

Аналогичное явление возникает при возникновении аномальных мод наблюдалось также при исследовании других типов ВЩЛ, например двусторонней, при типичных для практики параметрах линии и частотах. Обратные моды во всех случаях наблюдались в распространяющемся режиме лишь совместно с нормальной основной квази- $H_{10}$  волной, что при эксперименте может проявляться в виде появления в регулярной линии передачи „отраженных“ потоков мощности.

В заключение отметим, что аномальные моды весьма критичны к размеру щели ВЩЛ. Так, увеличение либо уменьшение щели на 10-15 % позволяет обычно уйти из области описанных эффектов, когда они нежелательны. Это приводит к незначительному изменению волнового сопротивления и коэффициента замедления основной моды ВЩЛ.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Веселов Г.И., Раевский С.Б. М.: Радио и связь, 1988. 248 с.
- [2] Omar A.S., Schünemann K. // IEEE Trans. 1985. V. MTT-33. N 12. P. 1313-1322.
- [3] Синельников Ю.М., Синявский Г.П., Тихов Ю.И. // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. № 3. С. 504-509.

Поступило в Редакцию  
20 декабря 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 6

26 марта 1990 г.

04; 09

© 1990

### ДИССОЦИАЦИЯ МОЛЕКУЛ КИСЛОРОДА В СВЧ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ

Н.Л. Александров, А.М. Кончаков

Появление атомов О в кислородсодержащей газоразрядной плазме приводит к увеличению плотности свободных электронов в результате разрушения отрицательных ионов. Поэтому вопрос о концентрации атомов кислорода непосредственно связан с вопросом о вкладываемой в разряд мощности. Кроме того, диссоциация молекул  $O_2$  представляет интерес как промежуточная стадия при образовании озона и окислов азота. В последнее время эти вопросы являются особенно актуальными для задач экологии, где предлага-

ется при очистке жидкостями и газов использовать образующий в разряде озон, а также удалять плазменными методами примеси  $SO_2$  и  $NO_x$  из отработанных газов в энергоемких производствах [1-3]. Наряду с этим диссоциация  $O_2$  является одним из основных процессов, которые необходимо учитывать при исследовании возможности создания искусственной ионизованной области в атмосфере [4-6].

В эксперименте [7] с импульсным СВЧ-разрядом была измерена константа скорости диссоциации молекул  $O_2$  электронным ударом в воздухе при различных значениях эффективного параметра  $E/N$  ( $E$  - напряженность электрического поля,  $N$  - плотность нейтрального газа). Экспериментальные данные [7] оказались значительно выше результатов имеющихся в литературе расчетов. Причина такого различия осталась неясной.

В настоящей работе теоретически исследован механизм диссоциации молекул  $O_2$  электронным ударом в СВЧ-разряде в воздухе применительно к условиям эксперимента [7]: длина волны СВЧ излучения 2,2 см, амплитуда напряженности электрического поля 1,5-3 кВ/см, давление газа 2-18 Тор. Рассмотрение основано на численном решении кинетического уравнения Больцмана для неравновесной функции распределения электронов по энергиям. Учтены упругое рассеяние электронов на молекулах  $O_2$  и  $N_2$  возбуждение их вращательных, колебательных и электронных уровней электронным ударом, а также ионизация. Использован набор сечений элементарных процессов из [8], который ранее позволил получить хорошее согласие между результатами расчета и экспериментальными данными по скорости дрейфа электронов, их характеристической энергии и скорости ионизации в азоте, кислороде и воздухе. Кулоновскими столкновениями пренебрегалось из-за малой степени ионизации ( $< 10^{-5}$ ) в условиях эксперимента [7].

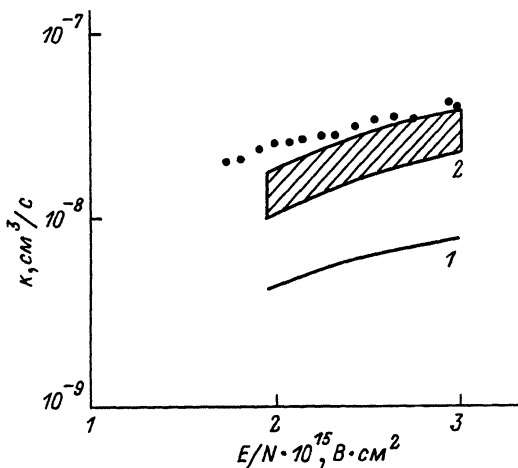
С использованием вычисленного энергетического распределения электронов находилась по аналогии с [8] константа скорости прямой диссоциации молекул  $O_2$



и константы скорости возбуждения электронных уровней молекул. Наряду с процессом (1) в смесях азота с кислородом возможен не прямой канал образования атомов  $O$  [9, 10]



Заселение молекул  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  может происходить также в результате каскадных процессов из  $N_2(C^3\Pi_u)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g)$  и других уровней этой молекулы [11]. Кроме того, к диссоциации молекул  $O_2$  может приводить столкновительное тушение и других электронных состояний  $N_2$  [10].



