

УДК 621.373.826

## О МЕХАНИЗМЕ ГЕНЕРАЦИИ В ЛАЗЕРЕ С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ НА ИК-ПЕРЕХОДАХ АТОМА ХЛОРА

А. В. Карелин, О. В. Симакова

*Представлены результаты численного моделирования кинетики процессов в активной среде лазера с ядерной накачкой на ИК переходах атома хлора в смеси высокого давления He-Ne-CCl<sub>4</sub>. Предложен механизм создания инверсии для рабочих переходов с длинами волн излучения 1,59 мкм и 2,45 мкм. Получено удовлетворительное согласие результатов расчета с экспериментом.*

Недавно появились сообщения о получении относительно мощной генерации в лазере с ядерной накачкой на атомарных переходах хлора в смеси He-Ne-CCl<sub>4</sub> [1]. Отличительной особенностью работы данного лазера оказалось чрезвычайно низкое ( $\sim 10^{-2}$  торр) парциальное давление лазерно-активной компоненты среды при достаточно высоком давлении буферных газов (1 атм He и 1 атм Ne). При этом механизм генерации остался неясным. В работе [1] было высказано лишь предположение о том, что наиболее вероятным механизмом заселения верхних лазерных уровней может быть ионная рекомбинация отрицательных ионов хлора с положительными ионами инертных газов. Кроме того, в ней упоминалась возможная роль процессов диссоциативного возбуждения.

Целью данной работы является теоретическое исследование механизма возникновения генерации в рассматриваемом лазере. Для этого нами была построена подробная нестационарная кинетическая модель лазера с ядерной накачкой на смеси He-Ne-CCl<sub>4</sub>. На ее основе проводились расчеты кинетики плазмохимических процессов в активной среде (АС), а также мощности и КПД генерируемого излучения с  $\lambda = 1,59$  мкм и 2,45 мкм. Исходными данными (форма импульса накачки, состав смеси, пропускания зеркал) служили данные экспериментов [1].

Рассматривались следующие компоненты плазмы:  $He^+$ ,  $He_2^+$ ,  $He_3^+$ ,  $He^*$ ,  $He_2^*$ ,  $Ne^+$ ,  $Ne_2^+$ ,  $Ne_3^+$ ,  $Ne^*$ ,  $Ne_2^*$ ,  $HeNe^+$ ,  $HeNe^*$ ,  $Cl$ ,  $Cl^+$ ,  $Cl_2^+$ ,  $CCl^+$ ,  $CCl_2^+$ ,  $CCl_3^+$ ,  $CCl_4^+$ ,  $C^+$ ,  $C^-$ ,  $Cl^-$ , а также 9 возбужденных уровней хлора ( $3d^4F_{9/2}$ ,  $3d^4D_{5/2,7/2}$ ,  $4p^4D_{5/2,7/2}$ ,  $4p^4P_{5/2,3/2}$ ,  $4s^4P_{5/2}$  и высоковозбужденное состояние  $Cl^{**}$ , эффективно учитывающее уровни, лежащие выше  $3d$  состояний). Концентрация электронов  $N_e$  находилась из условия квазинейтральности плазмы. Всего рассматривалось около 250 плазмохимических реакций. Уровень  $4s^4P_{5/2}$  является усредненным метастабильным состоянием хлора с вероятностью радиационного распада  $A = 2,4 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$  (вероятности радиационного распада для всех возбужденных состояний хлора рассчитаны по данным таблиц [2]). Кроме того, решались уравнения энергетического баланса для температур газа  $T_g$  и электронов  $T_e$ . Учет рабочего излучения проводился в "нуль-мерном" приближении. Для численного моделирования использовался комплекс программ "ПЛАЗЕР" [3].

Оба исследуемых рабочих перехода  $3d^4F_{9/2} - 4p^4D_{7/2}$  (1,59 мкм) и  $3d^4D_{7/2} - 4p^4D_{7/2}$  (2,45 мкм) имеют общий нижний уровень, и максимальная по давлению  $CCl_4$  выходная мощность достигается при одном и том же значении давления 30 мторр [1]. Поэтому в модели способ создания инверсии на данных переходах предполагался одинаковым.

