

04

## **Физико-химический механизм перестройки структуры ударной волны в плазме затухающего разряда**

© А.С. Барышников

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

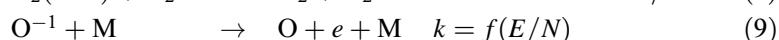
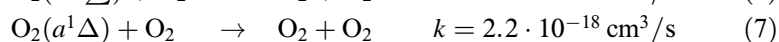
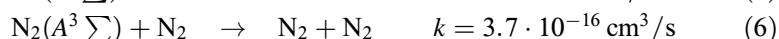
Поступило в Редакцию 29 мая 1997 г.

Изучается физико-химический механизм перестройки волны в плазме тлеющего и затухающего разряда. Обосновывается механизм стратификации течения плазмы через возбуждение и излучение из псевдометаустойчивого состояния кислорода.

В предыдущих статьях исследовалась аномальная структура ударной волны в плазме тлеющего разряда в воздухе [1]. Обнаружено очень большое время (примерно 100 s) исчезновения такой структуры по мере затухания разряда [2], которое невозможно объяснить только с позиций теории электродинамики. Вместе с тем известно, что некоторые возбужденные состояния кислорода имеют время радиационного распада, измеряемое часами [3]. Это говорит о том, что объяснение механизма исследуемого эффекта следует искать в области теории физико-химических превращений в воздухе.

Для понимания процессов, происходящих в плазме тлеющего разряда в воздухе, можно использовать теоретические расчеты и эксперименты, предложенные в работах [4–5]. Преимущество этих исследований в том, что они проведены на режимах, близких к исследуемым: температура газа 353 K, температура и плотность электронов в разряде: 12 000 K,  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . Экспериментальные режимы эффекта: температура газа в разряде 400–100 K, температура и плотность электронов 1 eV,  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$  [1], давление газа (33 Torr) меньше, чем в статьях [4–5] (в сухом воздухе 647 Torr), но эту разницу просто учесть в предэкспоненте выражения для скорости физико-химических превращений. Наряду с сухим воздухом в цитируемых статьях исследуется и физико-химическая кинетика в разряде влажного воздуха.

Имея информацию о времени существования эффекта, можно сравнить ее с временами протекания процессов и определить, какое состояние и какой процесс ответственны за появление эффекта. Исходя из данных [4–5], можно найти несколько достаточно медленных процессов (время протекания на режиме проявления эффекта порядка 10–100 s):



$k$  — константа скорости процесса.

Реакции (5)–(8) представляют собой реакции дезактивации возбужденных состояний молекул при соударении с молекулами воздуха, концентрации которых на порядки ниже концентраций атомарных компонент и электронов. Эти реакции не могут играть в разряде определяющей роли. Процессы трехчастичной рекомбинации имеют гораздо большее время протекания. Как известно, деионизация газа в тлеющем разряде происходит в основном за счет амбиполярной диффузии. Приведенные выше реакции являются реакциями вторичных процессов образования промежуточных состояний, затягивающих процесс установления равновесного состояния воздуха в распадающейся плазме.

Из системы реакций (1)–(4) видно, что основные вторичные процессы связаны с образованием атомарного кислорода, кроме реакции (4), которая уменьшает концентрацию [O] при столкновении с отрицательным ионом кислорода. Поэтому конкурирующим процессом этой реакции является реакция (9) отлипания электрона от атома кислорода. Константа скорости этой реакции существенно зависит от параметра  $E/N$ , где  $E$  — напряжение на электродах, а  $N$  — плотность газа. Согласно данным [4], при  $E/N = 70 \text{ Td}$   $k = 10^{-16}$ , а при  $E/N > 120 \text{ Td}$   $k = 10^{-12}$ . В исследуемом случае механизм эффекта

