

类锂硅离子软 X 射线激光研究

范文慧 王永昌

袁 萍

(西安交通大学物理系, 西安 710049) (西北师范大学物理系, 兰州 730070)

摘 要 在激光等离子体典型参数条件下, 利用碰撞-辐射模型计算了类锂硅离子 $5f-3d$ 和 $4f-3d$ 跃迁的粒子数反转比率和激光增益系数。讨论了不同热平衡条件和不同冷却速度下, 激光增益系数的变化。计算结果表明, 高功率、短脉冲激光产生的高温等离子体在快速冷却条件下能产生软 X 射线激光增益。

关键词 短脉冲激光, 软 X 射线, 激光增益。

1 引 言

近年来, 国内外几个著名实验室相继观测到复合泵浦类锂离子 Al^{10+} 和 Si^{11+} 的 $4f-3d$ 、 $5f-3d$ 、 $6f-3d$ 和 $6d-3p$ 等跃迁的自发发射放大^[1~6]。理论上为了探索等离子体最佳泵浦状态所对应的等离子体参数, 如电子温度、电子及离子密度等, 已进行了大量的模拟计算。通常是用流体动力学模型获得电子温度 T_e 和电子密度 N_e 随时间的变化, 再利用与时间有关的碰撞-辐射模型求解耦合速率方程组。本文假定高功率、短脉冲(几个皮秒)激光作用于气体靶后, 产生的激光等离子体处于某一初始温度 T_e , 且类氢离子基态有最大的布居丰度, 然后在几个皮秒内被冷阱强迫冷却, 在快速冷却过程中, 由于时间尺度很小(几个皮秒), 类氢离子基态 $N(1s^2)$ 和类锂离子基态粒子数布居 $N(1s^2 2s)$ 之比(平衡态丰度比)变化很小, 因此可认为电子密度仍保持初始温度时的值, 同时可忽略等离子体自由膨胀的影响。此外, 还假定等离子体是光性薄的。通过求解耦合速率方程组, 得出有关激发能级的粒子数布居, 从而计算出有关激光跃迁的粒子数反转比率和激光增益系数。

2 理论方法

本文采用碰撞-辐射模型, 模型中考虑了碰撞电离、三体复合、辐射复合、自发辐射、电子碰撞激发与退激发等原子过程, 验证了在所考虑的条件下, 三体复合是类氢离子复合到类锂离子的主要过程, 双电子复合可以忽略。其它所有涉及类氢离子激发、类锂离子自电离和光激发、光电离的过程均未考虑。

本文所考虑的原子模型中, 包括类锂硅离子 $n=2\sim 12$ 的 77 个能级 $1s^2 nl$ 和类氢离子基

态, 决定各能级粒子数布居 $N(Z, q)$ 的耦合速率方程为:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} N(Z, q) = & \sum_{p < q} N_e X(p, q) N(Z, p) - \sum_{p < q} [A(q, p) + N_e Y(q, p)] N(Z, q) \\ & - \sum_{r > q} N_e X(q, r) N(Z, q) + \sum_{r > q} [A(r, q) + N_e Y(r, q)] N(Z, r) \\ & + N_e [A_r(Z+1, 1; Z, q) + N_e A_c(Z+1, 1; Z, q)] N(Z+1, 1) \\ & - N_e S_c(Z, q; Z+1, 1) N(Z, q) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $Z, Z+1$ 分别对应于类锂、类氦离子, X, Y 分别为电子碰撞激发与退激发速率系数, A 为自发辐射衰变几率, A_r 为辐射复合速度系数, A_c 为三体复合速率系数, S_c 为碰撞电离速率系数, q 为类锂硅离子体的 q 能级。原则上, 所考虑类锂离子粒子数布居均可由耦合速率方程组求出, 但计算量相当大。为此, 将考虑的 77 个能级分为超基态、中间束缚态和热带三种情况处理, 以减少耦合速率方程组的数目。

