

## СКОРОСТЬ ДИССОЦИАЦИИ МОЛЕКУЛ КИСЛОРОДА В ИМПУЛЬСНОМ СВЧ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ

В.Н. Куликов, В.Е. Мицук

В СВЧ разрядах получены наиболее высокие показатели энергетической эффективности таких плазмохимических процессов, как диссоциация  $CO_2$ ,  $H_2O$ , синтез окислов азота и др. Условия протекания СВЧ разряда характеризуются высокими значениями концентрации электронов  $10^{11}-10^{13} \text{ см}^{-3}$ , высокой степенью неравновесности ( $T_e \gg T_v \gg T_g$ ), достижением больших энерговкладов и отсутствием электродов [1, 2]. Плазмохимическую активность разряда определяет удельный энерговклад, который в разряде постоянного тока связан с газоразрядным параметром  $E/N$ .

Для СВЧ разряда вместо  $E/N$  можно использовать эффективное электрическое поле  $E_{эфф} = \frac{E_0}{\sqrt{2\sqrt{1+\omega^2/\nu^2}}}$  [2], где  $E_0$  - амплитуда

СВЧ поля в плазме,  $\omega$  - частота поля,  $\nu$  - эффективная частота электрон-нейтральных столкновений (для воздуха  $\nu = 1.7 \cdot 10^{-7} \cdot N \text{ см}^3/\text{с}$ , где  $N$  - концентрация нейтральных частиц [3]).

В настоящей работе экспериментально определяется эффективный коэффициент скорости диссоциации молекул кислорода в импульсном СВЧ разряде в воздухе в зависимости от  $E_{эфф}/N$ . Разряд возбуждался в кварцевой колбе диаметром 3 см и длиной 9 см, помещенной около волноводного рупора сечением  $72 \times 34 \text{ мм}^2$ , магнетронным генератором с длиной волны  $\lambda = 2.2 \text{ см}$ . Длительность СВЧ импульса 5-30 мкс, частота повторения 10-30 Гц, давление 2-18 Тор.

Концентрация атомарного кислорода в разряде определялась по отношению интенсивностей линии  $O(3p^3P-3s^3S)$  и электронно-колебательной полосы  $N_2(C^3\Pi_u, v=0-B^3\Pi_g, v_i)$  [4]. Поперечная по отношению к потоку падающей СВЧ мощности симметрия позволяла одновременно регистрировать интенсивности излучения с обоих торцов разрядной трубки из зоны однородного свечения. При определении концентрации атомов кислорода учитывалось колебательное возбуждение молекул азота. Для определения заселенности нижних колебательных уровней основного состояния молекулы азота исследовалось распределение интенсивностей электронно-колебательных полос второй положительной системы азота  $N_2(C^3\Pi_u-B^3\Pi_g)$ . К концу СВЧ импульса длительностью  $\tau = 30 \text{ мкс}$  степень диссоциации молекул кислорода достигала 10-30%; к этому моменту времени температура для нижних колебательных уровней молекулы  $N_2(X^1\Sigma_g^+)$  соответственно составляла  $T_v = (5-7) \cdot 10^3 \text{ К}$ . Учитывая, что процессы гибели атомов кислорода во время ионизирующего импульса происходят медленнее диссоциации молекул  $O_2$ , можно по зависимости  $[O(t)]$  определить эффективный коэффициент скорости дис-

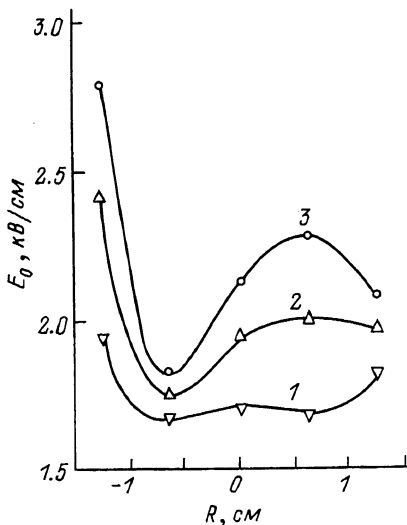


Рис. 1. Пространственное распределение амплитуды напряженности СВЧ поля в плазме (СВЧ мощность падает слева;  $R=0$  соответствует центру разрядной трубки):

1 -  $\tilde{E}_0 = 1.5$  кВ/см, 2 - 2.7 кВ/см, 3 - 3.8 кВ/см ( $\tilde{E}_0$  - амплитуда напряженности „холодного” поля).

