2, 385–387

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 34.239.153.44

6 ноября 2024 г., 08:50:59



В [7] высказывалось предположение, что большой выход озона связан с существованием в ПС разряда неоднородностей типа движущихся доменов сильного поля [8]. В наших экспериментах во всем исследуемом диапазоне изменения параметров разряда p , V , I , как показывают осциллограммы пульсации напряжения, а также скоростная фотография с помощью ЭОП с экспозицией 10^{-7} – 10^{-5} с, домены такого типа, а также неустойчивости в ПС разряда отсутствуют.

Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают факт существования неоднородности ПС в поперечном тлеющем разряде – напряженность поля в ПС растет от катода к аноду. Относительно большой выход озона не связан с появлением в ПС различного вида неустойчивостей, образованием дуг, страт и доменов, а определяется в основном величиной напряженности электрического поля в разряде.

Институт атомной энергии
имени И. В. Курчатова

Поступило в редакцию
26.IV.1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Артамонов А. В., Напартович А. П., Наумов В. Г., Шашков В. М. Физика плазмы, 1978, т. 5, № 1, с. 194.
2. Besshaposnikov A. A., Blokhin V. I., Voronin V. B. et al. ICPIG, Minsk, 1981, p. 227.
3. Бессапошников А. А., Блохин В. И., Воронин В. Б. и др. ХВЭ, 1982, т. 16, № 4, с. 643.
4. Бреев В. В., Пашкин С. В. Препринт ИАЭ им. И. В. Курчатова № 2959, М., 1978.
5. Блохин В. И., Пашкин С. В. ТВТ, 1976, т. 14, № 2, с. 378.
6. Борисов В. М., Блохин В. И., Пашкин С. В., Шулаков В. Н. Письма ЖЭТФ, 1980, т. 6, № 18, с. 1446.
7. Артамонов А. В., Напартович А. П. ХВЭ, 1978, т. 14, № 1, с. 152.
8. Акишев Ю. Ф., Напартович А. П., Пашкин С. В. Физика плазмы, 1978, т. 14, № 1, с. 152.

УДК 533.93

БАЛАНС ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ В РАЗРЯДЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА

Елецкий А. В., Назарян А. О., Смирнов Б. М.

1. Относительный вклад различных процессов электронно-молекулярных соударений в баланс энергии электронов в разряде молекулярного газа необходим для определения электрических, оптических и химических свойств такого разряда. Подробные и достаточно надежные расчеты такого рода, основанные на измерениях коэффициентов диффузии и подвижности электронов, а также на вычислении неравновесной функции распределения электронов по энергиям, выполнены для N_2 [1–4], H_2 [5], CO [3, 6–8]. Возможность осуществления таких расчетов для указанных газов обусловлена тем, что области изменения отношения E/N (E – напряженность электрического поля, N – плотность молекул), где определяющий вклад в баланс энергии электронов дают процессы возбуждения вращательных, колебательных и электронных состояний молекул, перекрываются лишь в небольших диапазонах. Это позволяет, используя результаты измерений кинетических коэффициентов электронов в определенной области изменения отношения E/N , однозначно восстанавливать сечение того из процессов неупругого взаимодействия электрона с молекулой, который вносит основной вклад в баланс энергии электронов в рассматриваемой области.

Цель данной работы – определение баланса энергии электронов в разряде молекулярного кислорода. Поскольку энергия возбуждения нижних электронных состояний молекулы кислорода относительно невысока, в широкой области изменения E/N процессы возбуждения колебательных и электронных состояний молекулы кислорода дают сопоставимый вклад в баланс энергии электронов. Поэтому традиционная методика расчета баланса энергии электронов в смесях, содержащих кислород, приводит к противоречивым результатам [3, 10]. В данной работе для преодоления указанных противоречий используются результаты недавних экспериментов [11, 12], в которых измерена константа скорости возбуждения нижних электронных уровней молекулы кислорода ($a'\Delta_g$ и $b'\Sigma_g$) в смесях кислорода с инертными газами. Обработка этих результатов, а также экспериментальных данных по диффузии и подвижности электронов в кислороде позволяет достаточно надежно отделить долю энергии, идущую на возбуждение электронных состояний молекулы, от доли энергии, расходуемой на возбуждение колебательных и вращательных состояний молекул.

При этом отметим, что используемые измерения отвечают быстро растущей части кривой зависимости константы скорости процесса от напряженности электрического поля. Поэтому константа скорости процесса представляется в логарифмическом масштабе, что снижает точность ее определения. Используанный метод, который опирается на измерение плотности возбужденных молекул кислорода, не позволяет отделить вклад каскадных процессов возбуждения рассматриваемых состояний от прямого канала заселения этого уровня. Поэтому при выяснении путей расхо-

вания электронной энергии на основе указанных измерений можно указать лишь границы для доли энергии, затрачиваемой электроном на возбуждение электронных уровней молекулы кислорода. Это снижает требования к точности обработки экспериментальных данных, а потому при их обработке в данной работе используется метод [13–15], в основе которого лежит предположение о том, что константы скорости соответствующих упругих и неупругих процессов зависят только от средней энергии электронов и слабо зависят от вида функции распределения электронов по энергиям. Такой подход обеспечивает погрешность в диапазоне 15–30% [15].

