

ЭФФЕКТ УВЕЛИЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ПЛАЗМЫ
ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ВОЗДУХЕС.Ф. Б а л а н д и н, Ю.Д. К о п ы т и н,
Л и т н е в с к и й Л.А., Т ю л ь к и н И.С.,
Х а н В.А., Ю д а н о в В.А.

Экспериментальные исследования плазмы оптического пробоя выполнялись на установке, описанной в [1]. Оптический пробой инициировался CO_2 лазером с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм и длительностью импульса 1 мкс [2]. Температура воздуха изменялась в диапазоне от 14 до 30 °С, а влажность от 35 до 99.9%. За время жизни плазмы τ принималось время, в течение которого концентрация электронов падала до значения 10^9 см^{-3} .

Установлено, что при фиксированных значениях влажности время жизни плазменного образования (ПО) $\tau \approx 0.35$ мс и существенно не зависит от температуры воздуха в диапазоне 14–30 °С. Это связано с тем, что давление насыщающих паров меняется незначительно и не превышает 3% [3], в то время как измерение τ велось с точностью не хуже 15%.

Экспериментальные результаты по определению влияния влажности на время жизни ПО показали (рис. 1), что зависимость имеет резонансный характер. Увеличение τ наблюдается при $\varphi \approx 93.5\%$ и, достигая максимального значения (при $\varphi = 97.2\%$), резко уменьшается. Если при $\varphi = 97.2\%$ $\tau \approx 8$ мс, то при $\varphi = 99.5\%$ $\tau \approx 0.4$ мс. В момент времени $\tau = 0.2$ мс концентрация электронов $N_e = 5.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, а частота столкновений электронов с нейтральными атомами $\nu = 1.2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. Изменение концентрации электронов и частоты столкновений при распаде плазмы после $\tau = 0.2$ мс представлено на рис. 2.

Увеличение времени жизни плазмы оптического пробоя может быть обусловлено: термохимическими и фотохимическими реакциями, приводящими к образованию возбужденных атомов и молекул, таких как O_2^* , N_e^* , O^* , N^* и др., обладающих сравнительно большим временем жизни [3, 4].

Учесть все виды реакций, происходящих в плазме, чрезвычайно трудно. Поэтому для оценки заселенности уровней используем формулу Больцмана:

$$n_b = n_0 \frac{g_1}{g_2} e^{-\frac{E_b}{kT}},$$

где g_1 и g_2 – статистические веса уровней, n_0 – начальная концентрация. В таблице приведены данные по расчету концентрации возбужденных частиц n_b в плазме при различных температурах.

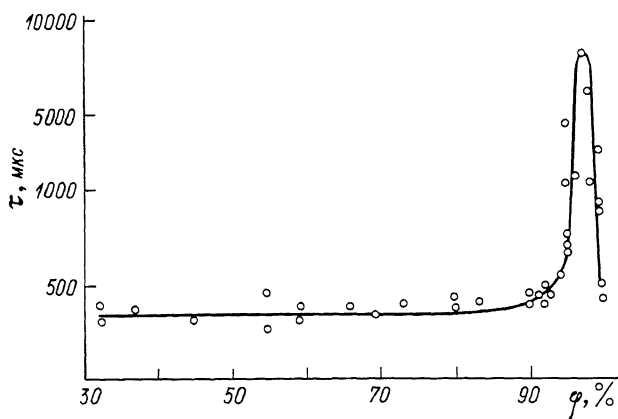


Рис. 1. Зависимость времени жизни плазмы оптического пробоя от влажности воздуха.

Т а б л и ц а

Концентрация возбужденных компонент при различных температурах

$n_0, \text{см}^{-3}$	T, K			
	300	3700	5500	11000
O_2	10^{19}			
N_2	$4 \cdot 10^{19}$			
$O(^1D)$		$4.1 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^{12}$	$2.5 \cdot 10^{16}$
$O(^1S)$		$3.3 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^{10}$	$9.5 \cdot 10^{14}$
$N(^2D)$		10^2	10^9	$2 \cdot 10^{14}$
$N(^2P)$		2.5	10^8	$6 \cdot 10^{13}$
$O_2(\alpha^1\Delta_g)$		$0.4 \cdot 10^{18}$	$1.5 \cdot 10^{18}$	$0.4 \cdot 10^{19}$
$O_2(b^1\Sigma_g^+)$		$4.4 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{18}$
$N_2(A^3\Sigma_u^+)$		$8 \cdot 10^{10}$	$1.6 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{16}$
$N_2(\alpha^1\Sigma_u^-)$		$2.8 \cdot 10^7$	$1.64 \cdot 10^{12}$	$8.4 \cdot 10^{15}$

