

04:07

©1994 г.

## РЕЛАКСАЦИЯ ПЛАЗМЫ ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА В ИМПУЛЬСНЫХ CO<sub>2</sub> И ХеСІ ЛАЗЕРАХ

*В.В.Лисенков, В.В.Осипов*

Институт электрофизики, 620219, Екатеринбург

(Поступило в Редакцию 19 августа 1993 г.)

В окончательной редакции 9 февраля 1994 г.)

Рассматривалась релаксация плазмы объемного разряда для сред CO<sub>2</sub> и ХеСІ лазеров давления  $\sim 1$  атм. При этом было проведено сравнение хода рекомбинационных процессов в плазме с начальной концентрацией электронов  $10^{14} - 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, типичной для разряда, и  $10^{16} - 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, типичной для неоднородностей в разряде. Показано, что повышение начальной концентрации электронов до уровня  $10^{16} - 10^{17}$  см<sup>-3</sup> качественно меняет процесс релаксации плазмы в среде CO<sub>2</sub> лазера. Результаты расчетов дают основание считать, что неоднородность концентрации электронов может сохраняться в плазме CO<sub>2</sub> лазера вплоть до  $\sim 10^{-5}$  с, а в плазме ХеСІ лазера — до  $\sim 10^{-6}$  с. Отмечено также, что концентрация заряженных частиц в обеих средах к моменту времени  $\sim 10^{-5}$  с составляет величину  $\sim 10^{11}$  см<sup>-3</sup>.

### Постановка и метод решения задачи

Проблема создания лазеров, возбуждаемых цугом импульсов с частотой следования  $\sim 10^5 - 10^7$  Гц, наталкивается на ряд серьезных трудностей, обусловленных прежде всего контракцией объемного разряда [1]. При этом образование канала на любом из импульсов после первого происходит, как правило, на стадии формирования разряда. Это указывает на то, что к моменту подачи на межэлектродный промежуток высоковольтного импульса не завершился процесс релаксации плазмы, образованной предыдущим импульсом. В частности, не успевают исчезнуть неоднородности в распределении концентрации заряда по объему, которые, как правило, всегда имеют место в плазме разряда (например, из-за наличия катодного пятна). Это может служить причиной неоднородного начального распределения поля, а значит, и причиной образования канала на ранней стадии разряда.

Оценки релаксации плазмы с учетом ионов только основных компонент активной среды показывают, что спустя  $\sim 10^{-7}$  с концентрация

объемных зарядов в основном объеме и неоднородностях должна выравниваться. Ясно, что такой подход не может объяснить экспериментальные факты и требуется учет более широкого набора плазмохимических реакций.

Целью настоящей работы является анализ кинетики процессов релаксации плазмы с различной начальной концентрацией зарядов при учете широкого набора плазмохимических реакций в активных средах  $\text{CO}_2$  и  $\text{XeCl}$  лазеров как наиболее мощных и широко используемых.

Ранее в ряде работ [2-5] были проведены достаточно подробные численные исследования плазмохимических процессов в  $\text{CO}_2$  и  $\text{XeCl}$  лазерах. Однако эти работы были в основном ориентированы на оптимизацию состава рабочей смеси газов для улучшения ее излучательных характеристик или уменьшения скорости ее деградации. Поэтому в них не уделялось достаточного внимания релаксации плазмы, особенно при повышенных концентрациях заряда.

Известно, что в сильноточных объемных разрядах средняя концентрация зарядов составляет величину  $\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Однако в таких разрядах, как правило, существуют отдельные зоны в виде диффузных нитей, катодных пятен или неполностью развитых каналов, в которых концентрация электронов может достигать  $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Поэтому представляет интерес проследить, как после прекращения действия электрического поля релаксирует плазма в этих зонах. При этом важно выяснить, в какой момент времени концентрация плазмы выравнивается и наличие объемного заряда не приведет к поперечному искажению поля в промежутке при подаче на него последующего импульса напряжения.

Решение задачи производилось последовательно в два этапа. На первом этапе моделировался процесс создания в постоянном электрическом поле плазмы с концентрацией заряда (электронов)  $10^{14}$ ,  $10^{15}$ ,  $10^{16}$  и  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Для создания концентраций  $10^{14}$  и  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  величина  $E/P$  ( $E$  — напряженность поля,  $P$  — давление газа) задавалась 25 кВ/см·атм в среде  $\text{CO}_2$  лазера и 5 кВ/см·атм в среде  $\text{XeCl}$  лазера. Эти величины близки к экспериментальным значениям [6,7]. Для создания концентраций  $10^{16}$  и  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  величина поля полагалась в 5 раз больше, поскольку неоднородности в разряде формируются, как правило, в областях усиленного поля. На втором этапе рассчитывалось поведение компонент плазмы во времени в отсутствие электрического поля после достижения заданной концентрации электронов. Оценки показали, что достаточно корректно вкладом диффузии в процесс выравнивания концентрации заряда можно пренебречь.

Система дифференциальных уравнений для компонент решалась методом Розенброка 3-го порядка точности [8]. Функция распределения электронов по энергиям, необходимая для вычисления ряда констант скоростей реакций, определялась с помощью уравнения Больцмана [9].

