

类氦铝离子软 X 射线激光

沈百飞 徐至展 韩申生

(中国科学院上海光学精密机械所, 上海 201800)

摘 要 通过一系列的数值计算, 确定了实现类氦铝离子 $3d^1D_2 - 2p^1P_1$ 跃迁激光增益的最佳等离子体条件, 并提出了用辐射冷却的方法来实现所需的等离子体条件。

关键词 软 X 射线激光, 类氦铝离子。

1 引 言

X 射线激光研究的一个重要目标, 是获得“水窗”波段 (2.33 nm ~ 4.37 nm) X 射线的显著激光增益。复合泵浦机制, 由于其所需的泵浦激光功率密度较低, 相对碰撞激发机制更容易实现这一目标。运用复合泵浦机制实现软 X 射线激光, 在实验和理论上研究得比较多的是类氢, 类锂, 类钠离子。其中类氢 Al, 类锂 Cr, 类钠 Nb 都是重要的实验方案。对于类氦离子^[1,2]则为 Si, 本文研究的类氦 Al 离子, 其激光跃迁 $3d^1D_2 - 2p^1P_1$ 波长为 4.5 nm, 也已很接近“水窗”波段。对于类氢、类锂和类钠机制, 在初始合适的高温条件下, 裸核, 类氢或类氦离子占绝对多数, 快速冷却时, 就会复合到类氢、类锂和类钠离子的高激发态, 然后通过级联跃迁产生反转和激光增益, 类氦机制则略有不同, 因为类氦离子和类氢离子的电离能相差不多, 对铝分别为 2086 eV, 2304 eV。这样在得到类氢离子的同时, 必然也产生大量裸核, 但幸运的是不可能继续电离, 因此仍然可以得到比较大的类氢类氦离子丰度比, 同时类氦铝离子 $n = 2 - 1$ 的能级差达到 1600 eV, 在感兴趣的温度范围内 ($T_e < 200$ eV), $1s^2^1S_0 - 1s2p^1P_1$ 的碰撞激发很小, 这样丰度比的要求就相对比较低。而 $1s^2^1S_1 - 1s2p^1P_1$ 跃迁具有很快的跃迁速率, 使得 $1s2p^1P_1$ 能级能实现粒子数的迅速排空, 从而产生 $1s3d^1D_2 - 1s2p^1P_1$ 的激光增益。和类氢离子机制相比 $2p-1s$ 的跃迁几率要比类氢大 2 倍。在泵浦激光功率要求方面, 类氦离子机制也略低于类氢离子机制。因此类氦机制也是一种值得研究的方案。

2 $1s3d^1D_2 - 1s2p^1P_1$ 增益条件和初步实验结果

2.1 $1s3d^1D_2 - 1s2p^1P_1$ 增益条件

用碰撞-辐射模型^[1]来研究产生类氦铝离子 $1s3d^1D_2 - 1s2p^1P_1$ 激光增益的最佳等离子体条件。原子模型包括类氢离子基态, 类氦离子单重态 $1snl$ ($n = 1 - 6, l = 0 - 5$) 的 21 个能级,

以及 $1s4f\ ^3F_3$ 和 $1s3d\ ^3D_2$ 两个三重态。考虑这两个三重态是因为 $1s4f\ ^3F_3 - 1s3d\ ^1D_2$ 和 $1s3d\ ^3D_2 - 1s2p\ ^1P_1$ 这两条线的振子强度比较大 (GF 分别为 0.178 和 0.151)，而且 $1s2p\ ^1P_1$ 和 $1s3d\ ^1D_2$ 正是有用的激光线的下能级和上能级。因为 $n = 5, 6$ 的能级的电离能较低，假定， $n = 5, 6$ 的能级的粒子数分布总能和类氢离子保持局域热平衡，也即满足萨哈方程：

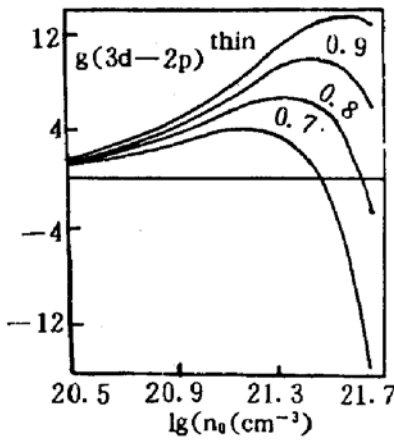
$$N(1s^22s) = \frac{N}{2}g(1s^22s) \frac{N(1s^2)}{g(1s^2)} \left(\frac{h^2}{2\pi m T_e}\right)^{3/2} \exp(I/T_e), \tag{1}$$

类氢离子基态和类氦离子基态的粒子数分布是可调的，以保证在给定电子温度和密度条件下，离化态分布远离平衡态。能级间的跃迁主要考虑自发辐射，电子碰撞激发，电子碰撞退激发等原子过程。在碰撞-辐射模型中用到的能级结构，跃迁几率，振子强度等原子参数都是利用 Cowan 的原子结构与光谱程序^[3]，用 Hartree-Fock 方法计算得到。