2. В основе анализа лежат точные соотношения для дрейфовой скорости электрона w и уравнение баланса для электронной энергии

$$w = \frac{eE}{3m} \left\langle \frac{1}{v^2} \frac{d}{dv} \left(\frac{v^3}{v} \right) \right\rangle, \quad (4)$$

$$eEw = \sum_i 2 \frac{m}{M_i} \langle \epsilon v_i \rangle + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right)_{\text{неупр}}. \quad (2)$$

Здесь E – напряженность электрического поля; v – скорость электрона; $v = \sum v_i = \sum N_i K_{\text{упр}}$ – частота столкновений электрона с частицами газа, где N_i – плотность частиц для i -й компоненты; v_i – частота упругого столкновения электронов с частицами i -й компоненты; m – масса электрона; M_i – масса частицы газа; угловые скобки означают усреднение по скоростям электронов. Уравнение (2) – уравнение баланса для энергии электрона, его левая часть – энергия, получаемая одним электроном в единицу времени от электрического поля, первое слагаемое в правой части – потери энергии одного электрона в единицу времени за счет упругих столкновений с частицами газа, второе слагаемое – потери на неупругие столкновения.

В рассматриваемом приближении, когда параметры столкновения электрона с частицами газа зависят только от средней энергии электрона $\bar{\epsilon}$, выражения (1), (2) принимают вид

$$w = eE / \left[m \sum_i v_i \left(a \sqrt{\frac{2\bar{\epsilon}}{m}} \right) \right], \quad (3)$$

$$eEw = \sum_i 2 \frac{m}{M_i} \bar{\epsilon} v_i \left(b \sqrt{\frac{2\bar{\epsilon}}{m}} \right) + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right)_{\text{неупр}}. \quad (4)$$

Наиболее подходящие значения коэффициентов a и b , найденные для разных функций распределения электронов и зависимостей сечения упругого столкновения электрона с частицей газа от скорости электрона, равны

$$a = 1,2 \pm 0,1; \quad b = 0,94 \pm 0,14. \quad (5)$$

Алгоритм обработки состоит в следующем. Для однокомпонентной системы известен весь набор характеристик в зависимости от параметра E/N , в том числе $\bar{\epsilon}$, w . Это дает возможность восстановить $k_{\text{упр}}(a\sqrt{2\bar{\epsilon}/m})$ и $(\partial\epsilon/\partial t)_{\text{неупр}}$ для данной компоненты. Задавая определенным значением средней энергии электронов $\bar{\epsilon}$ и используя значения указанных параметров для каждой компоненты смеси, на основе соотношений (3), (4) определяем величину eE/N в смеси. Это позволяет представить экспериментальные значения константы скорости возбуждения в зависимости от средней энергии электронов (а не от параметра eE/N , как это делалось в эксперименте). Использование данных для разных смесей позволяет оценить точность восстановленных констант скоростей.

3. В таблице представлены константы скорости возбуждения электронных уровней $a'\Delta_g$, $b'\Sigma_g^+$ молекулы кислорода, восстановленные из измерений [11, 12], а также другие характеристики электрона, движущегося в кислороде во внешнем электрическом поле. Степень совпадения данных, полученных для разных смесей, свидетельствует о погрешности результатов, не превышающей 30%. В последней колонке для сравнения даны значения константы скорости прилипания электрона к молекуле кислорода. Как видно, за время жизни в кислороде электрон успевает создать много возбужденных молекул. Кроме того, как следует из приведенных в таблице данных, вклад процесса диссоциативного прилипания в баланс энергии электронов в разряде кислорода в рассматриваемом диапазоне изменения средней энергии электронов не превышает 1%. Грубую оценку этого вклада можно получить, вычислив отношение $k_{ae_a}/[e(E/N)w]$ (k_a – константа скорости прилипания, $\epsilon_a \approx 7$ эВ – энергия автоионизационного состояния молекулы O_2 , распад которого приводит к диссоциативному прилипанию). Результат оценки показывает, что пренебрежение процессом прилипания электронов в балансе энергии электронов не снижает точности используемого подхода.