## Релаксация плазмы в $\text{CO}_2$ лазере

Применительно к проблеме создания  $\text{CO}_2$  лазеров исследовалась релаксация плазмы в смеси  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 3$  атмосферного давления с температурой 300 К.

Таблица 1. Реакции для среды CO<sub>2</sub> лазера

Номер	Реакция	Коэффициент скорости	Ссылка
1	2	3	4
Ионизация			
1	$N_2 + e \rightarrow N_2^+ + 2e$		Уравнение Больцмана
2	$He + e \rightarrow He^+ + 2e$		То же
3	$NO + e \rightarrow NO^+ + 2e$		» »
4	$NO_2 + e \rightarrow NO_2^+ + 2e$		» »
5	$N_2O + e \rightarrow N_2O^+ + 2e$		» »
Диссоциативное прилипание			
6	$NO + e \rightarrow N + O^-$		» »
7	$NO_2 + e \rightarrow NO + O^-$		» »
8	$N_2O + e \rightarrow N_2 + O^-$		» »
Ассоциативный отрыв			
9	$O^- + N_2 \rightarrow N_2O + e$	$1.0 \cdot 10^{-12}$	[4]
10	$O^- + NO \rightarrow NO_2 + e$	$1.8 \cdot 10^{-8}$	[4]
Реакции нейтралов			
11	$O + NO + M \rightarrow NO_2 + M$	$9.4 \cdot 10^{-32}$	[4]
12	$N + O + M \rightarrow NO + M$	$1.0 \cdot 10^{-32}$	[4]
13	$N + N + M \rightarrow N_2 + M$	$4.4 \cdot 10^{-33}$	[4]
Электрон-ионная рекомбинация			
14	$N_2^+ + e \rightarrow N + N$	$2.7 \cdot 10^{-7}$	[4]
15	$NO_2^+ + e \rightarrow N + O_2$	$7.0 \cdot 10^{-8}$	[4]
16	$NO^+ + e \rightarrow N + O$	$5.8 \cdot 10^{-7}$	[9]
17	$N_2O^+ + e \rightarrow N_2 + O$	$7.0 \cdot 10^{-8}$	[4]
18	$N_2^+ + e + M \rightarrow N_2 + M$	$1.0 \cdot 10^{-26}$	[9]
19	$NO^+ + e + M \rightarrow NO + M$	$1.0 \cdot 10^{-26}$	[9]
20	$N^+ + e + M \rightarrow N + M$	$1.0 \cdot 10^{-26}$	[9]
Ион-ионная рекомбинация			
21	$NO^+ + CO_3^- \rightarrow CO_2 + NO + O$	$6.0 \cdot 10^{-7}$	[4]
22	$NO^+ + CO_4^- \rightarrow CO_2 + NO + O_2$	$6.0 \cdot 10^{-7}$	[4]
23	$NO^+ + O_2^- \rightarrow O_2 + N + O$	$5.8 \cdot 10^{-7}$	[4]
24	$NO^+ + O^- \rightarrow O + N + O$	$4.9 \cdot 10^{-7}$	[4]
25	$O^- + N_2^+ \rightarrow O + N_2$	$2.0 \cdot 10^{-7}$	[9]
26	$O_2^- + N_2^+ \rightarrow O_2 + N_2$	$2.0 \cdot 10^{-7}$	[9]
27	$O_3^- + NO_2^+ \rightarrow O_3 + NO_2$	$2.0 \cdot 10^{-7}$	[9]
28	$O_3^- + NO^+ \rightarrow O_3 + NO$	$2.0 \cdot 10^{-7}$	[9]
29	$O_2^- + NO^+ \rightarrow O_2 + NO$	$2.0 \cdot 10^{-7}$	[9]
30	$O_2^- + N_2^+ \rightarrow O_2 + 2N$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	[9]
31	$O_3^- + N_2^+ \rightarrow O_3 + 2N$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	[9]

Таблица 1. (продолжение)

1	2	3	4
32	$N^+ + O^- \rightarrow N + O$	$2.0 \cdot 10^{-7}$	[9]
33	$O^- + O^+ + N_2 \rightarrow O_2 + N_2$	$2.0 \cdot 10^{-25}$	[9]
34	$O^- + N_2^+ + M \rightarrow N_2O + M$	$2.0 \cdot 10^{-25}$	[9]
35	$O_2^- + N_2^+ + M \rightarrow O_2 + N_2 + M$	$2.0 \cdot 10^{-25}$	[9]
36	$O^- + NO^+ + M \rightarrow NO_2 + M$	$2.0 \cdot 10^{-25}$	[9]
37	$O_2^- + NO^+ + M \rightarrow O_2 + NO + M$	$2.0 \cdot 10^{-25}$	[9]
38	$C_3O_4^+ + CO_3^- \rightarrow 2CO + O + 2CO_2$	$3.0 \cdot 10^{-7}$	
39	$CO^+ + CO_3^- \rightarrow CO + O + CO_2$	$3.0 \cdot 10^{-7}$	
40	$C_2O_4^+ + CO_3^- \rightarrow 3CO_2 + O$	$3.0 \cdot 10^{-7}$	
41	$C_2O_2^+ + CO_3^- \rightarrow 2CO + O + CO_2$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	
42	$C_2O_3^+ + CO_3^- \rightarrow CO + O + 2CO_2$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	
43	$CO_4^+ + CO_3^- \rightarrow O_2 + O + 2CO_2$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	
44	$CO_3^+ + CO_4^- \rightarrow O + O_2 + 2CO_2$	$3.0 \cdot 10^{-7}$	
45	$CO_3^+ + CO_3^- \rightarrow 2O + 2CO_2$	$3.0 \cdot 10^{-7}$	
46	$N_2O^+ + CO_3^- \rightarrow N_2O + O + CO_2$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	
47	$N_2O^+ + CO_4^- \rightarrow N_2O + O_2 + CO_2$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	

