

类钠铜离子软 X 射线激光 三体复合泵浦机制的研究*

张 颖 朱颀人 潘守甫 史桂珍

(吉林大学原子与分子物理研究所, 长春 130023) (中科院长春应用化学研究所, 长春 130022)

摘 要 详细研究了类钠铜离子激光等离子体中的各种复合过程, 并从理论上描述了类钠铜离子软 X 射线激光的低温三体复合泵浦机制。

关键词 类钠铜离子软 X 射线激光 三体复合泵浦 激光等离子体

ABSTRACT The various recombination processes in Na-like Cu laser-produced plasma are studied. The lower temperature three-body recombination pumping scheme of Na-like Cu soft X-ray laser is given in theory.

KEY WORDS Na-like Cu soft X-ray laser, Pumping scheme of three-body recombination, Laser-produced plasma

0 引 言

软 X 射线激光因其在生物学、医学、物理和材料等基础科学以及在工业应用和国防军事等方面的重大作用而受到人们的高度重视, 使这一领域的研究取得了迅猛的发展^[1-5]。最近, 上海光机所成功地演示了类钠铜离子 $6g \rightarrow 4f$ 跃迁的软 X 射线激光的谱线放大。实验结果表明: 类钠复合软 X 射线激光具有低泵浦要求、高效率 and 沿等电子序列更易于推向更短波长等优点^[4-5], 最有希望产生水窗波段 (2.33~ 4.37nm) 的软 X 射线激光。实验预测在类钠低温等离子体中, 电子密度在 10^{20}cm^{-3} 左右, 电子温度在 50eV 左右。据此我们从理论上研究了类钠铜离子激光等离子体中的各种复合过程, 计算了其速率系数, 给出低温等离子体软 X 射线激光的三体复合泵浦机制。

1 理论方法

在低温类钠铜等离子体中, 因泵浦功率较小, 类钠离子 $1s^2 2s^2 2p^6 6g$ 能级主要是由类氩离子基态 $1s^2 2s^2 2p^6$ 通过复合过程来布居的。由 Cu^{19+} 基态向 Cu^{18+} 各能级的复合过程有

(1) 三体复合
$$\text{X}^{M+}(i) + e + e \rightarrow \text{X}^{(M-1)+}(j) + e \quad (1)$$

(2) 辐射复合
$$\text{X}^{M+}(j) + e \rightarrow \text{X}^{(M-1)+}(j) + h\nu \quad (2)$$

(3) 双电子复合, 可分为如下两步: 第一步是类氩离子俘获电子形成自电离态

$$1s^2 2s^2 2p^6 + e \begin{cases} 1s^2 2s^2 2p^5 n s (^1P_1) 6g \\ 1s^2 2s^2 2p^5 n d (^1P_1) 6g \\ 1s^2 2s^2 2p^6 n'' p (^1P_1) 6g \end{cases} \quad (3)$$

* 国家自然科学基金和博士点基金资助项目。

1995年3月3日收到原稿, 1996年1月29日收到修改稿。

第二步是自电离态的辐射跃迁

$$\left. \begin{array}{l} 1s^2 2s^2 2p^5 n s(^1P_1) 6g \\ 1s^2 2s^2 2p^5 n d(^1P_1) 6g \\ 1s^2 2s^2 2p^6 n'' p(^1P_1) 6g \end{array} \right\} 1s^2 2s^2 2p^6 6g \quad (4)$$

设电子密度为 $N_e (\text{cm}^{-3})$, Cu^{19+} 和 Cu^{18+} 的布居密度分别为 $N(\text{Cu}^{19+})$ 和 $N(\text{Cu}^{18+})$ 。
(Cu^{18+})。在 Maxwellian 速度分布下, 通过三体复合到 j 能级的速率系数为^[6]

$$R_r(j) = \frac{4\pi^{3/2} \omega_0^3}{(T_e)^{3/2}} \frac{\omega}{\omega} N_e \exp(I_j/T_e) S_e(j) \quad (\text{cm}^3 \text{s}^{-1}) \quad (5)$$

其中 ω_0 , ω 分别是复合前、后离子所处能级的统计权重; I_j 和 T_e 分别为电离能和电子温度
(单位均为 Ry = 13.6eV); S_e 为电子碰撞电离速率系数, 可以采用 Seaton 公式^[7] 计算

$$S_e(j) = 2.155 \times 10^{-6} \frac{\xi}{I_j^2} T_e^{1/2} \exp(-I_j/T_e) \quad (6)$$