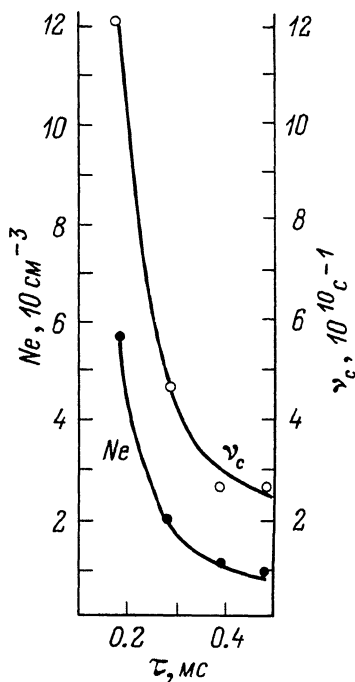
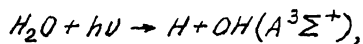
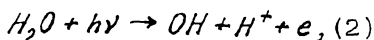


Рис. 2. Изменение концентрации электронов (Δ) и частоты столкновений (\circ) при распаде плазменного образования спустя 0.2 мс после ее возникновения.

Из расчетов видно, что наибольшая энергия накапливается возбужденными молекулами кислорода, общая энергия, накопленная на возбужденных метастабильных уровнях при $T = 11000 \text{ K}$, оценивается величиной порядка 1 Дж/см^3 . При наличии паров воды в плазме возможны следующие реакции:



$$\lambda < 1357 \text{ \AA}, \quad (1)$$



Состояние $A^3\Sigma^+$ для OH метастабильно с временем жизни $6.4 \cdot 10^{-2} \text{ с}$. Реакции (2) и (3) могут сопровождаться генерацией электронов, способствуя поддержанию плазмы. Однако такой процесс возможен только при наличии достаточно энергичных фотонов, то есть в сравнительно горячей плазме. Для холодной плазмы будет характерен обратный процесс:

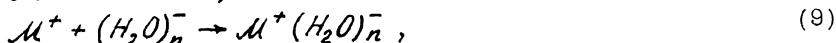


с образованием кластерных ионов [4].

Процесс скачкообразного увеличения электронной концентрации при достаточно высокой влажности может быть связан с эффектом конденсации и образования кластерных ионов в перенасыщенных парах воды. В этом случае в „холодной“ плазме замедляется реакция (4), что вызывает уменьшение спада N_e . Образовавшиеся кластерные соединения могут изменить также и коэффициент ионной рекомбинации [4].

Таким образом, при прилипании части электронов к молекулам воды и кластерным системам, образованным при охлаждении, образуются ионы с отрицательным суммарным зарядом, которые рассеивают электроны, уменьшая в целом коэффициент рекомбинации.

Положительные ионы также недостаточно хорошо рекомбинируют с электронами из-за их низкой плотности. Кроме того, эти ионы „захватываются“ кластерными ионами, а образующийся комплекс имеет более низкий коэффициент рекомбинации, чем первоначальный. Сказанное в упрощенном виде поясняется реакциями:



где (5) - образование кластерных ионов или начало конденсации, (6) - прилипание электронов к молекулам H_2O , (7) - прилипание электрона к кластерному иону H_2O , (8) - рекомбинация ионов и электронов в плазме, (9) - рекомбинация положительных ионов и кластерных ионов H_2O . В результате возрастания скорости реакции (9) (из-за образования $(H_2O)_n^-$) уменьшается скорость реакции (8), что способствует увеличению времени жизни плазменного образования. Кроме этого, указанный эффект может быть обусловлен резервированием энергии на метастабильных уровнях исходного ПО с последующим использованием высвобождающейся энергии на поддержание ионизации [1, 3], или же образованием „холодной“ аэрозольной плазмы за счет адсорбции зарядов на частицах аэрозолей или переконденсации воды на ионах в процессе охлаждения первичной плазмы молекулами воды [5].

Л и т е р а т у р а

- [1] Б а л а н д и н С.Ф. и др. Деп. № 2111-В87, от 24.03.87 г.
- [2] Б ы ч к о в Ю.И., О р л о в с к и й В.М., О с и - п о в В.В. Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 11, с. 2435-2441.
- [3] О к а б е Х. Фотохимия малых молекул. М.: Мир, 1981. 500 с.
- [4] С м и р н о в Б.М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974, 456 с.
- [5] К о п ы т и н Ю.Д., П р о т а с е в и ч Е.Т., Х а н В.А. В сб.: Нелинейное взаимодействие мощного лазерного излучения с твердым аэрозолем. Барнаул, 1986, с. 107-116.

Институт оптики атмосферы
АН СССР, Томск

Поступило в Редакцию
6 августа 1987 г.