## Ион-молекулярные реакции

48	$CO_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + CO_2$	$1.0 \cdot 10^{-10}$	[4]
49	$He^+ + N_2 \begin{cases} \rightarrow N^+ + N + He \\ \rightarrow N_2^+ + He \end{cases}$	$1.7 \cdot 10^{-9}$	[9]
		$1.5 \cdot 10^{-9}$	[9]
50	$He^+ + CO \rightarrow C^+ + O + He$	$1.7 \cdot 10^{-9}$	[9]
51	$He^+ + NO \rightarrow N^+ + O + He$	$1.8 \cdot 10^{-9}$	[9]
52	$He^+ + O_2 \rightarrow O^+ + O + He$	$2.1 \cdot 10^{-9}$	[9]
53	$He^+ + CO_2 \begin{cases} \rightarrow O^+ + CO + He \\ \rightarrow CO^+ + O + He \end{cases}$	$1.2 \cdot 10^{-9}$	[9]
		$1.2 \cdot 10^{-9}$	[9]
54	$N^+ + CO \rightarrow CO^+ + N$	$5.0 \cdot 10^{-10}$	[9]
55	$N^+ + O_2 \begin{cases} \rightarrow O_2^+ + N \\ \rightarrow NO^+ + O \end{cases}$	$5.0 \cdot 10^{-10}$	[9]
		$4.5 \cdot 10^{-10}$	[9]
56	$N^+ + CO_2 \rightarrow CO_2^+ + N$	$1.5 \cdot 10^{-9}$	[9]
57	$N^+ + N_2O \rightarrow NO^+ + N_2$	$5.5 \cdot 10^{-10}$	[9]
58	$N_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + N_2$	$4.9 \cdot 10^{-10}$	[9]
59	$N_2^+ + CO_2 \rightarrow CO_2^+ + N_2$	$9.0 \cdot 10^{-10}$	[9]
60	$N_2^+ + N_2O \begin{cases} \rightarrow NO^+ + N_2 + N \\ \rightarrow N_2O^+ + N_2 \end{cases}$	$4.0 \cdot 10^{-10}$	[9]
		$5.0 \cdot 10^{-10}$	[9]
61	$N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N$	$2.5 \cdot 10^{-10}$	[9]
62	$N_2^+ + CO \rightarrow CO^+ + N_2$	$7.0 \cdot 10^{-11}$	[9]
63	$N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2$	$1.1 \cdot 10^{-10}$	[9]
64	$O^+ + N_2 + He \rightarrow N_2O^+ + He$	$5.4 \cdot 10^{-29}$	[9]

Примечание. Размерности коэффициентов скорости одно-, двух- и трехчастичных реакций  $c^{-1}$ ,  $см^3 \cdot c^{-1}$ ,  $см^6 \cdot c^{-1}$  соответственно.

Плазмохимическая модель включала в себя следующие компоненты: электроны,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{Co}(\text{A}^3\Pi)$ ,  $\text{O}_2(\text{A}^3\Sigma^+u)$ ,  $\text{O}(1\text{So})$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{CO}_3^+$ ,  $\text{CO}_4^+$ ,  $\text{C}_2\text{O}_2^+$ ,  $\text{C}_2\text{O}_4^+$ ,  $\text{C}_2\text{O}_3^+$ ,  $\text{C}_3\text{O}_4^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{C}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{He}^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{N}_2\text{O}^+$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{NO}_2^+$ ,  $\text{CO}_4^-$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{O}_3^-$ . В модели были использованы реакции согласно данным работы [10], которые были дополнены приведенными в табл. 1. Из-за отсутствия данных константы реакций иона  $\text{CO}_3^-$  с положительными кластерными ионами ( $\text{CO}_3^+$ ,  $\text{CO}_4^+$ ,  $\text{C}_2\text{O}_2^+$ ,  $\text{C}_2\text{O}_4^+$ ,  $\text{C}_2\text{O}_3^+$ ,  $\text{C}_3\text{O}_4^+$ ) были взяты такими же, как и иона  $\text{CO}_4^-$ . Константы реакций  $\text{N}_2\text{O}^+$  с  $\text{CO}_3^-$  и  $\text{CO}_4^-$  были взяты такими же, как и у  $\text{NO}^+$ . Если указанные реакции не учитываются, то происходит нереальное накопление кластерных ионов, а также ионов  $\text{N}_2\text{O}^+$  и  $\text{CO}_3^-$ . Данные по сечениям, использованные в уравнении Больцмана, были взяты из работы [11].