На основе наилучшего совпадения расчетных и экспериментальных результатов было установлено, что основными каналами накачки верхних рабочих уровней являются процессы тройной рекомбинации атомарных ионов  $Cl^+$  с электронами, диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов  $Cl_2^+$ ,  $CCl_2^+$  и ион-ионная рекомбинация возбужденного иона  $CCl_2^{+*}$ :



Полные константы скоростей реакций (1) – (5) соответственно равны  $5,4 \cdot 10^{-27} T_e^{-4,5} \text{ см}^6 \text{ c}^{-1}$ ,  $2 \cdot 10^{-31} T_g T_e^{-3,5} \text{ см}^6 \text{ c}^{-1}$ ,  $2 \cdot 10^{-7} T_e^{-0,5} \text{ см}^3 \text{ c}^{-1}$ ,  $2 \cdot 10^{-7} T_e^{-0,5} \text{ см}^3 \text{ c}^{-1}$ ,  $2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \text{ c}^{-1}$  (при 2 атм буферного газа); температуры  $T_e$  и  $T_g$  измеряются в эВ. На верхний рабочий уровень линии 1,59 мкм попадает 55% от потока реакций (1) – (3), 60% – от потока реакции (4) и 10% – от потока реакции (5). Для уровня  $3d^4D_{7/2}$  эти величины составляют соответственно 10, 20 и 0%.

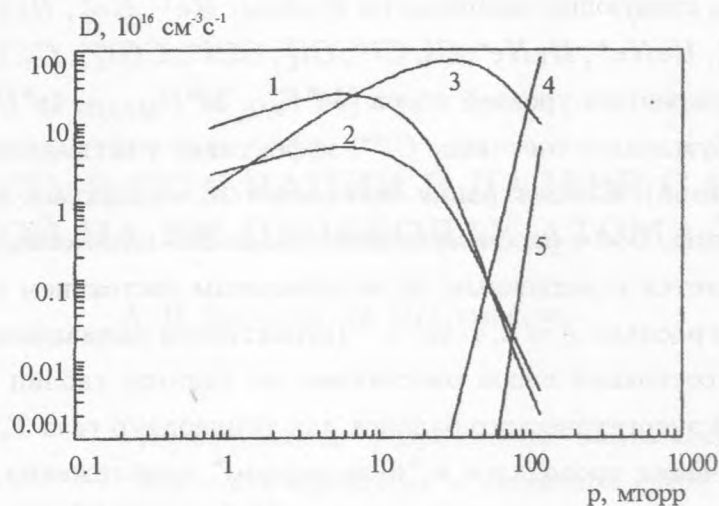


Рис. 1. Зависимости полных потоков  $D$  реакций (1) – (5), участвующих в накачке верхних лазерных уровней, от парциального давления  $CCl_4$  (давление смеси 2 атм,  $He:Ne=1:1$ ,  $\lambda = 1,59$  мкм,  $r_1 = r_2 = 0,998$ ). Номера кривых 1 – 5 соответствуют номерам реакций (1) – (5).

Относительный вклад процессов (1) – (5) в накачку верхних рабочих уровней зависит от содержания  $CCl_4$ . На рис. 1 приведена зависимость потоков накачки от парциального давления  $CCl_4$ . При давлениях не превышающих 10 мторр процессы (1), (2) играют определяющую роль. В интервале давлений 10 – 100 мторр в накачке верхнего уровня активно участвует процесс (3), значение его потока достигает максимума при давлении  $CCl_4$ , равном 30 мторр. В области давлений свыше 60 мторр в накачку включается процесс (4). При давлении  $CCl_4$ , большем 100 мторр, он является преобладающим.

Очистка нижнего рабочего уровня происходит за счет радиационного распада, а также неупругих столкновений с гелием и неоном. Константа тушения атомами буферного газа была принята равной  $10^{-12}$  см<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>.

Скорости перемешивания уровней электронами оценивались на основе аппроксимации Ван-Реджемортера. Скорости прямых и обратных процессов рассчитывались, исходя из принципа детального равновесия. В условиях экспериментов [1] концентрация электронов относительно невелика ( $10^{12} - 10^{13}$  см<sup>-3</sup>), поэтому перемешивание ими уровней не вносит заметных изменений в распределение населенностей.