Константа скорости диссоциации молекул  $O_2$  электронным ударом в СВЧ разряде в воздухе.

Точки - эксперимент [7], кривые - настоящий расчет: 1 - прямая диссоциация (процесс (1)); 2 - диссоциация с учетом вклада электронно-возбужденных состояний молекул  $N_2$ .

На рисунке приведены результаты расчета константы скорости диссоциации молекул  $O_2$  электронным ударом с учетом процессов типа (2), (3) и их сравнение с экспериментальными данными [7]. Разброс в результатах теории связан с неопределенностью в знании эффективности тушения состояния  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  молекулой  $O_2$  с последующей диссоциацией (согласно [12], вероятность диссоциации  $O_2$  при этом равна 0.55-0.75), а также с возможностью каскадов с различных уровней молекулы  $N_2$ .

Полученные результаты свидетельствуют о том, что основным каналом диссоциации молекул  $O_2$  в газоразрядной плазме воздуха связан с возбуждением электронных уровней молекулы  $N_2$ . Его учет позволяет получить разумное согласие между теорией и экспериментом [7]. Роль прямой диссоциации молекул  $O_2$  электронным ударом (процесс (1)) относительно мала. Еще меньший вклад дает образование атомов  $N$ , которые в результате химических реакций могут также приводить к появлению атомов  $O$ . (Этот канал оказывается важным в условиях барьерного разряда [13]).

Проведенное выше рассмотрение основано на предположении, что все молекулы  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  тушатся при столкновении с молекулой  $O_2$ . Оно заведомо нарушается при высоких концентрациях возбужденных частиц ( $\geq 1\%$  от концентрации молекул  $O_2$ ), когда их тушение возможно при взаимных столкновениях. Аналогичным образом могут действовать и другие образуемые в разряде

активные частицы, при столкновении с которыми эффективно тушатся метастабильные состояния молекулы  $M_2$ . Все это должно приводить к уменьшению суммарной скорости диссоциации молекул  $O_2$ .

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Tokunaga O., Suzuki N. // Radiat. Phys. Chem. 1984. v. 24. N 1. P. 145-165.
- [2] Busi F., D'Angelantonio M., Milazzani Q.G. et al. // Radiat. Phys. Chem. 1985. V. 25. N 1-3. P. 47-55.
- [3] Gallimberti I. // Pure Appl. Chem. 1988. V. 60. N 5. P. 663-674.
- [4] Борисов Н.Д., Гуревич А.В., Милих Г.М. Искусственная ионизованная область в атмосфере. М.: ИЗМИРАН, 1986. 184 с.
- [5] Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Кос-ский И.А., Костинский А.Ю. // ДАН СССР. 1988. Т. 302. № 3. С. 566-570.
- [6] Ларин В.Ф., Румянцев С.А. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 6. С. 87-90.
- [7] Куликов В.Н., Мицук В.Е. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 3. С. 233-236.
- [8] Александров Н.Л., Высикайло Ф.И., Исламов Р.Ш. и др. // ТВТ. 1981. Т. 19. № 1. С. 22-27.
- [9] Филиппов Ю.В., Вендилло В.П. // ЖФХ. 1962. Т. 36. № 9. С. 1987-1992.
- [10] Самойлович В.Г., Гибалов В.И. // ЖФХ. 1986. Т. 60. № 6. С. 1841-1853.
- [11] Силаков В.П. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 10. С. 1209-1213.
- [12] Tannuzzi M.P., Jeffries J.B., Kaufman F. // Chem. Phys. Lett. 1982. V. 87. N 6. P. 570-574.
- [13] Eliasson B., Kogelschatz V., Baessler P. // J. Phys. B. 1984. V. 17. N 22. P. L797-L801.

Поступило в Редакцию  
9 января 1990 г.