Зависимости концентраций электронов и основных ионов приведены на рис. 1-3. Отсчет времени на всех рисунках ведется с момента достижения требуемой начальной концентрации электронов.

Проведем анализ полученных результатов. Видно, что можно выделить две стадии в развитии основных рекомбинационных процессов. Начальная стадия имеет малую длительность и определяется рекомбинацией между электронами и кластерными положительными ионами, обладающей высокой скоростью (константа  $\sim 10^{-6} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Последующая стадия, существенно более длительная, характеризуется рекомбинацией между электронами и остальными ионами, а также ион-ионной рекомбинацией (константа  $\sim 10^{-7} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Начальная стадия рекомбинации заканчивается резким уменьшением концентрации электронов или кластерных положительных ионов в зависимости от их соотношения в конце стадии ионизации, т.е. первого этапа расчетов.

В случаях с начальной концентрацией электронов  $10^{14}$  и  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  в плазме присутствуют в основном положительные кластерные ионы (преимущественно  $\text{C}_2\text{O}_4^+$ ), электроны и отрицательные ионы (преимущественно  $\text{CO}_3^-$ ). Следовательно, положительных кластерных ионов больше, чем электронов, поэтому в результате их рекомбинации кон-

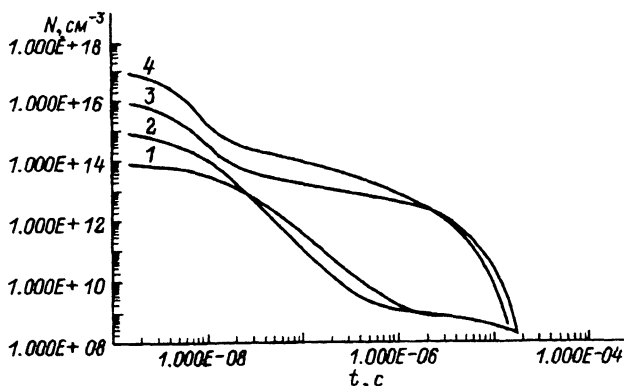


Рис. 1. Зависимости концентрации электронов от времени в среде  $\text{CO}_2$  лазера. Начальная концентрация электронов,  $\text{см}^3$ : 1 —  $10^{14}$ , 2 —  $10^{15}$ , 3 —  $10^{16}$ , 4 —  $10^{17}$ .

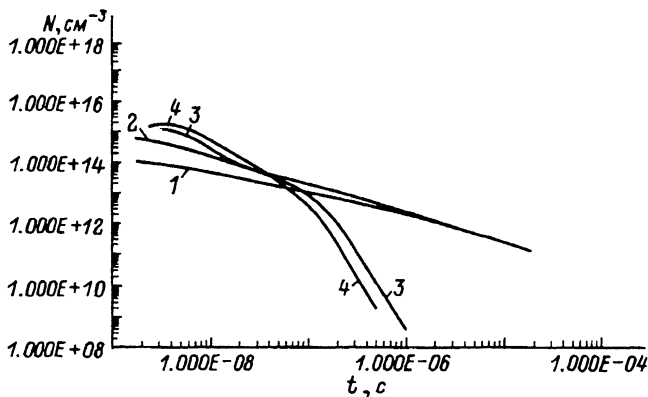


Рис. 2. Зависимости суммарной концентрации положительных кластерных ионов от времени в среде  $\text{CO}_2$  лазера. Обозначения те же, что и на рис. 1.

центрация электронов падает быстрее (рис. 1, кривые 1 и 2) и к моменту времени  $10^{-5}$  с становится  $\sim 10^8 \text{ см}^{-3}$ . Поскольку положительные кластерные и отрицательные ионы рекомбинируют более медленно, то их концентрация к этому моменту времени уменьшается только до уровня  $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$  (кривые 1 и 2 на рис. 2, кривая 1 на рис. 3).

В случаях с начальной концентрацией электронов  $10^{16}$  и  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  существенной к моменту времени  $\sim 10^{-8}$  с становится концентрация иона  $\text{N}_2\text{O}^+$ , причем она начинает превышать концентрацию отрицательных ионов. Это принципиально меняет ход рекомбинации. В отличие от предыдущего случая электронов становится больше, чем положительных кластерных ионов, и концентрация последних уменьшается более быстро (кривые 3 и 4 на рис. 2). Электроны, отрицательные ионы (в основном  $\text{CO}_3^-$  и  $\text{CO}_4^-$ ) и ионы  $\text{N}_2\text{O}^+$  продолжают рекомбинировать с меньшей скоростью. По истечении нескольких микросекунд

