

04; 09

© 1993

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО СВЧ-РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ

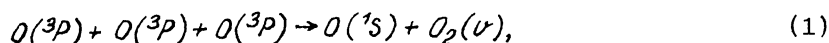
Н.А. Попов

Интерес к исследованиям состава воздушных смесей, возбужденных СВЧ-разрядом, определяется возможностями их использования в электроразрядных плазмохимических системах, при анализе перспектив создания радиоотражающих ионизованных областей в стратосфере [1], решении проблемы очистки атмосферы от фреонов [2] и других приложениях. Во всех этих задачах большое значение имеют времена жизни созданных плазменных образований.

В целом ряде экспериментальных работ (см., например, [2-4]) отмечалось существенное увеличение (по сравнению с временами рекомбинации) времени распада воздушной плазмы, созданной мощным импульсным СВЧ-разрядом. При этом распад носит не прилипательный, а рекомбинационный характер. В настоящей работе предлагается кинетическая модель, позволяющая описать эти явления. Отличительной особенностью этой модели является учет процессов ассоциативной ионизации с участием возбужденных атомов азота и кислорода.

При возбуждении азотно-кислородных смесей разрядами с высоким значением приведенного электрического поля ($E/N \geq 8 \times 10^{-16}$ В·см²) активно протекает диссоциация молекул кислорода. По данным [5, 6] степень диссоциации может достигать 30%. Атомы кислорода и колебательно-возбужденные молекулы азота являются основными долгоживущими резервуарами энергии и, следовательно, могут участвовать в процессах ассоциативной ионизации в послесвечении разряда.

Рекомбинация атомов кислорода происходит в известном трехчастичном процессе, приводящем к образованию молекул озона. Однако при высоких степенях диссоциации O_2 , которые реализуются в рассматриваемых условиях, становятся существенны реакции:



приводящие в итоге к образованию возбужденных атомов $O(^1S)$. Здесь O_2^* — электронно-возбужденные молекулы кислорода, M — произвольная молекула смеси.

В аэрономии давно исследуются эти процессы с целью определения основных каналов образования $O(^1S)$ в атмосфере. В [7] получены данные, свидетельствующие об определяющей роли реакций (2, 3) в образовании $O(^1S)$, причем $O_2^* = O_2(A^3\Sigma)$.

Атомы $O(^1S)$ далее могут участвовать в следующих процессах ассоциативной ионизации:

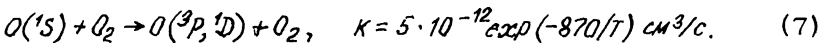
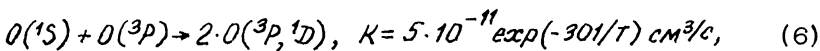


В [8] для константы скорости ассоциативной ионизации получено следующее выражение:

$$K(T) = \pi \cdot R_0^2 \sqrt{8kT/\pi \cdot \mu} \exp(-E_a/kT),$$

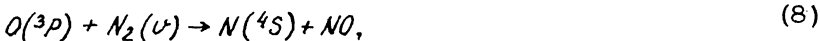
где μ — приведенная масса частиц, вступающих в реакцию, E_a — энергия активации, R_0 — расстояние до точки пересечения отталкивательного потенциала взаимодействия реагирующих частиц с потенциальной кривой образующегося иона (величина R_0 порядка 1 \AA). Для рассматриваемых процессов (4, 5) величина константы $K \approx \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^3/\text{с}$. Отметим, что эта величина хорошо согласуется с данными, полученными в [9] для аналогичных процессов с участием возбужденных атомов азота.

Тушение атомов $O(^1S)$ происходит в основном в реакциях:



Константы скоростей этих процессов приведены, в частности, в [7].

Основным источником атомов азота в послеразрядный период является реакция:



скорость которой существенно зависит от степени колебательного возбуждения молекул азота. В расчетах использовалась константа реакции, определенная в работе [10].

На рис. 1 приведены результаты расчетов эволюции состава смеси ($N_2 : O_2 = 4 : 1$), возбужденной СВЧ-разрядом с параметрами, соответствующими [2]. В экспериментах [2] микроволновое излучение (длина волны $\lambda = 2 \text{ см}$) фокусировалось в металлическую камеру. Поперечный размер фокального пятна составлял $2,5 \text{ см}$, мощность падающего излучения в фокусе $S = 125 \text{ кВт}$. Концентрация электронов определялась по поглощению диагностического излучения с длиной волны $\lambda = 8 \text{ мм}$.

При моделировании кинетических процессов в разряде, динамика электрического поля описывалась выражением:

$$E = E_0 / \sqrt{1 + (\omega_e^2 / \omega \cdot \nu_m)^2},$$

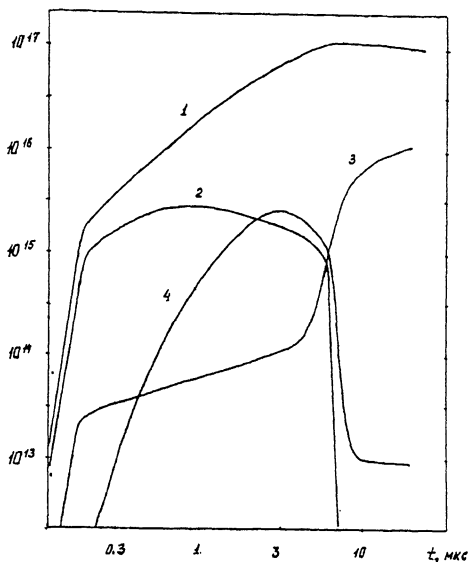
$N, \text{см}^{-3}$ 

Рис. 1. Динамика основных компонент смеси $N_2 : O_2 = 4:1$, возбужденной СВЧ-разрядом с параметрами: $\tau_{imp} = 6$ мкс, $E/N = 16 \cdot 10^{-16}$ В·см², $p = 54$ Тор [2]. 1 - $O(3p)$, 2 - $N_2(A^3\Sigma)$, 3 - $N(4S)$, 4 - $O(1S)$.