因为类锂离子基态 $1s^2 2s$ 的粒子数布居 $N(1s^2 2s)$ 与类氦离子基态 $1s^2$ 的粒子数布居 $N(1s^2)$ 保持局部热平衡, 故可通过萨哈分布求出 $N(1s^2 2s)$:

$$\begin{aligned} N(1s^2 2s) &= \frac{N_e}{2} N(1s^2) \frac{g(1s^2 2s)}{g(1s^2)} \left(\frac{h^2}{2\pi M_e k T_e} \right)^{3/2} \exp \left(\frac{I_e}{k T_e} \right) \\ &= \frac{1}{3.011 \times 10^{21}} N(1s^2) N_e (k T_e)^{-3/2} \exp \left(\frac{I_e}{k T_e} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $g(i)$ 为能级 i 的统计权重, I_e 为 $1s^2 2s$ 态的电离能, T_e 为电子温度, $I_e, k T_e$ 均取电子伏特为单位。假定在激光短脉冲作用后瞬间, 等离子体中类氦粒子数布居 $N(1s^2)$ 占绝对优势, 则 $N_e \approx 12 \times N(1s^2)$ 近似成立。

相对于其它激发态能级而言, 两个最低激发能级 $1s^2 2p^2 P_{1/2}$ 和 $1s^2 2p^2 P_{3/2}$ 与基态能级 $1s^2 2s$ 相距很近, 而 $2s-2p$ 跃迁的电子碰撞激发速率比 $2s$ 至其它激发能级的大四个数量级^[6], 而且对 $2s$ 与 $2p$ 之间粒子数布居的转移而言, 电子碰撞激发和退激发的速率比 $2p-2s$ 跃迁的自发辐射衰变速率快得多, 使得这三个态之间能迅速交换粒子数, 可认为这三个态组成“超基态”, 其粒子数布居为波尔兹曼分布:

$$N(1s^2 2p) = N(1s^2 2s) \frac{g(1s^2 2p)}{g(1s^2 2s)} \exp(-\Delta E/k T_e) \quad (3)$$

式中 ΔE 为能级 $2s, 2p$ 间的能级差, 单位为电子伏特。取 $n=9 \sim 12$ 的 42 个高激发态能级作为热带, 这些能级的电离能很小, 彼此间强烈地耦合在一起, 并通过碰撞过程与类氦离子基态强烈地耦合在一起, 故假定这些高激发态与类氦离子基态保持局域热平衡, 可用萨哈方程描述:

$$\begin{aligned} N(1s^2 nl) &= \frac{N_e}{2} N(1s^2) \frac{g(1s^2 nl)}{g(1s^2)} \left(\frac{h^2}{2\pi M_e k T_e} \right)^{3/2} \exp(I_e/k T_e) \\ &= \frac{1}{2 \times 3.011 \times 10^{21}} N(1s^2) N_e g(1s^2 nl) (k T_e)^{-3/2} \exp(I_e/k T_e) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $g(1s^2 nl)$ 为能级 $1s^2 nl$ 的统计权重, I_e 为 $1s^2 nl$ 态的电离能。

本文将 $n=3 \sim 8$ 的 35 个能级作为类锂硅离子的中间束缚态, 考虑了所有这些能级间的电偶极自发跃迁, 电子碰撞激发与退激发, 电子碰撞电离, 三体复合与复合辐射, 最后求解耦合速率方程组, 确定了各激发态粒子数布居。因为激发态能级的弛豫过程远快于基态^[7,8],

故可认为激发态粒子数布居的变化可由基态粒子数瞬时补充, 即准静态近似成立, 这样, 对于各激发态能级, 耦合速率方程组(1)中左边 $dN(Z, q)/dt = 0$ 。

激光增益系数计算公式为:

$$G(u \rightarrow l) = (8\pi c)^{-1} [Mc^2/(2\pi kT_i)]^{1/2} g_u A_{u-l} \Delta N_{u-l} (\lambda_{u-l})^3 \\ = 8.725 \times 10^{-35} g_u A_{u-l} (kT_i)^{-1/2} \Delta N_{u-l} (\lambda_{u-l})^3 \quad (5)$$