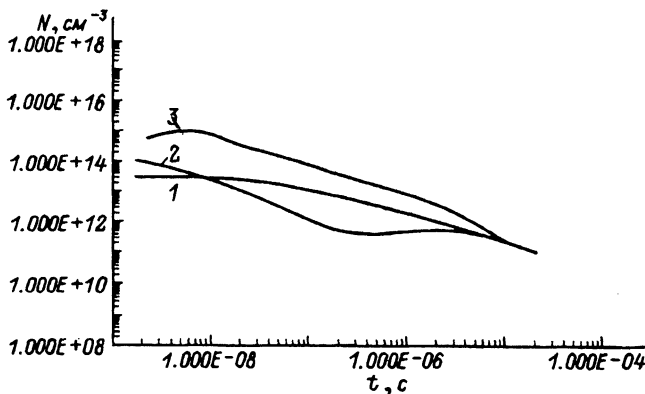


Рис. 3. Зависимости концентрации иона  $\text{N}_2\text{O}^+$  и суммарной концентрации отрицательных ионов от времени в среде  $\text{CO}_2$  лазера.

Суммарная концентрация отрицательных ионов при начальной концентрации электронов,  $\text{см}^{-3}$ : 1 —  $10^{14}$ , 2 —  $10^{17}$ , 3 — концентрация иона  $\text{N}_2\text{O}^+$  при начальной концентрации электронов  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

становится существенным прилипание электронов к атомарному и молекулярному кислороду. Этот процесс ускоряет убыль концентрации электронов, однако к моменту времени  $10^{-5}$  с она все же остается на уровне  $10^{10}$  см $^{-3}$ , т.е. на два порядка больше, чем в предыдущем случае (рис. 1). Выравнивание концентраций электронов происходит примерно к  $1.5-2 \cdot 10^{-5}$  с. Концентрация ионов  $N_2O^+$  и отрицательных ионов к этому моменту составляет величину  $\sim 10^{11}$  см $^{-3}$  (кривые 2 и 3 на рис. 3) и практически совпадает с концентрацией ионов в предыдущем случае.

Таким образом, при повышении максимальной концентрации электронов до уровня  $10^{16}-10^{17}$  см $^{-3}$  убыль из концентрации идет на определенном этапе медленнее, чем в случае  $10^{14}$  и  $10^{15}$  см $^{-3}$ , что обусловлено изменением ионного состава плазмы.

Вследствие этого неоднородность к концентрации электронов сохраняется вплоть до  $10^{-5}$  с. При поступлении очередного импульса напряжения это может привести к контракции разряда на ранней стадии его развития.

### Релаксация плазмы в ХеСl лазере

Анализ кинетики процессов релаксации плазмы проводился для смеси He-He-HCl-H $_2$  соотношением 2000 : 20 : 2 : 1, давлением 2.5 атм и температурой 300 К.

В модель были включены следующие компоненты: He $^+$ , He $_2^+$ , He $_3^+$ , Хе $^+$ , Хе $_2^+$ , HeХе $^+$ , Cl $^+$ , электроны, Cl $^-$ , He $^*$ , Хе $^*$ , Хе $^{**}$ , ХеСl $^*$ , ХеСl(X), HeCl $^*$ , HCl( $\nu$ ), H, Cl. Используемые плазмохимические реакции представлены в табл. 2.

В отличие от случая с CO $_2$  средой при моделировании процессов в электрическом поле для получения начальных концентраций заряда  $10^{14}$  и  $10^{14}$  см $^{-3}$  использовались константы возбуждения и ионизации, приведенные в работе [6]. Кроме того, в течение первых 100 нс после окончания процессов ионизации учитывались возбуждение, диссоциация и диссоциативное прилипание к HCl. Данное предположение оправдано тем, что выше указанные процессы идут в слабых полях, имеющих место в плазме разряда, при этом константы их скорости практически постоянны в широком диапазоне  $E/P$  [12]. Данные по сечениям, использованные в уравнении Больцмана, были взяты из работы [5].

В литературе неоднократно рассматривалась кинетика [2,5] и приводилась схема [3] плазмохимических процессов в среде ХеСl лазера. Необходимо отметить лишь ряд моментов.

Из-за того что для создания начальной концентрации электронов  $10^{16}$  и  $10^{17}$  см $^{-3}$  было использовано более сильное электрическое поле, чем для  $10^{14}$  и  $10^{15}$  см $^{-3}$ , расчет изменения состава плазмы в течение ионизации показал, что положительный заряд в первом случае был сосредоточен в основном в гелийсодержащих, а во втором в ксенонсодержащих ионах. Однако далее в обоих случаях заряд переходит иону Хе $_2^+$ . Параллельно идут возбуждение HCl, диссоциация и диссоциативное прилипание (в основном из возбужденного состояния (HCl( $\nu$ ))).

