

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА В АТМОСФЕРЕ $N_2$ И СМЕСЯХ $N_2$ С ГЕЛИЕМ

В.В.Ажаронок, И.И.Филатова, В.Д.Шиманович, Л.Н.Орлов\*,  
Я.И.Некрашевич\*

*Институт молекулярной и атомной физики АНБ*

*\*Институт физики АНБ*

*220072, Минск, пр.Ф.Скарины, 70, Беларусь*

*E-mail: imafbel%bas05.basnet.minsk.by@demos.su*

Abstract. The gas temperature fields of  $N_2$  and  $N_2+He$  plasma of HF-discharge at a low pressure was investigated by the methods of emission spectroscopy. The gas temperature evolution was studied depending on chemical composition and pressure of working mixture. Main channels of heating of plasma's neutral component was determined.

### 1. ВВЕДЕНИЕ.

Плазма высокочастотного емкостного разряда является перспективной рабочей средой  $CO_2$  и  $CO$ -лазеров, устройств ионно-плазменной модификации поверхности материалов, плазмохимического синтеза новых типов веществ и соединений. Эффективность аккумуляции энергии электрического поля в электронных, колебательных и вращательных степенях свободы частиц генерируемой ВЧ-плазмы, а также скорость протекающих в ней плазмохимических реакций во многом зависят от потерь подводимой к разряду электрической мощности на нагрев нейтральной компоненты плазмы. Исследования процессов диссипации в тепло вкладываемой в ВЧ-разряд мощности практически отсутствуют (Райзер и др., 1995). Настоящая работа посвящена исследованию полей газовой температуры в межэлектродном промежутке ВЧ-разряда в смесях молекулярных и атомных газов и выяснению наиболее вероятных каналов диссипации подводимой к разряду электрической энергии в тепловую.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследуемый высокочастотный емкостной разряд возбуждался на частоте 81 МГц между двумя изолированными плоскими алюминиевыми электродами прямоугольной формы площадью  $20\text{ см}^2$ , расположенными параллельно друг другу на расстоянии  $L=3\text{ мм}$ . Одна из пластин электродной системы была заземлена. ВЧ-напряжение подавалось на

незаземленный электрод. В качестве рабочих газов использовались азот, гелий и их смеси при давлениях от 1 до 20 Торр. Регистрация спектров излучения плазмы осуществлялась с помощью дифракционного монохроматора в диапазоне длин волн  $\Delta\lambda=250 - 700$  нм с разрешением по спектру  $\delta\lambda\sim 0,001$  нм. Пространственное разрешение  $\delta L$  составляло  $\sim 0,1$  мм. Температура нейтральной компоненты  $T_g$  плазмы определялась по относительным интенсивностям вращательных линий  $I_{j',j''}$  в спектрах излучения электронно-колебательных полос молекул азота.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследуемом диапазоне  $\Delta\lambda$  спектры излучения плазмы разряда в чистом азоте представлены преимущественно полосами второй положительной (2+) и первой (1+) положительной систем  $N_2$ , первой отрицательной (1-) системы  $N_2$ , а также слабоинтенсивными полосами молекул примесей ( $\beta$ - и  $\gamma$ -системы NO, интенсивная система OH с  $\lambda = 3064$  Å,  $\beta$ -система VO). В смесях  $N_2+He$  наблюдаются также интенсивные линии атомов водорода и гелия. В качестве пирометрических использовались свободные от переналожения с другими излучающими компонентами плазмы полосы секвенций  $V' - V'' = 0-3, 0-2$  и  $0-1$  2+ системы  $N_2$ . Линейный характер зависимости измеренных величин  $\ln(I/S)_{j',j''}$  ( $S_{j',j''}$  - факторы Хенля-Лондона) от энергии вращательных уровней  $j'(j'+1)$  в исследуемых молекулярных полосах свидетельствует о больцмановском распределении по уровням  $j'$  молекул  $N_2$  в состоянии  $C^3\Pi_u$  с вращательной температурой  $T_{rot}$  (рис.1).

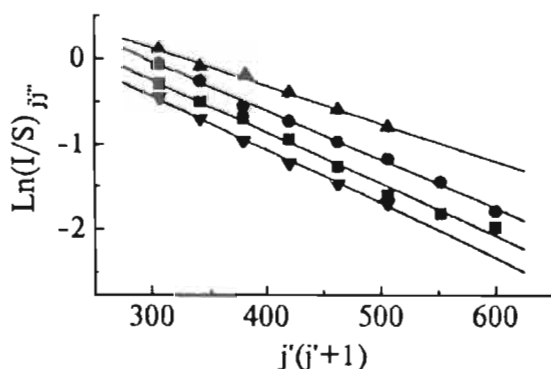


Рис. 1. Зависимость  $\ln(I/S)_{j',j''}$  от  $j'(j'+1)$  в полосах 2+ системы молекулы  $N_2$ :  $T_{rot} = 400$  (▼); 420 (■); 450 (●); 500 К (▲).

Возможность отождествления  $T_{\text{tot}}$  с  $T_g$  следует из соотношения времен жизни ( $\tau_c$ ) возбужденного электронного состояния  $C^3\Pi$  молекулы  $N_2$  с учетом его тушения при межмолекулярном взаимодействии и времен вращательной R-T-релаксации ( $\tau_{RT}$ )  $N_2$  в состоянии  $C^3\Pi$ :  $\tau_c/\tau_{RT} \gg 5$  (Ажаронк и др., 1991). Измеренные распределения температуры  $T_g(L)$  в разряде в чистом  $N_2$  при  $P=1-20$  Торр и в смеси  $N_2:He = 1:10$  ( $P=11$  Торр) приведены на рис. 2.