социации молекул  $O_2$  в СВЧ разряде и количественно сопоставить полученный результат с известными данными для разряда на постоянном токе [5, 6]. С этой целью осуществлялся контроль амплитуды напряженности СВЧ поля

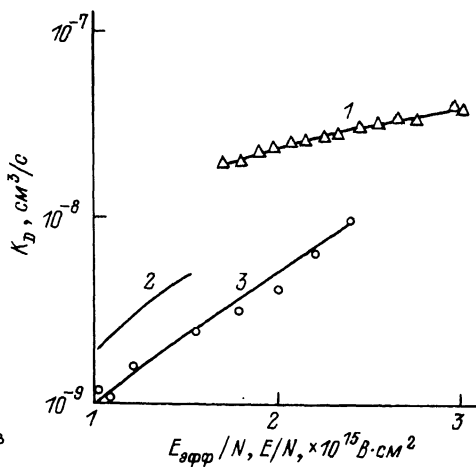
в плазме и концентрации электронов во время СВЧ импульса.

Амплитуда напряженности электрического поля определялась по неразрешенной структуре линии  $H_{\beta}$  атома водорода, формирующейся при микроволновом эффекте Штарка в регулярном внешнем электрическом поле [7]. Необходимое для надежной регистрации количество атомарного водорода в разряде образовывалось в результате диссоциации малых примесей паров в основном газе, процентное содержание которых может достигать величины 10-2-1% [8]. Ширина структуры линии водорода определялась на уровне 0.3 максимума в центре линии и сопоставлялась с теоретическими расчетами линейного приближения, учитывающими аппаратную функцию спектрального прибора.

На рис. 1 представлено пространственное распределение вдоль радиуса трубки амплитуды напряженности СВЧ поля в плазме при фиксированной величине „холодного” поля  $\tilde{E}_0$  ( $\tilde{E}_0$  - усредненная по сечению волноводного рупора амплитуда напряженности СВЧ поля, определенная в отсутствие разряда по падающей мощности). Измерения мощности СВЧ излучения проводились с помощью детектора, находящегося в канале ответвления падающей мощности и прокалиброванного калориметрическим измерителем мощности МЗ-13-1. Пространственное разрешение составляло  $\sim 0.5$  см. Приведенное распределение вдоль радиуса разрядной трубки величины поля отличается от однородного и определяется взаимодействием образовавшейся в колбе плазмы и поддерживающего СВЧ пучка. В пределах экспериментальной ошибки в каждой точке пространства наблюдалась линейная зависимость амплитуды напряженности в плазме от напряженности „холодного” поля.

Средняя концентрация электронов в разряде определялась 8 мм микроволновым интерферометром и изменялась в пределах  $(1-8) \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup>.

Рис. 2. Зависимость эффективного коэффициента скорости диссоциации молекул от газоразрядного параметра  $E/N$ : 1 – результаты данной работы, 2 – расчет [5], 3 – эксперимент на постоянном токе [6].



Характерный размер диагностируемой области объекта внутри разряда в условиях эксперимента был существенно больше диффузионного пробега электронов и атомов кислорода

