

短脉冲泵浦类锂铝离子 X 射线激光模拟

沈百飞 张文琦 徐至展 陆培祥 张正泉

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 建立了适合描述短脉冲激光泵浦类 Li 离子产生 X 射线激光的简化流体和原子动力学模型。短脉冲激光泵浦纤维靶产生等离子体的电子密度、电子温度、电离态分布等和驱动激光功率密度、脉宽及纤维靶半径相联系。研究了类 Li 铝离子 $4f-3d$ 跃迁激光增益系数随时间的演化过程, 以及峰值增益和泵浦激光功率、脉宽及纤维靶半径之间的关系。

关键词 X 射线激光, 短脉冲激光, 简化模型

1 引言

自从获得复合机制 X 射线激光首次实验以来^[1], 人们一直在从用复合机制获得更短波长 X 射线激光和更大的激光增益长度乘积这两方面努力。最近激光技术的发展使得用 ps 或亚 ps 短脉冲激光进行 X 射线激光的实验成为可能, 并正在成为 X 射线激光研究领域特别令人感兴趣的方案之一。这主要是由于超短脉冲激光泵浦产生 X 射线激光在机制方面有着其特有的优点, 同时比较容易实现小型化。

用超短脉冲激光泵浦产生复合机制 X 射线激光主要有两种方案。第一种是多光子电离或强场电离^[2~4], 由于泵浦激光功率密度很高(可达 10^{18} W/cm^2), 电子在这样高的场强下被直接电离而产生高阶的离子, 同时不加热等离子体。这样可以产生高电离度, 同时是低温的高密度或低密度等离子体, 然后通过复合产生激光增益, 用这种方案, 甚至能产生到基态的激光增益。这里用的激光脉宽大多为 100 fs 量级。第二种仍是传统的用激光加热电子^[5,6], 然后通过电子碰撞产生高阶离子。我们早就知道, 这样形成的等离子体, 由于初始密度高, 体积小, 很容易因迅速膨胀而快速冷却, 从而实现复合机制 X 射线激光所需的等离子体条件, 即低温下, 等离子体远离平衡态分布, 这里的激光脉宽常为 ps 量级。本文即讨论这种情况。

2 模型

在超短脉冲激光和固体靶相互作用时, 大多数的相互作用及能量沉积发生在趋肤深度内。我们假定正是这部分等离子体将产生 X 射线激光, 其体积近似为 $\pi[R_0^2 - (R_0 - l_s)^2]L$, 这里 R_0 和 L 分别为纤维靶的半径和长度, l_s 为趋肤深度 ($l_s = c/\omega_{pe}$), ω_{pe} 为等离子体频率。等离子体的初始电子温度采用 Fedosejev 等的公式^[7]

$$T_{e0} = 1.331 \times I_{ab}^{4/9} \tau^{2/9} C_v^{-2/9} K_0^{-2/9} \quad (1)$$

这里 I_{ab} 为吸收的激光强度, τ 为激光脉宽, C_v 为热容, K_0 为电子热传导系数。

$$C_v = \frac{3}{2} N_e K_B \quad (2)$$

$$K_0 = 20 \left(\frac{2}{\pi} \right)^{3/2} \frac{K_B^{7/2}}{m_e^{1/2} e^4 Z \ln \Lambda} \varepsilon \delta_T \quad (3)$$

这里 K_B 为玻尔兹曼常数, m_e, e 为电子质量和电荷, $\varepsilon \delta_T$ 为修正项, $\ln \Lambda$ 为库仑对数

$$\ln \Lambda = \ln \left[\frac{3(K_B T)^{3/2}}{Z(4\pi N_e)^{1/2} e^3} \right] \quad (4)$$

这里所有的变量单位均为 cgs 制。

在激光加热期间, 可认为等离子体是等温膨胀, 其速度为离子声速 [$C_s = (\gamma Z K_B T_{e0} / M_i)^{1/2}$], 这里 M_i 为离子质量, $\gamma = 5/3$ 为理想气体绝热系数, 因此激光加热约束时平均等离子体电子密度可写为^[6]

$$N_{e0} = \frac{Z_0 N_0 [R_0^2 - (R_0 - l_s)^2]}{(R_0 + C_s \tau)^2 - (R_0 - l_s)^2} \quad (5)$$