Таблица 2. Реакция для среды ХеСl лазера

Номер	Реакция	Коэффициент скорости	Ссылка
1	2	3	4
Ионизация			
1	$\text{He} + e \rightarrow \text{He}^+ + 2e$		
2	$\text{Xe} + e \rightarrow \text{Xe}^+ + 2e$		
3	$\text{He}^* + \text{He}^* \rightarrow \text{He}^+ + e + \text{He}$	$2.1 \cdot 10^{-9}$	[2]
4	$\text{Xe}^* + \text{Xe}^* \rightarrow \text{Xe}^+ + e + \text{Xe}$	$5.0 \cdot 10^{-10}$	[2]
5	$\text{He}^* + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+ + e + \text{He}$	$1.2 \cdot 10^{-10}$	[2]
6	$\text{HeCl}^* \rightarrow \text{He} + \text{Cl}^+ + e$	$1.0 \cdot 10^{-10}$	[2]
Возбуждение			
7	$\text{He} + e \rightarrow \text{He}_2^* + e$		
8	$\text{Xe} + e \rightarrow \text{Xe}^* + e$		
9	$\text{HCl} + e \rightarrow \text{HCl}(\nu) + e$	$2.0 \cdot 10^{-8}$	[5]
Диссоциация и диссоциативаное прилипание			
10	$\text{HCl} + e \rightarrow \text{H} + \text{Cl} + e$	$2.0 \cdot 10^{-9}$	[2]
11	$\text{HCl}(\nu) + e \rightarrow \text{H} + \text{Cl} + e$	$2.0 \cdot 10^{-9}$	[2]
12	$\text{HCl} + e \rightarrow \text{H} + \text{Cl}^-$	$7.0 \cdot 10^{-11}$	[5]
13	$\text{HCl}(\nu) + e \rightarrow \text{H} + \text{Cl}^-$	$3.0 \cdot 10^{-9}$	[5]
Отрыв			
14	$\text{Cl}^- + e \rightarrow \text{Cl} + 2e$	$2.0 \cdot 10^{-6}$	[2]
15	$\text{H} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{HCl}(\nu) + e$	$1.0 \cdot 10^{-9}$	[2]
Передача заряда			
16	$\text{He}^+ + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+ + \text{He}$	$1.0 \cdot 10^{-11}$	[2]
17	$\text{He}^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{He}_2^+ + \text{He}$	$1.0 \cdot 10^{-31}$	[2]
18	$\text{He}_2^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{He}_3^+ + \text{He}$	$4.7 \cdot 10^{-31}$	[2]
19	$\text{He}_3^+ + \text{He} \rightarrow \text{He}_2^+ + 2\text{He}$	$6.1 \cdot 10^{-10}$	[2]
20	$\text{He}_2^+ + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+ + 2\text{He}$	$5.9 \cdot 10^{-10}$	[2]
21	$\text{He}_3^+ + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+ + 3\text{He}$	$5.0 \cdot 10^{-10}$	[2]
22	$\text{Xe}^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{HeXe}^+ + \text{He}$	$1.0 \cdot 10^{-31}$	[2]
23	$\text{HeXe}^+ + \text{He} \rightarrow 2\text{He} + \text{Xe}^+$	$1.8 \cdot 10^{-11}$	[2]
24	$\text{HeXe}^+ + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}_2^+ + \text{He}$	$5.0 \cdot 10^{-10}$	[2]
25	$\text{Cl}^+ + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+ + \text{Cl}$	$1.0 \cdot 10^{-10}$	[2]
Рекомбинация			
26	$\text{He}_2^+ + e \rightarrow \text{He}^* + \text{He}$	$3.0 \cdot 10^{-11}$	[2]
27	$\text{He}_3^+ + e \rightarrow \text{He}^* + 2\text{He}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	[2]
28	$\text{Xe}_2^+ + e \rightarrow \text{Xe}^{**} + \text{Xe}$	$2.6 \cdot 10^{-7}$	[2]
29	$\text{He}^+ \text{Cl}^- \rightarrow \text{He}^* + \text{Cl}$	$3.1 \cdot 10^{-9}$	[2]
30	$\text{He}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{HeCl}^*$	$2.0 \cdot 10^{-6}$	[2]
31	$\text{He}_2^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{HeCl}^* + \text{He}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$	[2]
32	$\text{HeXe}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{He}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$	[2]



Таблица 2. (продолжение)