Характерной чертой смесей с содержанием  $CCl_4$  является высокая концентрация отрицательных ионов хлора  $Cl^-$ , сильно влияющих на кинетику плазмы. Эффективная

наработка последних происходит в реакциях диссоциативного прилипания электронов



где  $n$  – изменяется от 4 до 1.

Константы скоростей для (6), (7) взяты из работ [4, 5] и задавались в виде сплайнов. Поскольку  $T_e$  в расчетах не превышала 1 эВ, конкурирующие с (7) процессы возбуждения и ионизации [5]  $Cl_2$  электронами не учитывались.

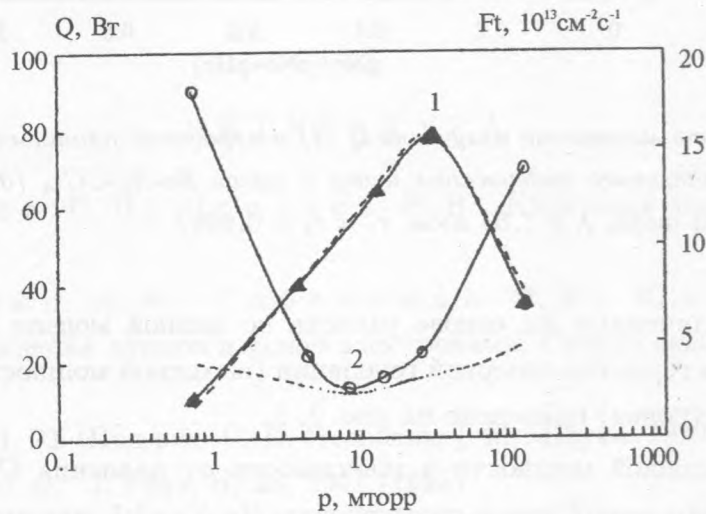
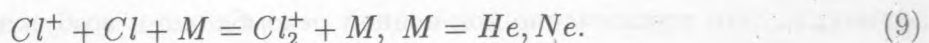


Рис. 2. Зависимость мощности излучения  $Q$  (1) и пороговой плотности потока нейтронов  $Ft$  (2) от парциального давления  $CCl_4$  (давление смеси 2 атм,  $Ne:Ne=1:1$ ,  $\lambda = 1,59 \text{ мкм}$ ,  $\tau_1 = \tau_2 = 0,998$ ). Сплошная линия – эксперимент, пунктир – расчет.

Ионы  $Cl^-$  участвуют в процессах тройной ион-ионной рекомбинации с атомарными и молекулярными ионами гелия и неона с образованием промежуточных комплексов  $NeCl^*$ ,  $HeCl^*$ , энергия возбуждения которых существенно превосходит потенциал ионизации атома хлора. Распад указанных комплексов является главным источником образования ионов  $Cl^+$ , которые, в свою очередь, участвуют в накачке верхних рабочих уровней и приводят к образованию молекулярных ионов  $Cl_2^+$ :



