

ОБ ИНВЕРСИИ НА ВОДОРОДОПОДОБНЫХ ИОНАХ УГЛЕРОДА

В. А. Бойко, В. И. Держиев, В. И. Корнейчук,  
С. И. Яковленко

УДК 621.375.826:535.131

Проведен расчет заселенностей возбужденных уровней иона  $C^{4+}$  для экспериментальных значений электронной температуры  $T_e$  и  $N_e$  в разлетающейся лазерной плазме. Показано, что в рекомбинационном режиме ряду значений  $N_e$  и  $T_e$  соответствует инверсная заселенность уровней с  $n = 5, 4, 3$ .

I. Есть основания считать, что рекомбинирующая плазма, содержащая многозарядные ионы, является наиболее перспективной средой для получения генерации в далеком ультрафиолетовом (ДУФ) диапазоне  $\lambda \sim (50 - 1) \text{ нм}$ . Это подтверждается как теоретическими соображениями, так и экспериментами по измерению заселенностей уровней многозарядных ионов в разлетающейся плазме (см. обзор /1/ \*). Однако рекомбинационный механизм формирования заселенностей иногда подвергают сомнению. Более того, в работах /3, 4/ утверждается, что инверсия при рекомбинационной накачке может иметь место лишь весьма короткое время (порядка времени жизни верхнего рабочего уровня  $\leq 1 \text{ пс}$ ), а в квазистационарном режиме на водородоподобных ионах инверсия отсутствует. В настоящей работе представлены результаты расчетов, которые доказывают ошибочность такой точки зрения и прямо показывают возникновение инверсной заселенности в квазистационарном режиме при заданных значениях  $T_e$  и  $N_e$ , которые брались

\* ) Первые наблюдения инверсии проведены Айронсом и Пякоком /2/.

из проведенных в 1968-70 гг. экспериментов (см. /5-8/) по исследованию гидродинамических параметров и ионизационного состояния разлетающейся в вакуум углеродной плазмы.

2. Мы провели расчеты, задавая значения  $N_e$  и  $T_e$  для различных расстояний  $x$  от поверхности мишени согласно данным /8/ (см. табл. I). Было учтено, что, как это следует из спектроскопических измерений, в плазме существенно представлены водородо-подобные ионы C VI.

Таблица I.

$r$ , см	$N_e$ , см <sup>-3</sup>	$T_e$ , эВ	$N_5$ , см <sup>-3</sup>	$N_4$ , см <sup>-3</sup>	$N_3$ , см <sup>-3</sup>
$1,3 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{19}$	125	$7,3 \cdot 10^{15}$	$5,0 \cdot 10^{16}$	$3,1 \cdot 10^{16}$
$2,1 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{19}$	110	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,05 \cdot 10^{15}$	$6,3 \cdot 10^{14}$
$3,3 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{19}$	90	$3,3 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{14}$
$4,6 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{18}$	60	$4,6 \cdot 10^{13}$	$3,0 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{13}$
$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{18}$	45	$7,0 \cdot 10^{12}$	$4,1 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^{12}$
$9,6 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{17}$	35	$1,3 \cdot 10^{12}$	$6,8 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{11}$
$1,33 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{17}$	15	$1,0 \cdot 10^{12}$	$5,6 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{11}$

Заселенности уровней  $N_5$ ,  $N_4$ ,  $N_3$  с главным квантовым числом  $n = 5, 4, 3$  иона C VI вычислялись с использованием таблиц /9/ по заданным значениям  $N_e$ ,  $T_e$ ,  $N^{6+} = N_e/6$ ,  $N^{5+} = 0$  ( $N^{6+}$ ,  $N^{5+}$  - плотности ионов соответственно заряда 6 и 5). Отметим, что предположение  $N^{6+} = N_e/6$  и  $N^{5+} = 0$  приводит к несколько заниженным абсолютным значениям коэффициента усиления, но на сам факт инверсии это предположение в данных условиях не влияет. Интерполяция значений, расположенных между узлами таблиц /9/, проводилась по методике /10/. Коэффициент усиления вычислялся по известной формуле (см. например, /I, II/), где ширина линии полагалась равной хольцмарковской (см. выражение (22.15) в /II/). Результаты расчетов представлены в табл. I, 2; прочерк соответствует отрицательному коэффициенту усиления.

Таблица 2.

$r, \text{ см}$	$\mathcal{K}_{54}, \text{ см}^{-1}$ $\lambda = 112 \text{ нм}$	$\mathcal{K}_{53}, \text{ см}^{-1}$ $\lambda = 35,6 \text{ нм}$	$\mathcal{K}_{43}, \text{ см}^{-1}$ $\lambda = 52,08 \text{ нм}$
$1,3 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
$2,1 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
$3,3 \cdot 10^{-2}$	—	—	$1,4 \cdot 10^{-3}$
$4,6 \cdot 10^{-2}$	—	$4 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$
$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
$9,6 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
$1,33 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$

3. Расчеты показывают, что вблизи поверхности мишени инверсия не имеет места. Это обусловлено высокой концентрацией электронов, при которой девозбуждение электронным ударом  $n + 1 \rightarrow n$  преобладает над радиационным распадом уровня  $n$  (подробнее см. в [1]). По мере уменьшения концентрации электронов инверсными становятся более высокие уровни. Максимальное значение коэффициента усиления на переходе  $4 \rightarrow 3$  достигается при  $r = 0,5$  мм. На больших расстояниях ( $r > 1$  мм) ввиду неучтенного здесь рекомбинационного уменьшения концентрации голых ядер абсолютные значения коэффициента усиления должны быть несколько меньше, чем следует из табл. 1. Впрочем, если экстраполировать соответствующие значения  $N_e$  в область  $r \sim 3$  мм, то рассчитанные значения заселенностей будут порядка измеренных Айронсом и Цикоком ( $N_4 \sim N_3 \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) /2/.

Поступила в редакцию  
24 мая 1982 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ф. В. Бункин, В. И. Держнев, С. И. Яковленко, Квантовая электроника, **8**, 1621 (1981).
2. F. E. Irons, N. J. Peacock, J. Phys., **B**, 7, 1109; 2084 (1974).

3. A. V. Vinogradov, I. I. Sobel'man, E. A. Yukov, J. de Phys., Colloque C4, Supplement, 32, No 7, 167 (1978).
4. В. А. Бойко, А. В. Виноградов и др., Рентгеновская спектроскопия лазерной плазмы, М., изд. ВУНИТИ, 1980 г., с. 212.
5. B. C. Boland, F. E. Irons, R. W. McWhirter, J. Phys., 1, 1180 (1968).
6. N. G. Basov et al., Proc. IX Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Bucharest, 1969, p. 333.
7. Н. Г. Басов и др., ДАН СССР, 192, 1248 (1970).
8. В. А. Бойко, Канд. дисс., ФИАН, М., 1970 г.; В. А. Бойко, О. Н. Крохин, Г. В. Склязов, Труды ФИАН. 76, 186 (1974).
9. R. W. F. McWhirter, A. G. Hearn, Proc. Phys. Soc., 82, 641 (1963); L. C. Johnson, E. Hinnoy, J. Quant. Spectr. Rad. Trans., 13, 333 (1973).
10. В. Я. Гольдин и др., Препринт ИИМ № 36, М., 1971 г.
11. Л. А. Вайнштейн, И. И. Сובельман, Е. А. Юков, Возбуждение атомов и уширение спектральных линий, "Наука", М., 1979 г.