1	2	3	4
33	$\text{Xe}_2^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Xe}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$	[2]
Тушение и излучение			
34	$\text{Xe}^* \rightarrow \text{Xe} + h\nu$	$1.5 \cdot 10^8$	[2]
35	$\text{XeCl}^* \rightarrow \text{XeCl}(X) + h\nu$	$5.0 \cdot 10^7$	[2]
36	$\text{Xe}^{**} + \text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^* + \text{Xe}$	$1.0 \cdot 10^{-10}$	[2]
37	$\text{XeCl}(X) + \text{He} \rightarrow \text{Xe} + \text{Cl} + \text{He}$	$1.0 \cdot 10^{-11}$	[2]
38	$\text{HeCl}^* + \text{Xe} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{He}$	$1.0 \cdot 10^{-10}$	[2]
39	$\text{Xe}^{**} + \text{HCl} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{H}$	$5.6 \cdot 10^{-10}$	[2]
40	$\text{Xe}^{**} + \text{HCl}(\nu) \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{H}$	$5.6 \cdot 10^{-10}$	[2]
41	$\text{Xe}^* + \text{HCl} \rightarrow \text{Xe} + \text{H} + \text{Cl}$	$5.6 \cdot 10^{-10}$	[2]
42	$\text{Xe}^* + \text{HCl}(\nu) \rightarrow \text{Xe} + \text{H} + \text{Cl}$	$5.6 \cdot 10^{-10}$	[2]
43	$\text{XeCl}^* + \text{HCl} \rightarrow \text{XeCl}(X) + \text{H} + \text{Cl}$	$6.3 \cdot 10^{-10}$	[2]
44	$\text{XeCl}^* + \text{HCl}(\nu) \rightarrow \text{XeCl}(X) + \text{H} + \text{Cl}$	$6.3 \cdot 10^{-10}$	[2]
45	$\text{HCl}(\nu) + \text{He} \rightarrow \text{HCl} + \text{He}$	$6.2 \cdot 10^{-10}$	[2]
46	$\text{HCl}(\nu) + \text{HCl} \rightarrow 2\text{HCl}$	$2.7 \cdot 10^{-10}$	[2]
47	$\text{He}^* + \text{HCl} \rightarrow \text{He} + \text{H} + \text{Cl}$	$6.0 \cdot 10^{-10}$	[2]
48	$\text{He}^* + \text{HCl}(\nu) \rightarrow \text{He} + \text{H} + \text{Cl}$	$6.0 \cdot 10^{-10}$	[2]

П р и м е ч а н и е. Размерности коэффициентов скорости одно-, двух- и трехчастичных реакций  $\text{с}^{-1}$ ,  $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\text{см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$  соответственно.

Таким образом, в плазме имеют место электрон-ионная и ион-ионная рекомбинации, причем последняя имеет на порядок более высокую константу. Скорость ион-ионной рекомбинации определяется в основном скоростью диссоциативного прилипания, т.е. образования  $\text{Cl}^-$ .

Рассмотрим поведение концентрации электронов, используя результаты, представленные на рис. 4 и 5. Так же как и ранее, отсчет времени на графиках ведется с момента достижения заданной начальной концентрации электронов.

Эти данные показывают, что чем больше начальная концентрация электронов, тем выше скорость образования и больше концентрация  $\text{HCl}(\nu)$ . По мере уменьшения концентрации электронов скорость образования  $\text{HCl}(\nu)$  уменьшается и концентрация его выходит на квазистационарный уровень, поскольку время тушения  $\text{HCl}(\nu)$  нейтральными компонентами  $\sim 10^{-4}$  с, т.е. в 10 раз больше рассматриваемого интервала. На поведение  $\text{HCl}(\nu)$  оказывает влияние также процесс разложения  $\text{HCl}$ . В случае начальной концентрации электронов  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  имеет место полное, а в случае  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  частичное разложение  $\text{HCl}$ . Поэтому после достижения максимума кривая 3 на рис. 4 имеет спад перед выходом на квазистационарный уровень, а кривая 4 спадает до нуля.

Поведение концентрации электронов во времени, показанное на рис. 5, можно объяснить, используя данные для концентрации  $\text{HCl}(\nu)$  (рис. 4). Если начальная концентрация электронов  $10^{14}$  и  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , то ее уменьшение идет в основном за счет диссоциативного прилипания из возбужденного состояния  $\text{HCl}$ :  $\text{HCl}(\nu) + e \rightarrow \text{H} + \text{Cl}^-$ . Таким обра-

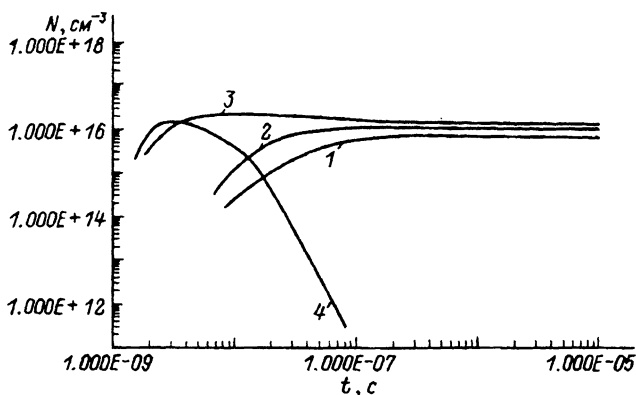


Рис. 4. Зависимости концентрации  $\text{HCl}(\nu)$  от времени в среде  $\text{XeCl}$  лазера. Обозначения те же, что и на рис. 1.

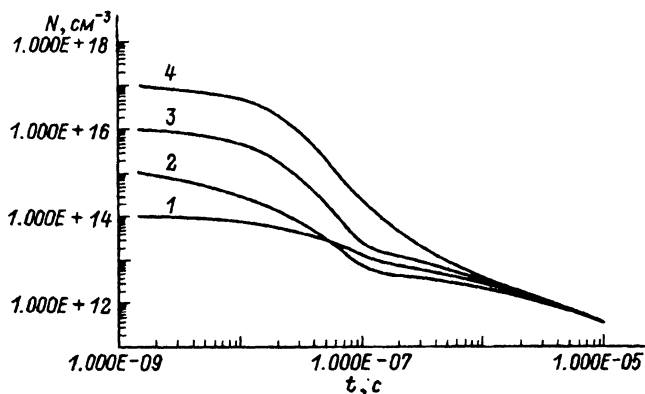


Рис. 5. Зависимости концентрации электронов от времени в среде  $\text{XeCl}$  лазера. Обозначения те же, что и на рис. 1.