由后面的计算知，对类氦铝离子， $1s3d\ ^1D_2 - 1s2p\ ^1P_1$ 跃迁激光增益，最佳等离子体密度大约为 $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ，如果相应的铝离子密度为 $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ，低能级捕获效应对实现 $1s3d\ ^1D_2 - 1s2p\ ^1P_1$ 激光增益的影响极大，所以光性厚度的影响必须加以考虑。由于光性厚度和等离子体参数及几何特性都有关系，难于进行系统计算，因此用直接乘上一个假定的逃逸因子的方法来研究光性厚度的影响。在后面还要研究克服光厚影响的方法。

由定标率 $T_e \propto Z^2$ 及电子温度低于电离能的 10% 这个原则可知道，电子温度大约应低于 175 eV。根据通常的情况，假定在所有铝离子中，类氢占 50%，类氦占 20%。在这种情况下，计算了离子密度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时， $1s3d\ ^1D_2 - 1s2p\ ^1P_1$ 跃迁增益系数随电子密度的变化。不取更高的离子密度是因为离子密度更高时，光厚效应将十分严重。计算结果如图 1 所示。从图中看到在光性薄的情况下，最大增益系数可达 13 cm^{-1} ，这时的最佳电子密度大约为 $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 。考虑光厚影响后，增益系数将显著变小，最佳电子密度也略有减小。从这个计算结果可知，只要能达到所需的等离子体参数，并克服光厚的影响，就可得到显著的激光增益，这和前面的定性分析完全一致。

Fig. 1 $1s3d\ ^1D_2 - 1s2p\ ^1P_1$ transition laser gains of He-like Al ions as a function of electronic density. The electronic temperature $T_e = 170 \text{ eV}$, ionic density $N_i = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and escape factors are 1, 0.9, 0.8, 0.7, respectively



2.2 初步实验结果

实验在本所六路高功率激光装置上进行。激光能量为 10 J，脉宽约为 250 ps，一般为正入射、线偏振、点聚焦打靶，功率密度约为 $2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。用 TAP 晶体谱仪记录激光等离子体所发射的 X 射线谱。图 2 是用晶体谱仪摄得的一张典型的 Al 激光等离子体光谱。可以看出，类氦离子的 $1s2p$ 与 $1s3p$ 能级间发生了十分明显的粒子数反转。

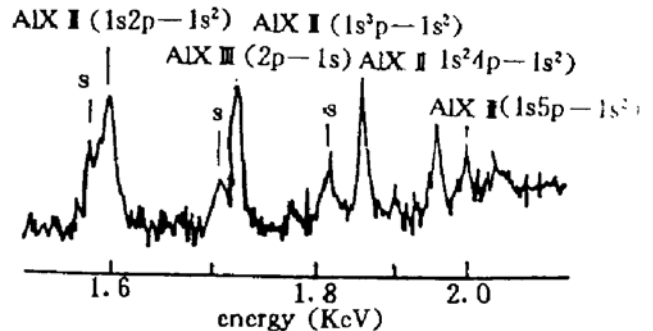


Fig. 2 Microdensitometer trace of He-like Al ions

3 实验方案

综上所述, 实现类氢铝离子复合泵浦软 X 射线激光, 需要高达 $5 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 的电子密度, 以及低于 175 eV 的电子温度, 同时, 还须相当数量的类氢离子。为此, 等离子体必须迅速冷却, 以实现激光等离子体的离子电离态分布远离平衡态。假定电子密度为 $5 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$, 电子温度线性下降, 初始电子温度分别为 2000 eV, 1200 eV, 终了电子温度为 175 eV。计算结果表明, 冷却时间必须分别小于 500 ps 和 300 ps, 才能保证相当数量的类氢离子的存在。

可能的冷却方式有热传导, 绝热膨胀和辐射冷却三种, 由于所需的电子密度很高, 电子热传导难于取重要作用。对于绝热膨胀的情况。一维平板自相似模型为^[4],

$$T_e = T_{e0} \left(\frac{t + t_{\text{pulse}}}{t_{\text{pulse}}} \right)^{-2/3}, \quad (2)$$

由 $T_{e0} = 2000 \text{ eV}$, $t = 500 \text{ ps}$ 和 $T_{e0} = 1200 \text{ eV}$, $t = 300 \text{ ps}$ 两种情况计算可知, 所需泵浦激光脉宽 $t_{\text{pulse}} < 18 \text{ ps}$ 。即只有当泵浦激光脉冲宽度小于 18 ps 时才有可能通过绝热膨胀冷却来实现所需的等离子体条件。同时短脉冲泵浦使得等离子体特征长度变小, 有利于减少光厚的影响。