式中, ξ 是离子电离壳层中电子的数目。

对辐射复合布居类钠离子能级 j 的速率系数, 我们采用计算复杂离子复合速率系数的 Kramers 公式^[8], 其形式为

$$R_r(j) = 2.6 \times 10^{-14} \frac{1}{n} \frac{\omega}{\omega} \epsilon^{1/2} q_j^{3/2} e^{q_j} E_1(q_j) \quad (\text{cm}^3 \text{s}^{-1}) \quad (7)$$

式中, ϵ 是复合离子的电离能(单位为 Ry); $q_j = \epsilon/T_e$; $E_1(x)$ 为一阶指数积分函数; n 为复合离子的价壳层主量子数。

对通过双电子复合布居类钠铜离子 $6g$ 能级的速率系数, 在我们的定性讨论中, 由一些合理的物理考虑来简化计算, 推荐 Burgess^[9] 给出的方法。在原子单位下, 反应(3) 的速率系数 α 可以根据细致平衡原理由逆过程(自电离) 求得

$$\alpha(j) = \frac{3}{2} \omega(6g) \left(\frac{2\pi}{T_e}\right)^{3/2} \exp[-\Delta E_{j j_0}/T_e] \Gamma_j^{(A)} \quad (8)$$

自电离态的衰变有两种方式: 一是按(3) 的逆向自电离, 其速率为 $\Gamma^{(A)}$; 二是辐射跃迁, 其总速率由辐射宽度 $\Gamma^{(R)}$ 来表征。在自电离态的所有辐射衰变通道中, 反应(4) 占有压倒优势, 完全可用它来近似表征整个 $\Gamma^{(R)}$ 。由此, 可把双电子复合速率系数 R_d 写为

$$R_d(1s^2 2s^2 2p^6 \quad 1s^2 2s^2 2p^6 6g) = \sum_j \alpha(j) \frac{\Gamma_j^{(A)} A_{j j_0}}{\Gamma_j^{(A)} + A_{j j_0}} \quad (9)$$

式中, 求和是对自电离态 $1s^2 2s^2 2p^5 n s(^1P_1) 6g$, $1s^2 2s^2 2p^5 n d(^1P_1) 6g$ 和 $1s^2 2s^2 2p^6 n'' p(^1P_1) 6g$ 进行的; $A_{j j_0}$ 是自电离态 j 向 j_0 态 $1s^2 2s^2 2p^6 6g$ 辐射跃迁的几率。

我们采用多组态 Dirac-Fock (MCDF) 程序计算的结果表明: (4) 式中, 对 $n = 3, n = 5, n'' = 4$ 的跃迁, 其最大贡献仅为 $n = 3, n'' = 3$ 跃迁的 1/10。因此, 可以忽略这些跃迁, 仅考虑 $n = 3, 4, n'' = 3$ 这三种情况。把(8) 式代入(9) 式可得

$$R_d(1s^2 2s^2 2p^6 \quad 1s^2 2s^2 2p^6 6g) = \frac{3}{2} \omega(6g) \left(\frac{2\pi}{T_e}\right)^{3/2} \sum_j \exp(-\Delta E_{j j_0}/T_e) \frac{\Gamma_j^{(A)} A_{j j_0}}{\Gamma_j^{(A)} + A_{j j_0}} \quad (10)$$

式中, 求和只对 $1s^2 2s^2 2p^5 3d(^1P_1) 6g$, $1s^2 2s^2 2p^5 4d(^1P_1) 6g$ 和 $1s^2 2s^2 2p^6 3p(^1P_1) 6g$ 进行。采用 MCDF 程序, 我们计算出

$$\left. \begin{aligned} & \text{对 } 1s^2 2s^2 2p^5 3d (^1P_1) 6g \quad 1s^2 2s^2 2p^6 6g \text{ 跃迁: } \Delta E = 931.331 \text{eV}, A = 2.42 \times 10^{13} \text{s}^{-1} \\ & \text{对 } 1s^2 2s^2 2p^5 4d (^1P_1) 6g \quad 1s^2 2s^2 2p^6 6g \text{ 跃迁: } \Delta E = 1207.764 \text{eV}, A = 9.79 \times 10^{12} \text{s}^{-1} \\ & \text{对 } 1s^2 2s^2 2p^6 3p (^1P_1) 6g \quad 1s^2 2s^2 2p^6 6g \text{ 跃迁: } \Delta E = 1031.368 \text{eV}, A = 4.06 \times 10^{12} \text{s}^{-1} \end{aligned} \right\} (11)$$

对 $\Gamma_j^{(A)}$ 的估计, 采用 Burgess 的作法, 先设想一个简单的过程

$$2s^2 2p^6 + e \quad \begin{cases} 2s^2 2p^5 nd (^1P_1) + e & n = 3, 4 \\ 2s 2p^6 3p (^1P_1) + e \end{cases} \quad (12)$$