( $\Delta l \gg \sqrt{D_a^e/\nu_a}, \sqrt{D_o\tau}$ , где  $D_a^e$ ,  $D_o$  – коэффициенты амбиполярной диффузии электронов и диффузии атомов кислорода;  $\nu_a$  – частота прилипания электронов;  $\tau$  – длительность СВЧ импульса), чем обеспечивался режим локальности параметров плазмы, измеряемых оптическими и микроволновыми методами. Последний факт делает возможным сопоставить полученные данные и определить эффективный коэффициент скорости диссоциации молекул кислорода  $k_D$ . На рис. 2 представлен  $k_D$  в функции  $E_{эфф}/N$  в диапазоне  $(1.5-3) \times 10^{-15}$  В·см<sup>2</sup>. Для сопоставления на том же рисунке приведены результаты теоретического расчета для смеси  $O_2:N_2$  1:4 [5] и эксперимента, взятого из [6]. Анализ показывает, что диссоциация происходит при столкновении молекулы кислорода в основном состоянии  $X^3\Sigma_g^-$  с электроном через образование состояний  $B^3\Sigma_u^-$ ,  $C^1\Sigma_u^-$ ,  $A^3\Sigma_u^+$  [6].

Авторы выражают благодарность А.С. Зарину, Н.В. Чаенковой за помощь при проведении расчета калибровочной кривой штарковского уширения.

## Л и т е р а т у р а

- [1] Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы, М.: Наука, 1984. 416 с.
- [2] Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов, М.: Наука, 1980. 416 с.
- [3] Борисов Н.Д., Гуревич А.В., Милых Г.М. Искусственная ионизированная область в атмосфере, М.: ИЗМИРАН, 1985. 184 с.
- [4] Зарин А.С., Куликов В.Н., Мицук В.Е. – Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 19, с. 1186-1190.
- [5] Masеk K. J. Phys., 1984, В-34, р. 655-664.

- [6] Исламов Р.Ш., Кочетов И.В., Певгов В.Г. – Препр. ФИАН СССР, № 169, М., 1977. 49 с.
- [7] Мицук В.Е. – ЖТФ, 1958, т. 28, в. 6, с. 1316–1325.
- [8] Мак-Ивен М., Филлипс Л. Химия атмосферы, М.: Мир, 1978. 375 с.

Московский государственный  
университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию  
15 сентября 1987 г.  
В окончательной редакции  
6 ноября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 3

12 февраля 1988 г.

### О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ УСТОЙЧИВОЙ ИСПАРИТЕЛЬНО-КОНДЕНСАЦИОННОЙ ТЕПЛОТДАЧИ В ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕЙСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

В.В. Аполлонов, В.П. Гамарский,  
В.И. Манкеев, А.Н. Поманский,  
А.М. Прохоров, С.Н. Темнов,  
В.А. Хмара, С.А. Четкин

Исследование процессов кипения в пористых материалах является актуальной задачей – с использованием таких структур связывается возможность достижения предельно высоких уровней теплоотдачи [1]. Анализ испаряющегося потока внутри нагреваемого пористого материала [2] показывает, что необходимым условием для интенсификации теплообмена является требование высокой гидравлической проницаемости структуры для парожидкостного потока теплоносителя. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют высокопористые ячейстые материалы (ВПЯМ), получаемые путем металлизации пенополиуретана. Структурное строение ВПЯМ имеет важное значение для понимания характерных особенностей интенсификации процессов тепломассопереноса. В ВПЯМ ячейки в среднем однотипны и представляют полиэдры с полостями, близкими к вытянутому эллипсоиду вращения (эксцентриситет 1.1–1.3), при этом большие оси всех ячеек ориентированы в направлении вспенивания пенополиуретана (рис. 1, а). Укладка ячеек ВПЯМ близка к плотной упаковке – у каждой ячейки в среднем 12 ближайших соседей; средняя длина ребра составляет 0.4 среднего диаметра ячейки. Ячейки ВПЯМ соединены между собой через „окна“, максимальный размер которых составляет 0.6 диаметра ячейки. Структура ВПЯМ представляет собой матричный каркас из трехгранных перемычек, являющихся ребрами граней ячеек, перемычки своими концами закреплены в узлах – в каждом узле сходится по 4 перемычки, каждый узел принадлежит четырем, а перемычки – трем ячейкам. Такая связность обеспечивает высокие жесткость и гидравлическую проницаемость ВПЯМ. В настоящее время такие структуры реализованы практически на основе всех металлов и сплавов, используемых в технике,