式中 $\Delta N_{u-l} = (N_u/g_u) - (N_l/g_l)$, g_u 、 g_l 分别为激光跃迁上能级 u 和下能级 l 的统计权重, A_{u-l} 为能级 u 、 l 间自发辐射跃迁几率, λ_{u-l} 为跃迁波长, 单位为 nm。 M 为离子质量, c 为光速。计算中, 假定 $T_i = T_e$, 且谱线展宽机制为多普勒展宽。

3 计算结果及讨论

采用上述碰撞-辐射模型, 在典型的激光等离子体条件下, 计算了激光增益系数和粒子数反转比率与冷却温度的关系, 见表 1、表 2。计算中, 假定在脉宽为几个皮秒的激光作用后, 形成初始电子温度 $T_e = 500$ eV, 电子密度 $N_e = 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的激光等离子体, 其平衡态丰度比 δ (类氦/类锂) = 157^[9]。在冷阱快速冷却下, 经过几个皮秒后, 电子温度降至 100 eV 以下。在此快速冷却条件下, 由于类锂硅离子等离子体中, 电子和离子之间的碰撞导致热动平衡的时间约为 100 皮秒左右, 因此电子和离子来不及交换能量, 故能假定平衡态丰度比不变。

Table 1. Relations between the gain coefficients (cm^{-1}) and the cooling temperature in the quickly cooling plasma

transitions	cooling temperature T_e (eV)					
	30	40	50	60	70	80
4f - 3d	3.45	2.09	1.40	0.98	0.70	0.49
5f - 3d	0.17	0.10	0.06	0.04	0.02	0.81×10^{-2}

Table 2. Relations between the population inversion ratio and the cooling temperature in the quickly cooling plasma

transitions	cooling temperature T_e (eV)					
	30	40	50	60	70	80
4f - 3d	1.75	1.70	1.64	1.58	1.49	1.39
5f - 3d	1.34	1.32	1.28	1.22	1.15	1.06

计算结果表明: 短脉冲激光作用后, 通过快速冷却, 在几个皮秒内, 使等离子体电子温度降到 100 eV 以下能产生激光增益。对 4f - 3d 跃迁, 当该区域等离子体电子温度从初始温度 500 eV 经过几个皮秒降至 30 eV 左右时, 激光增益系数 G 为 3.45, 而 5f - 3d 跃迁的激光增益系数 G 为 0.17。计算结果还表明, 当该区域的等离子体冷却至 30 eV 以下, 激光增益系数已迅速降为零。

在计算激光增益系数和粒子数反转比率时, 还考虑了采用不同热带条件对计算结果的影响。取 $n = 3 \sim 6$ 的 20 个能级为中间束缚态, $n = 7 \sim 9$ 的 24 个能级作热带。计算结果见表 3、表 4。可以看出, 减少热带能级数目, 会使激光增益系数有所减小, 特别对较低冷却温度区 (30 eV 左右) 的等离子体更显著些, 但总的来说, 增加热带数目对计算结果影响不太大。

Table 3. The gain coefficients (cm^{-1}) under the condition of the different thermal bands

transitions	cooling temperature T_c (eV)					
	30	40	50	60	70	80
$4f - 3d$	3.15	2.04	1.41	1.01	0.73	0.51
$5f - 3d$	0.15	0.09	0.08	0.04	0.02	0.83×10^{-2}

Table 4. The population inversion ratio under the condition of the different thermal bands

transitions	cooling temperature T_c (eV)					
	30	40	50	60	70	80
$4f - 3d$	1.76	1.71	1.66	1.60	1.51	1.41
$5f - 3d$	1.33	1.31	1.27	1.22	1.15	1.06