对于辐射冷却的情况。电子与离子碰撞, 电子失去能量, 离子被激发到高激发态, 再通过辐射光子的方式回到低激发态或基态, 这就是辐射冷却的机制。因为基态粒子数最多, 可以认为, 辐射冷却主要涉及基态。被碰撞激发的粒子数为

$$N_i = N_p N_e S, \quad (3)$$

式中 S 为碰撞激发系数。这些粒子可通过自发辐射, 碰撞退激发, 和碰撞激发损失, 因此通过自发辐射损失的粒子数为

$$N'_i = N_i \frac{A}{A + N_e S \exp(\Delta E/T_e) + N_e S'} \quad \text{cm}^{-3} \text{ s}^{-1}, \quad (4)$$

总的能量损失为

$$K_{\text{total}} = N'_i \Delta E, \quad \text{cm}^{-3} \text{ eVs}^{-1}, \quad (5)$$

平均每个电子的能量损失为

$$K_e = (K_{\text{total}}/N_e), \quad \text{eV/s}, \quad (6)$$

由于碰撞激发系数 $S \propto \exp(T_e/\Delta E)$, 所以特征能级差 ΔE 比较小的高 Z 元素辐射冷却的效率更高。用高 Z 元素和铝的混合靶, 能更有效地冷却等离子体, 得到电子密度比较高, 而类氢铝离子密度比较低的等离子体, 从而消除光厚的影响。

以铜为例进行计算, 其特征能级为 $\Delta E = 300 \text{ eV}$, 铜和铝的比例分别为 90% 和 10%。用 CASTOR 2 程序^[5] 计算等离子体参数的时空变化。CASTOR2 原为二维点聚焦模型, 使等离子体在 R 方向静止, 从而变成一维平板模型。在计算中, 泵浦激光脉宽为 116 ps, 功率密度为 $1.1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 波长为 $0.53 \mu\text{m}$, 空间步长 $10 \mu\text{m}$, 时间步长 100 fs。用计算得到的等离子体参数, 计算铝元素电离态分布的时空变化, 然后用上面描述的碰撞-辐射模型计算 $1s3d^1D_2 - 1s2p^1P_1$ 的激光增益系数。由于类氢铝离子的密度比较

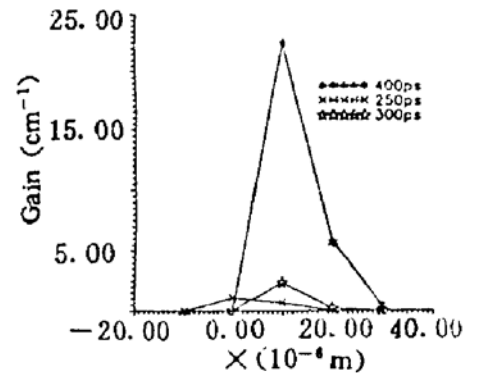


Fig. 3 $1s3d^1D_2 - 1s2p^1P_1$ transition laser gains of He-like Al ions as a function of distance from the target surface, at the time 250 ps, 300 ps, 400 ps later, respectively

低, 这里忽略光厚的影响, 计算结果如图 3, 从图 3 可知, 激光增益出现在临界密度附近, 时间为 250 ps 以后, 激光增益系数可达 20 cm^{-1} 以上。

结 论 通过一系列的计算表明, 用辐射冷却实现复合泵浦类氦铝离子 $1s3d^1D_2 - 1s2p^1P_1$ 的显著激光增益是完全可能的, 所需的等离子体参数为电子温度低于 175 eV, 电子密度约为 $1.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 。实现的实验方法是采用高 Z 元素和铝的混合靶。实验结果表明, 类氦机制确实很有希望。

参 考 文 献

- [1] J. P. Apruzese, P. C. Kepple, J. Davis *et al.*, Recombination lasing in heliumlike silicon; a possible path to the water window. *IEEE T. P. S.*, 1988, 16(5): 529~533
- [2] 马国彬, 谭维翰, MgXI 等离子体软 X 射线自发辐射放大增益的数值模拟. *光学学报*, 1991, 11(12): 1057~1062
- [3] R. D. Cowan, *The Theory of Atomic Structure and Spectra*. University of California Press, Berkely, California, 1981: 214
- [4] Shen Baifei, Xu Zhizhan, Teng Huaguo *et al.*, Theoretical calculation of soft X-ray laser gains for Li-like Ca ion. *Proc. SPIE*, 1928: 172~177
- [5] J. P. Christasen, N. K. Winsor, CASTOR 2: A two dimensional laser target code, *Comput. Phys. Commun.*, 1979, 17(2): 397~412

Soft X-Ray Laser of He-Like Aluminium Ions

Shen Baifei Xu Zhizhan Han Shensheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, SHanghai 201800)

(Received 8 December 1993)

Abstract Through numerical calculations, the plasma conditions by which the $1s3d^1D_2 - 1s2p^1P_1$ transition laser gain can be produced, have been obtained. The method of radiative cooling used to produce the necessary plasma conditions have been proposed.

Key words X-ray laser, He-like aluminium ion