Отметим, что в данном расчете учитывались лишь процессы прямого возбуждения низкорасположенных электронных состояний молекулы O_2 . При больших значениях средней энергии электронов определенный вклад в баланс энергии электронов могут дать процессы возбуждения более высоковозбужденных состояний молекулы O_2 ,

$\bar{\epsilon}$, эВ	E/N , Td ¹	w , 10 ⁸ см ² /с	Константа скорости возбуждения электронных уровней, 10 ⁻¹¹ см ² /с		Доля энергии, %		Константа скорости прилипания электрона к O ₂ , 10 ⁻¹¹ см ² /с
			$a'\Delta_g$	$b'\Sigma_g^+$	упругое рассеяние	электронное возбуждение ⁴	
1	6	2,75	0,16(0,16) ²	0,73(0,92) ³	0,9	9	—
2	13	3,7	0,48(0,46)	7,8(5,2)	1,0	23	0,2
3	23	5,2	0,73	22(29)	0,75	36	1,1
4	50	8,0	1,2	63(73)	0,43	28	2,2
5	90	14,4	—	170(170)	0,16	22	3,2
6	150	21,3	—	360	0,08	18	4,3

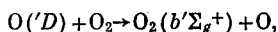
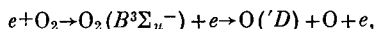
¹ 1Td=10⁻¹⁷ В·см².

² Приводится величина, измеренная для смеси 99% Ar+1% O₂, в скобках — для смеси 95% Ar+5% O₂.

³ Приводится величина, измеренная в чистом кислороде; в скобках — для смеси 90% N₂+10%O₂.

⁴ Учитывается только возбуждение $a'\Delta_g$ и $b'\Sigma_g^+$ — уровней молекулы кислорода (каскадное возбуждение этих уровней отсутствует).

а также ее диссоциации. Так, заслуживает внимания каскадный процесс



при котором на образование молекул O₂($b^1\Sigma_g^+$) расходуется в 3,8 раз большая энергия, чем при прямом возбуждении. В связи с этим полученные здесь результаты расчета доли энергии, идущей на возбуждение электронных состояний, представляют собой нижнюю границу истинного значения. Ошибка расчета возрастает с ростом средней энергии электрона. По-видимому, уменьшение доли энергии электронов, идущей на возбуждение электронных состояний, обнаруженное в расчете при $\bar{\epsilon} > 3$ эВ, связано в действительности с появлением дополнительного канала потери энергии электрона, так что процессы возбуждения электронных состояний в этой области дают определяющий вклад в баланс энергии электронов. Таким образом, приведенные в таблице данные можно считать надежными при $\bar{\epsilon} \approx 3$ эВ.

4. Полученные результаты несколько отличаются от результатов прежних расчетов, основанных на менее современных данных по эффективности возбуждения электронных состояний молекулы кислорода. Так, в наиболее полной из работ [10] вычислены значения констант скорости возбуждения состояний $a'\Delta_g$ и $b'\Sigma_g^+$, которые оказались примерно на порядок выше экспериментальных данных [11, 12]. В результате использования таких неточных данных вклад электронного возбуждения в баланс энергии электронов оказался существенно (в четыре-пять раз) переоцененным. Аналогичную погрешность имеют данные [9].

Таким образом, результаты измерения констант скорости возбуждения электронных состояний молекулы кислорода [11, 12] заставляют пересмотреть существующую в литературе точку зрения на роль этих процессов в балансе энергии электронов в разряде молекулярного кислорода. Достаточно надежные оценки баланса энергии, погрешность которых соответствует погрешности современного эксперимента, могут быть выполнены с помощью простого метода [13–15], не связанного с решением кинетического уравнения Больцмана.

Институт атомной энергии
имени И. В. Курчатова

Поступило в редакцию
10.III.1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Frost L. S., Phelps A. V. Phys. Rev., 1962, v. 127, p. 1624.
2. Engelgardt A. G., Phelps A. V., Risk C. G. Phys. Rev., 1964, v. 135, p. A1566.
3. Nighan W. L. Phys. Rev., A, 1970, v. 2, p. 1989.
4. Александров Н. Л., Кончаков А. М., Сон Э. Е. Физика плазмы, 1978, т. 4, с. 169.
5. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. М.: Мир, 1977.
6. Александров Н. Л., Кончаков А. М., Сон Э. Е. ЖЭТФ, 1979, т. 49, с. 1194.
7. Hake R. D., Phelps A. V. Phys. Rev., 1967, v. 158, p. 70.
8. Конев Ю. Б. и др. Препринт ИАЭ им. И. В. Курчатова № 2810, 1977.
9. Кончаков А. М. Канд. дис. на соискание уч. ст. канд. ф.-м. наук. М., МФТИ, 1979.
10. Исламов Р. Ш., Кочетов И. В., Певгов В. Г. Препринт ФИАН им. П. Н. Лебедева, № 169, 1977.
11. Lawton S. A., Phelps A. V. J. Chem. Phys., 1978, v. 69, p. 1055.
12. Tachibana K., Phelps A. V. J. Chem. Phys., 1981, v. 75, p. 3315.
13. Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М. Явления переноса в слабоионизованной плазме. М.: Атомиздат, 1975.
14. Елецкий А. В. Физика плазмы, 1977, т. 3, с. 657.
15. Бычков В. Л., Елецкий А. В., Смирнов Б. М. В кн.: Химия плазмы. Вып. 10 / Под ред. Смирнова Б. М. М.: Энергоиздат, 1983.