作者在计算中所采用的电子碰撞激发速率系数 $\alpha(2s - nl)$ 、 $\alpha(2p - nl)$ ($n = 3 \sim 12$, $l = 0, 1, 2, 3, 4$) 是根据 Coulomb-Born 交换近似方法算得的。根据 Bely^[10] 关于电子与类锂离子 $2s - 2p$ 碰撞激发截面计算各种近似方法的讨论, 当碰撞电子能量比跃迁能量 $\Delta E(2s - 2p)$ (对 Si^{11+} 离子为 24.8 eV) 高于一倍以上时, Coulomb-Born 交换近似方法与强耦合方法计算结果十分吻合, 当碰撞电子能量与跃迁能量 $\Delta E(2s - 2p)$ 相近时, Coulomb-Born 交换近似方法计算结果比强耦合方法计算结果大百分之几。因此对低能电子(能量约为 30 eV 左右的电子)可能会产生一定的误差, 对增益系数的精确计算会有一定影响。此外, $5f - 3d$ 跃迁的增益系数较小, 可能与该谱线展宽机制有关, 对该跃迁谱线斯塔克(Stark)展宽的贡献可能占主要地位。

参 考 文 献

- [1] S. Suckewer, C. H. Skinner, H. Milchbergo *et al.*, Amplification of stimulated soft-X-ray emission in a confined plasma column. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**(17): 1753~1756
- [2] D. Kim, C. H. Skinner, A. Wouters *et al.*, Soft-X-ray amplification in lithiumlike Al XI (154 Å) and Si XII (129 Å). *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, **B6**(1): 115~125
- [3] Pierre Jaeglé, Gérard Jamelot, Antoine Carillon *et al.*, Soft-X-ray amplification by lithiumlike ions in recombining hot plasma. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1987, **B4**(4): 563~574
- [4] J. C. Moreno, H. R. Griem, S. Goldsmith, Measurements of gain and line broadening in lithiumlike aluminum. *Phys. Rev. (A)*, 1989, **39**(11): 6033~6036
- [5] 徐至展, 范品忠, 张正泉等, 复合泵浦类锂硅离子软 X 射线激光. 中国科学, A 辑, 1991, (4): 414~423
- [6] R. Mewe, Interpolation formulae for the electron impact excitation of ions in the H-, He-, Li-, and Ne-Sequences. *Astron. & Astrophys.*, 1972, **20**: 215~221
- [7] D. R. Bates, F. R. S., A. E. Kingston *et al.*, Recombination between electrons and atomic ions I. optically thin plasmas. *Proc. Roy. Soc. (London A)*, 1962, **267**(1330): 297~312
- [8] A. Klisnick, A. Sureau, H. Guennou *et al.*, Effective rates for Li-like ions; calculated XUV gains in Al^{10+} . *Appl. Phys. (B)*, 1990, **50**: 153~164
- [9] 沈百飞, 滕华国, 徐至展等, 纯热传导冷却产生软 X 射线激光. 光学学报, 1993, **13**(9): 779~782
- [10] O. Bely, Excitation of lithium-like ions by electron impacts. *Proc. Phys. Soc.*, 1966, **88**: 587~595

The Study for Soft-X-Ray Laser in Li-Like Silicon Ion

Fan Wenhui Wang Yongchang

(Department of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Yuan Ping

(Department of Physics, Northwest Teachers College, Lanzhou 730070)

(Received 30 December 1993; revised 16 February 1994)

Abstract Under the typical parameter conditions of laser-produced plasma, the population inversion-ratio values and gain coefficients for transitions $5f - 3d$ and $4f - 3d$ in Li-like silicon ion are calculated by using the collisional-radiative model. We have discussed the effects of different thermal band selections and cooling velocity on the calculated laser gain coefficients. The calculated results show that, when the temperature of the hot plasma is very rapidly lowered after the short driving laser pulse, there are gains in the $4f - 3d$ and $5f - 3d$ transitions.

Key words ultrashort laser pulse, soft-X-ray, laser gain.