方程 (12) 右边电子能量为 ϵ , 角动量为 l , 当 $\epsilon = 0$ 时 (阈值), 反应 (12) 的碰撞强度即可用来近似表征反应 (3) 的碰撞强度, 因为 $6g$ 已离阈值相当近, 可把此想法运用到本文所关心的 $6g$ 情形, 其结果是可信的, 则可得到 $4\Gamma^{(A)}$ 的表达式 (原子单位)

$$\Gamma_j^{(A)} = \frac{z^2}{(6 - \mu_{6g})^3} \frac{1}{\pi \omega(^1P_1) \omega(6g)} \Omega(2s^2 2p^6 + e - j) \Big|_{\epsilon=0} \quad (13)$$

式中, $\omega(^1P_1) = 3$, $\omega(6g) = 18$; μ_{6g} 是 $6g$ 轨道的量子亏损数, 可取为 0; j 表示与 j 只善外层 $6g$ 电子的离子态 (如 j 为 $1s^2 2s^2 2p^5 3d (^1P_1) 6g$, 则 j 为 $1s^2 2s^2 2p^5 (^1P_1)$); 碰撞强度 $\Omega(1s^2 2s^2 2p^6 - j) \Big|_{\epsilon=0}$ 由 Sampson 等提出的 Z 标度类氢模型和 Coulomb-Born 近似方法^[10]求得, 其计算结果为:

$$\left. \begin{aligned} \Omega(1s^2 2s^2 2p^6 + e - 1s^2 2s^2 2p^5 3d + \epsilon l) \Big|_{\epsilon=0} &= 8.800 \times 10^{-2} \\ \Omega(1s^2 2s^2 2p^6 + e - 1s^2 2s^2 2p^5 4d + \epsilon l) \Big|_{\epsilon=0} &= 1.777 \times 10^{-2} \\ \Omega(1s^2 2s^2 2p^6 + e - 1s^2 2s 2p^5 3p + \epsilon l) \Big|_{\epsilon=0} &= 6.247 \times 10^{-3} \end{aligned} \right\} (14)$$

代入 (13) 式得到

$$\left. \begin{aligned} \Gamma^{(A)}(1s^2 2s^2 2p^5 3d (^1P_1) 6g) &= 1.498 \times 10^{-3} \text{a.u.} = 6.19 \times 10^{13} \text{s}^{-1} \\ \Gamma^{(A)}(1s^2 2s^2 2p^5 4d (^1P_1) 6g) &= 3.025 \times 10^{-4} \text{a.u.} = 1.25 \times 10^{13} \text{s}^{-1} \\ \Gamma^{(A)}(1s^2 2s^2 2p^6 3p (^1P_1) 6g) &= 1.063 \times 10^{-4} \text{a.u.} = 4.39 \times 10^{12} \text{s}^{-1} \end{aligned} \right\} (15)$$

将 (11)、(15) 式代入 (10) 式即可得到相应的双电子复合布居类钠铜离子 $6g$ 能级的速率系数。

2 结果与讨论

图 1 给出我们采用上述方法计算的 Cu^{19+} 基态通过三体复合、辐射复合和双电子复合过程复合到 $\text{Cu}^{18+} 1s^2 2s^2 2p^6 6g$ 能级的速率系数随电子温度的变化曲线。由图 1 可见: 在电子温度 $T_e < 150 \text{eV}$ 的低温区域, 随着电子温度降低, 三体复合速率系数迅速增加, 辐射复合速率系数虽然也增加, 但与三体复合速率系数相比增加比较缓慢, 而双电子复合迅速减小, 可以忽略。因此, 在低温等离子体中, 复合过程主要是三体复合。随着电子温度的增加, 三体复合和辐射复合速率系数迅速下降, 双电子复合速率系数迅速上升。当 $T_e > 160 \text{eV}$ 时, 双电子复合速率开始大于三体复合速率系数。因此, 在高温等离子体中, 复合过程主要是双电子复合。

在表 1 中, 我们列出了 $T_e = 50 \text{eV}$ 时, Cu^{19+} 基态通过三体复合过程复合到 Cu^{18+} 各能级的三体复合速率系数。由表中数值可见: 对同 n 不同 l 的能级, 三体复合速率系数随 l 的增大而增大; 对同 l 不同 n 的能级, 三体复合速率系数随 n 的增大而增大。因此, 三体复合优先布居 n 和 l 都较大的高激发能级。

表 1 $T_e = 50\text{eV}$ 时 Cu^{19+} 基态到 Cu^{18+} 各能级的三体复合速率系数 $R_r/(\text{cm}^3\text{s}^{-1})$