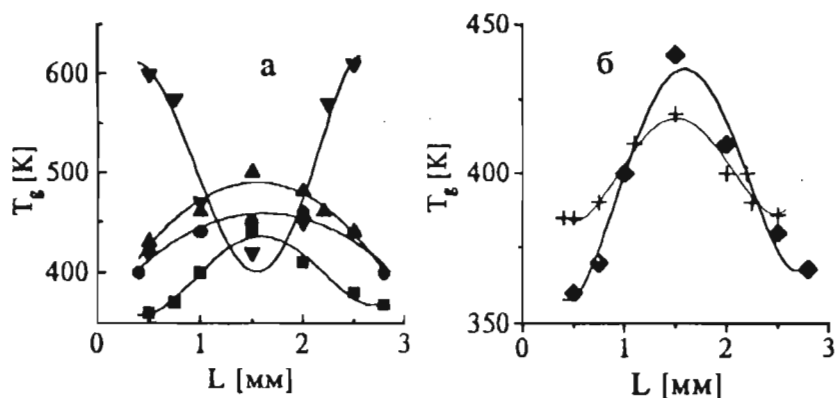
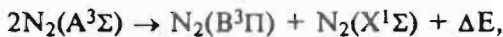


Рис. 2. Распределение температуры  $T_g$  вдоль межэлектродного промежутка: а - чистый  $N_2$ ,  $P = 1$  Торр (■), 5 Торр (●), 10 Торр (▲), 20 Торр (▼); б - смесь  $N_2:He=1:10$ ,  $P=11$  Торр (+), 1 Торр (◆-чистый  $N_2$ ).

В разряде в чистом азоте при  $P \leq 10$  Торр максимум температуры наблюдается в центральной зоне  $L_{\text{ц}}$  межэлектродного промежутка (рис.2, а). С увеличением давления от 1 до 10 Торр температура в центре РК возрастает от 430 до 500 К. При этом значение  $T_g$  вблизи электродов практически не изменяется и не превышает 400 К. Дальнейшее увеличение давления азота в РК до 20 Торр приводит к существенной трансформации распределения  $T_g(L)$ : в области  $L_{\text{ц}}$  температура снижается до  $\sim 400$  К, а максимальные значения  $T_g \sim 600$  К наблюдаются в зонах, граничащих с приэлектродными слоями  $L_3$  нескомпенсированного пространственного заряда. При добавлении к азоту гелия распределение  $T_g(L)$  и абсолютные значения  $T_g$  практически не изменяются (рис.2, б). В исследуемом диапазоне давлений профили  $T_g(L)$  и  $I(L)$  подобны: наибольшие значения температуры наблюдаются в зонах с максимальной интенсивностью свечения  $I^{\text{max}}$ . Из расчета баланса энергии электронов в

плазме газового разряда в чистом азоте установлено, что в условиях, подобных реализующимся в исследуемом разряде (приведенная напряженность электрического поля  $E/N \sim (5-6) \cdot 10^{16}$  В·см<sup>2</sup>), до 50% вкладываемой в разряд электрической энергии  $W$  расходуется на возбуждение колебательных уровней молекул  $N_2$  в основном электронном состоянии  $X^1\Sigma$  (Lovke и др., 1973). Другая часть энергии  $W$  тратится на электронное возбуждение, ионизацию и диссоциацию молекул. Доминирующим среди этих процессов является возбуждение молекул  $N_2$  в состоянии  $C^3\Pi$ ,  $V^3\Pi$  и  $A^3\Sigma$  (Zhang и др., 1993). Разрушение состояний  $V^3\Pi$  и  $C^3\Pi$  при давлениях 1-10 Торр осуществляется главным образом путем радиационного распада с излучением светового кванта, а дезактивация метастабилей  $A^3\Sigma$  происходит в основном в результате парных столкновений



сопровождающихся выделением в тепло энергии  $\Delta E$  (Словецкий, 1980). Таким образом, регистрируемое в зонах с  $\Gamma^{\max}$  (примыкающих к приэлектродным слоям  $L_3$ ) значительное повышение температуры нейтральной компоненты плазмы связано, наряду с дезактивацией колебательных состояний  $N_2(X, V'')$ , с процессами самотушения молекул  $N_2$  в метастабильном состоянии  $A^3\Sigma$ . Существенный вклад в нагрев плазмы при наличии в РК примеси молекул  $H_2O$  могут дать также процессы образования радикалов гидроксила  $OH$



протекающие через возбужденное электронное состояние  $H_2O(V^1\Sigma)$ , которое обладает избытком деформационной колебательной энергии, частично выделяющейся в тепло (Очкин и др., 1985).

### Литература

- Ажаронок В.В., Антипов Е.С., Скутов Д.К., Филатова И.И., Чубрик Н.И., Шиманович В.Д.: 1991, Теплофизика высоких температур, 29, 401.  
 Очкин В.Н., Савинов С.Ю., Соболев Н.И.: 1985, Труды ФИАН, 157, 6.  
 Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А.: 1995, "Высокочастотный емкостной разряд", Наука: Физматлит, Москва.  
 Словецкий Д.И.: 1980, "Механизмы химических реакций в неравновесной плазме", Наука, Москва.  
 Lovke I.I., Phelps A.V.: 1973, J.Appl.Phys., 44, 4664.  
 Zhang X.S., Baker H.J., Hall D.R.: 1993, 26, 359.