должен быть справедлив как в распадающейся плазме, так и в самом разряде, поэтому рассмотрим разряд. В статье [4]  $E/N = 75-100$  Td. Различие в напряжениях ( $E = 12.5$  и  $650$  V) компенсируется различием в давлении. Таким образом, различие в значении  $E/N$  определяется только различием в температуре газа. В центре исследуемого разряда температура выше в 3–4 раза, и параметр  $E/N$  — также выше. На краях разряда на режимах проявления эффекта величина параметра  $E/N$  близка к значениям в статьях [4–5], но превышает их на 10–20%. Следовательно, скорость процесса (9) даже на краях разряда настолько велика, что реакция (4) вносит лишь небольшой вклад в баланс активированных состояний, а ближе к центру разряда ее можно не учитывать. В распадающейся плазме затухающего разряда это верно вследствие малости концентрации  $[O^-]$ . Это значит, что в результате вторичных процессов на исследуемых режимах образуется достаточно большая плотность состояний атомарного кислорода. Для того чтобы эффективно снизить эту плотность, необходимо или существенно снизить параметр  $E/N$ , или существенно увеличить влажность воздуха, так как, согласно исследованиям [4–5], во влажном воздухе атомарный кислород заменяется на гидроксильную группу OH. По существу, этот вывод, как и вывод о большой плотности состояний атомарного кислорода, являются основными для цитируемых статей.

Впервые исследуемый эффект был обнаружен в разряде в аргоне [6]. Ранее в работе [7] было показано, что эффекты перестройки структуры ударной волны в ионизированном аргоне можно объяснить моделью излучения за фронтом волны, интенсивность которого пропорциональна третьей степени по концентрациям компонент плазмы. Однако в этой работе не был указан конкретный физико-химический механизм излучения третьего порядка. В статье [8] также был предложен физико-химический механизм эффекта перестройки структуры разряда в аргоне (но СВЧ разряда), когда разряд разбивался на чередующийся ряд светлых и более темных участков [9]. Механизм сводился к тому, что благодаря особому близкому расположению некоторых метастабильных и резонансных уровней в аргоне (res 11.83 eV, met 11.72 eV, или res 11.62 eV, met 11.55 eV) излучение имеет эффективный порядок по концентрации компонент, равный трем. Группы таких состояний называются "псевдометастабильными" состояниями. В аргоне отношение разности энергий резонансного и псевдометастабильного к энергии самого состояния равно примерно 1%. Самое замечательное в том, что

и в атомарном кислороде подобное псевдометаустойчивое состояние существует:  $\text{res } 9.51 \text{ eV } (3^3\text{S}_1^0)$ ,  $\text{met } 9.13 \text{ eV } (3^5\text{S}_2^0)$ . Для него относительная разность энергий составляет примерно 4%. Других псевдометаустойчивых состояний в плазме воздуха не удается идентифицировать. Можно предполагать, что именно это состояние атомарного кислорода ответственно за возникновение изучаемого эффекта.

## Список литературы

- [1] *Басаргин И.В., Мишин Г.И.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 8. С. 55–60.
- [2] *Басаргин И.В., Мишин Г.И.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 7. С. 198–203.
- [3] *Радицг А.А., Смирнов Б.М.* Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат, 1980. 240 с.
- [4] *Акишев Ю.С., Дерюгина А.А., Каральник В.Б., Кочетов И.В., Напартович А.П., Трушкин Н.И.* // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 6. С. 571–584.
- [5] *Акишев Ю.С., Дерюгина А.А., Кочетов И.В., Напартович А.П., Трушкин Н.И.* // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 6. С. 585–592.
- [6] *Басаргин И.В., Мишин Г.И.* // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 4. С. 209–215.
- [7] *Varyshnikov A.S.* In: Rarefied gas dynamics / Ed. by Beylich AE Proc. 17th Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, VCH, Weinheim– N.Y.–Basel–Cambridge, 1991. P. 263–270.
- [8] *Huerta M.A., Magnan J.F.* // Physical rewier A. V. 26. N 1. P. 539–555.
- [9] *Robertson H.S., Herring J.J.* // The physics of Fluids. 1969. V. 12. N 4. P. 836–839.