Table 1 The three-body recombination rate coefficients from ground state of Cu^{19+} to levels of Cu^{18+} at $T_e = 50\text{eV}$

nl	R_r	nl	R_r	nl	R_r
3s 5	302E-	15 5g 5	545E-	13 7g 2	130E-
3p 1	822E-	14 6s 1	055E-	13 7h 2	604E-
3d 3	679E-	14 6p 3	383E-	13 7i 3	078E-
4s 1	878E-	14 6d 6	115E-	13 8s 3	503E-
4p 6	237E-	14 6f 8	900E-	13 8p 1	105E-
4d 1	183E-	13 6g 1	150E-	12 8d 1	954E-
4f 1	759E-	13 6h 1	406E-	12 8f 2	815E-
5s 4	884E-	14 7s 2	011E-	13 8g 3	634E-
5p 1	588E-	13 7p 6	386E-	13 8h 4	443E-
5d 2	924E-	13 7d 1	140E-	12 8i 5	251E-
5f 4	291E-	13 7f 1	650E-	12 8j 6	060E-

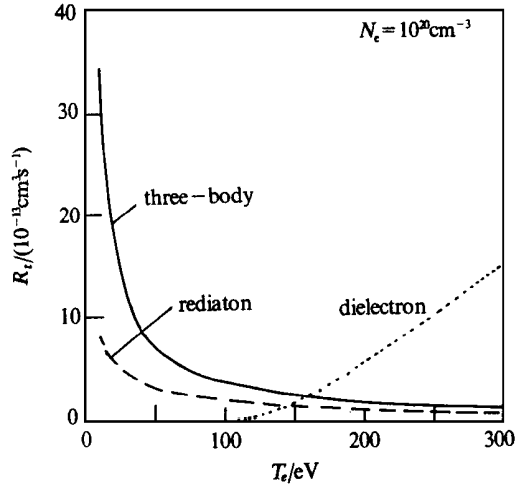


Fig 1 Comparison of recombination rate coefficients

图 1 复合速率系数比较

由以上分析可见, 对通过绝热膨胀速冷的低温激光等离子体, 通过三体复合优先布居高激发能级而产生粒子数反转, 从而产生软 X 射线激光。由此可见, 该复合机制属于三体复合泵浦机制。要提高该复合激光的增益系数应尽量降低电子温度, 提高电子密度以增大三体复合的速率。

参考文献

- 1 Matthew sD L *et al Phys Rev Lett*, 1985, **54**: 110
- 2 徐至展等. *中国科学 (A 辑)*, 1991, **4**: 414
- 3 Zhang Jie *et al Appl Phys, B*, 1994, **58**: 13
- 4 张颖 类钠铜离子激光等离子体软 X 射线激光和原子过程理论研究, 长春: 吉林大学, 原子与分子物理研究所, 1994
- 5 Xu Z Z *et al Chin J Lasers*, 1992, **1**: 1
- 6 Michlis C De *et al Nuclear Fusion*, 1981, **21**: 677
- 7 Seaton M J. *Planet Space Sci*, 1964, **12**: 55
- 8 Kamers H A. *Phil mag*, 1923, **46**: 836
- 9 Burgess A. *A strophysical J*, 1965, **141**: 1588
- 10 Clark R E H *et al A strophysical J Suppl*, 1982, **49**: 545

THREE- BODY RECOMBINATION PUMPING SCHEME OF Na- LIKE Cu SOFT X- RAY LASER

Zhang Ying, Zhu Qiren, and Pan Shoufu

Institute of Atomic and Molecular Physics, Jilin University, Chengdu, 130023

Shi Guizhen

Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 130022

From the calculations of the rates dependence on electron temperature T_e for three- body recombination, radiative recombination and dielectronic recombination from the ground state of Cu^{19+} to $1s^2 2s^2 2p^6 6g$ of Cu^{18+} , we give the low temperature three- body recombination pumping scheme of Na- like Cu soft x- ray laser. The results in Fig. 1 show that the pumping scheme are highly temperature dependent. When $T_e < 150\text{eV}$, the three- body recombination rate increases rapidly as T_e decrease. In the meantime, the radiative recombination rate just increases slowly and the dielectronic recombination rate decreases sharply which can be omitted. Therefore, the three- body recombination is main recombination process in low temperature plasma. On the other hand, when $T_e > 160\text{eV}$, the dielectronic recombination process dominates over the other two processes and becomes the main recombination process in high temperature plasma. In Table 1 we give the rates of three- body recombination from the ground state of Cu^{19+} to the states of Cu^{18+} . The results show that the three- body recombination will prior populate the high excited levels with large n and l .

In conclusion, the scheme producing soft X- ray laser in low temperature plasma produced by adiabatic expanding and rapid cooling method is three- body recombination pumping. We can improve the gain by lowering the electron temperature and increasing the electron density.