где ω_e — плазменная частота, ω — частота СВЧ-излучения, ω_m — эффективная частота столкновений электронов. Для условий эксперимента [2] поле начинает заметно меняться при $n_e \geq 10^{13}$ см⁻³.

Основным каналом диссоциации O_2 в разряде является тушение метастабильных молекул азота молекулами кислорода. В настоящей работе, в отличие от [6], кроме состояний $N_2(A^3\Sigma)$ и $N_2(B^3\Pi)$, рассмотрены синглетные и другие триплетные электронные состояния молекул азота, заселяемые электронным ударом. Возбуждение атомов $O(1S)$ в разряде происходит в реакциях тушения этих электронных состояний атомами кислорода, а в послеразрядный период в реакциях (1-3).

Следует отметить быстрый рост концентрации атомов азота $N(4S)$ после окончания разряда вследствие ускорения реакции (8) с ростом колебательного возбуждения азота. Атомы $N(4S)$ затем активно участвуют в процессах ассоциативной ионизации (5). В итоге образуются ионы NO^+ , которые определяют ионный состав и, соответственно, скорость рекомбинации в послеразрядный период. При образовании ионов азота и кислорода скорость рекомбинации контролируется реакцией с комплексными ионами O_4^+ несмотря на их разложение на атомах кислорода.

На рис. 2 приведены результаты сравнения экспериментальных данных [2] и соответствующих расчетов по модели с учетом опи-

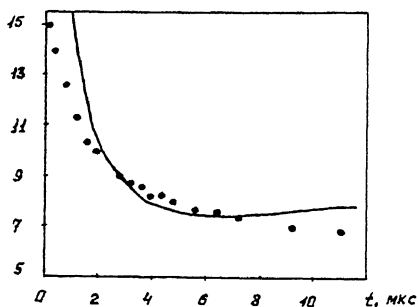


Рис. 2. Динамика концентрации электронов в послесвечении импульсного СВЧ-разряда; точки – экспериментальные данные [2], кривые – результаты расчета.

санных процессов ассоциативной ионизации и рекомбинации. Как видно результаты расчетов адекватно описывают данные эксперимента.

В работе [4] также получены результаты, свидетельствующие о медленном распаде плазмы СВЧ-разряда ($\lambda = 10$ см, $E = 5$ кВ/см, $P = 120$ Тор). Для объяснения этих данных авторам пришлось предположить наличие в зоне разряда термической ионизации и температур порядка 700 К. Наши расчеты с учетом реакций ассоциативной ионизации позволяют объяснить результаты [4]. При этом нагрев газа не превышает 400 К, что согласуется с измерениями [11].

Авторы ряда работ ([3] и другие) объясняют увеличение времени жизни созданной плазмы процессами отлипания электронов от отрицательных ионов, накопленных на начальном этапе распада. В рассматриваемых условиях ($P = 54$ Тор), при высоких концентрациях атомов кислорода в разряде, реакция трехчастичного прилипания электронов протекает существенно медленнее процессов отлипания на атомах кислорода и молекулах $O_2(\alpha'D_g)$. В этом случае процессы отлипания не могут определять увеличение времени жизни созданной плазмы.

Таким образом, как показали проведенные исследования, при высоких степенях диссоциации кислорода, реализующихся в большинстве рассматриваемых экспериментов, распад носит рекомбинационный характер с преобладанием молекулярных (некомплексных) ионов. Увеличение времени жизни плазмы определяется активным протеканием процессов ассоциативной ионизации с участием возбужденных атомов азота и кислорода. Результаты расчетов хорошо воспроизводят имеющиеся экспериментальные данные и могут быть использованы при анализе режимов работы тех устройств, где существенны времена распада созданной плазмы (например [1, 2]).

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что предложенная модель ассоциативной ионизации в воздухе идеологически близка соответствующей модели в „розовом” послесвечении разрядов в азоте [9], где рекомбинация атомов азота также приводит в итоге к образованию метастабильных атомов $N(2P)$. Реакции с участием последних определяют динамику вторичной ионизации в процессах, аналогичных (4, 5).

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Борисов Н.Д., Гуревич А.В., Милих Г.М. Искусственная область в атмосфере. М.: ИЗМИРАН, 1985. 184 с.
- [2] Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Бархударов А.Э. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 9. С. 1198-1210.
- [3] Вихарев А.Л., Иванов О.А., Степанов А.Н. // Физика плазмы. 1984. Т. 10. № 4. С. 792-800.
- [4] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 10. С. 149-154.
- [5] Куликов В.Н., Мицук В.Е. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 3. С. 233-236.
- [6] Александров Н.Л., Кончаков А.М. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 6. С. 4-7.
- [7] Stott I.P., Thrush B.A. // Proc. R. Soc. Lond. 1989. A 424. P. 1-17.
- [8] Динамика физико-химических процессов в газе и плазме. Справочник. Центр АВОГАДРО НИИ Механики МГУ. 1993. (в печати).
- [9] Popov N.A. // Proc. XI-th ESCAMPIG / Ed. L. Tsendin. St. Petersburg. 1992. P. 93-94.
- [10] Дмитриева И.К., Жданок С.А., Зеневич В.А. // Препринт ИТМО АН БССР, № 24. Минск. 1985. 37 с.
- [11] Александров А.Ф., Кузовников А.А., Шибков В.М. // Инженерно-физический журнал. 1992. Т. 62. № 5. С. 726-732.

Поступило в Редакцию
22 марта 1993 г.