зом, чем выше концентрация  $\text{HCl}(\nu)$ , тем больше скорость убыли электронов. Этим объясняется более крутой спад кривой 2 по сравнению с кривой 1.

При более высоких уровнях начальной концентрации заряда (кривые 3 и 4) преобладает электрон-ионная рекомбинация, преимущественно  $\text{Xe}_2^+ + e \rightarrow \text{Xe}^{*+} + \text{Xe}$ . Кроме того, в течение  $\approx 30$  нс имеет место пеннинговская ионизация



Это существенно отличает ход кривых 3 и 4 от кривых 1 и 2. Как отмечалось выше, в случае начальной концентрации электронов  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  (кривая 4) имеет место полное разложение  $\text{HCl}$ , и поэтому в данном случае идет только электрон-ионная рекомбинация. Если начальная концентрация электронов составляет  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  (кривая 3), то кроме электрон-ионной рекомбинации имеет место также диссоциативное прилипание, что несколько ускоряет убыль электронов. Этим объясняется то, что к моменту времени  $10^{-7}$  с кривые 3 и 4 не сливаются, как это следует из рекомбинационной зависимости  $N_e = 1/\beta t$ , где  $N_e$  — концентрация электронов,  $\beta$  — коэффициент рекомбинации,  $t$  — время.

После  $10^{-7}$  с, когда все процессы, зависящие от поля (в том числе и диссоциативное прилипание), исключались, электрон-ионная рекомбинация постепенно выравнивает концентрацию электронов во всех четырех случаях. К моменту времени  $\sim 10^{-6}$  с она составляет величину  $10^{12}$  см $^{-3}$ , а к моменту  $10^{-5}$  с — величину  $\sim 10^{11}$  см $^{-3}$ . Такой же уровень имеет и концентрация положительного заряда.

Выравнивание концентрации электронов, однако, не означает полного сглаживания неоднородности, поскольку возможно влияние гидродинамического расширения более нагретого участка плазмы.

### Заключение

В настоящей работе рассмотрен процесс релаксации плазмы объемного разряда в активных средах импульсных CO $_2$  и XeCl лазеров.

Было проведено сравнение хода рекомбинационных процессов в плазме с концентрацией электронов  $10^{14}$ – $10^{15}$  см $^{-3}$ , типичной для разряда, и  $10^{16}$ – $10^{17}$  см $^{-3}$ , типичной для неоднородностей в разряде.

Показано, что повышение начальной концентрации электронов до уровня  $10^{16}$ – $10^{17}$  см $^{-3}$  качественно меняет ход релаксации плазмы в среде CO $_2$  лазера. Это связано с изменением ионного состава плазмы CO $_2$  лазера, в частности с существенной концентрацией иона N $_2$ O $^+$ .

Отмечено также, что концентрация заряженных частиц в обеих средах к моменту времени  $\sim 10^{-5}$  с составляет величину  $\sim 10^{11}$  см $^{-3}$ .

Результаты расчетов дают основание считать, что неоднородность концентрации электронов может сохраняться в среде XeCl лазера до  $\sim 10^{-6}$  с, а в среде CO $_2$  лазера до  $\sim 10^{-5}$  с.

Сохранение неоднородности концентрации электронов может привести к искажению электрического поля и, как следствие, к контракции разряда при повторном наложении импульса напряжения. Кроме того, возможно влияние гидродинамического расширения более нагретого участка плазмы.

### Список литературы

- [1] Мартынов И.Н., Мехряков В.Н., Осипов В.В. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 3. С. 58–62.
- [2] Бойченко А.М., Держисев В.И., Жидков А.Г. и др. // Тр. ИОФАН. 1989. Т. 21. С. 44–115.
- [3] Maeda M., Takahashi A., Mizunami T., Miyazoe Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1982. Vol. 21. N 8. P. 1161–1169.
- [4] Hokazono H., Fujimoto F. // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62. P. 1585–1594.
- [5] Hokazono H., Midorikawa K., Obara M., Fujioka T. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. N 3. P. 680–690.
- [6] Борисов В.М., Кирюхин Ю.Б., Кочетов И.В., Новиков В.П. // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 8. С. 1641–1649.
- [7] Беляков И.И., Богданов П.И., Месяц Г.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 16. С. 4–7.
- [8] Ракитский Ю.В. и др. Численные методы решения жестких систем. М.: Наука, 1979.
- [9] Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир, 1981.
- [10] Константинов М.Д., Осипов В.В., Сулов А.И. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 10. С. 27–36.
- [11] Lowke J.J., Phelps A.V., Irwin B.W. // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. N.10. P. 4664–4671.
- [12] Nighan W.L., Brown R.T. // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 36. P. 498.