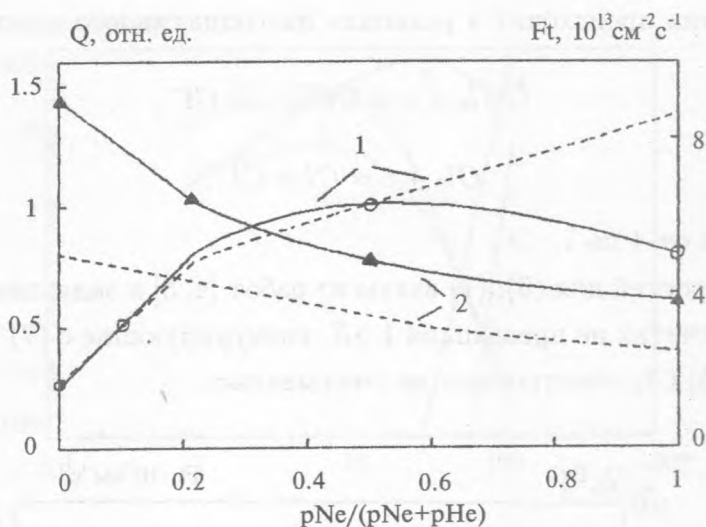


Рис. 3. Зависимость мощности излучения  $Q$  (1) и пороговой плотности потока нейтронов  $F_t$  (2) от относительного содержания неона в смеси He-Ne- $\text{CCl}_4$  (давление смеси 2 атм, давление  $\text{CCl}_4$  0,03 торр,  $\lambda = 1,59$  мкм,  $r_1 = r_2 = 0,998$ ).

Сравнение полученных на основе расчета по данной модели и экспериментально измеренных характеристик лазерной генерации (выходной мощности и пороговой плотности потока нейтронов) приведено на рис. 2, 3.

Максимум выходной мощности в зависимости от давления  $\text{CCl}_4$  при неизменном давлении буферного газа 2 атм и соотношении He:Ne=1:1 достигается при 30 мторр (рис. 2). Он обусловлен конкуренцией процессов роста концентраций  $\text{Cl}$  и  $\text{Cl}_2$  и, вследствие этого, концентрации  $\text{Cl}_2^+$  в реакциях (8) и (9), с одной стороны, и уменьшением числа электронов и роста  $\text{Cl}^-$  в процессах (6), (7) – с другой.

Минимальное значение пороговой плотности потока нейтронов приходится на более низкое давление  $\text{CCl}_4$  – 7,6 мторр (рис. 2). При малых (околопороговых) мощностях накачки верхний рабочий уровень заселяется преимущественно в процессе ион-ионной рекомбинации возбужденных молекулярных ионов  $\text{CCl}_2^{+*}$  с  $\text{Cl}^-$  (5). Ионы  $\text{CCl}_2^{+*}$  образуются в реакциях Пеннинга молекул  $\text{CCl}_4$  и  $\text{CCl}_2$  на возбужденных атомах и молекулах гелия и неона, а также в результате перезарядки  $\text{CCl}_4$  и  $\text{CCl}_2$  на атомарных и молекулярных ионах инертных газов. Наличие оптимума для зависимости пороговой плотности потока нейтронов от давления  $\text{CCl}_4$  объясняется суммой процессов образования  $\text{CCl}_2^{+*}$  и их исчезновением в реакциях перезарядки на молекулах  $\text{CCl}_4$ . Следует отметить, что привлечение ион-ионной рекомбинации возбужденных ионов  $\text{CCl}_2^{+*}$  по-

требовалось для описания именно пороговых характеристик генерации, хотя никакой достоверной информацией о них мы не располагаем.

Зависимость выходной мощности излучения от относительного содержания неона в смеси при постоянном суммарном давлении 2 атм приведена на рис. 3. В эксперименте выявлено наличие оптимума по давлению неона, достигаемого при соотношении давлений  $He:Ne=1:1$ . С последующим добавлением неона наблюдался спад мощности. Вероятной причиной этого ухудшения генерации в эксперименте, на наш взгляд, является неравномерность энерговыделения по сечению канала с ростом давления неона. Эффективность энерговыклада в чистом неоне с учетом этого фактора ухудшается почти вдвое [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] М е л ь н и к о в С. П., П о р х а е в В. В. Квантовая электроника, **22**, 891 (1995).
- [2] В а й н ш т е й н А. А., С о б е л ь м а н И. И., Ю к о в Е. А. и др. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. Сводка формул и таблиц. М., Наука, 1973.
- [3] Труды ИОФАН, **21** (Под ред. С. И. Яковленко). М., Наука, 1989.
- [4] S r a n e l P. et al. J. Phys. B, **28**, 2941 (1995).
- [5] R o g o f f L. G., К р а м е р J. M., P i e j a k R. B. IEEE Trans. Plasma Science, **14**, 103 (1986).
- [6] К а р е л и н А. В., С е р е д а О. В., Х а р и т о н о в В. В. и др. Атомная энергия, **61**, 1, 44 (1986).

Институт общей физики РАН

Поступила в редакцию 24 марта 1997 г.