同时假定激光加热结束时, 电离态分布满足碰撞 - 辐射平衡, 这样就可由输入变量激光功率密度, 脉宽和纤维靶半径解得 T_{e0}, Z_0, N_{e0} 等初始等离子体参数。在激光加热结束后, 等离子体接着经历的是绝热膨胀过程。这样我们可以有

$$N_e = N_{e0} V_0 / V \quad (6)$$

$$T_e = T_{e0} (N_e / N_{e0})^{\gamma-1} \quad (7)$$

这里 γ 是绝热指数, $V_0 = \pi L [(R_0 + C_s \tau)^2 - (R_0 - l_s)^2]$, $V = \pi L [(R_0 + v\tau)^2 - (R_0 - l_s)^2]$ 分别为加热结束时和自由膨胀时的体积, $v = 3C_s$ 为自由膨胀速度。这里我们假定由电子热传导产生的那部分等离子体, 由于其膨胀速度比较小, 被认为是不动的。

在得到等离子体参数以后, 可以用碰撞 - 辐射模型来求解多能级粒子数布居随时间的演化。需要指出的是, 在短脉冲激光加热时, 由于原子弛豫时间不能认为很短^[9], 因此对速率方程, 不能认为 $dN_i/dt = 0$ 。 $n = 6 \sim 7$ 的粒子数布居也通过三体复合等直接计算, 而不象长脉冲激光泵浦时假定为满足萨哈 - 玻尔兹曼平衡。类 He 离子的数目写为

$$N_i = N_{i0} (V_0 / V) \exp \left(- \int \alpha_3 N_e^2 dt \right) \quad (8)$$

这里 α_3 为三体复合系数。由于超短脉冲产生的等离子体很薄, 这里还采用了光性薄近似。仍然假定谱线展宽为多普勒展宽, 可得到激光增益系数公式为

$$G = 8.7 \times 10^{-21} (\lambda^2 / \Delta \lambda) gf (N_u / g_u - N_l / g_l) \quad (9)$$

这里 $\Delta \lambda$ 为谱线展度, gf 为振子强度, N_u, N_l 为上、下能级的粒子数, g_u, g_l 为相应的统计权重。

上述模拟, 特别是流体部分的有效性已被详细的模拟证实^[6]。

3 结 果

根据上面建立的模型, 本文针对类锂铝离子 $4f-3d$ 跃迁进行了计算。图 1 为 2ps 激光泵浦半径为 4 μm 的纤维靶的情况, 可见电子密度和温度在早期下降特别迅速, 这是由于早期等离子体体积的相对变化特别迅速。最大增益出现在大约 30 ps 左右, 这时的电子密度大约为 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 电子温度大约为 30 eV, 增益的时间区域大约为 40 ps。

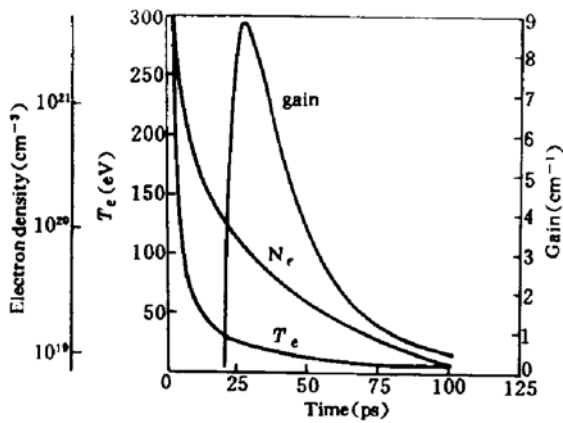


Fig. 1 Time evolution of electron temperature, electron density and gain coefficient obtained from the model calculation with the conditions of $I_{obs} = 4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, $t = 2 \text{ ps}$, $R = 4$ for Li-like aluminum

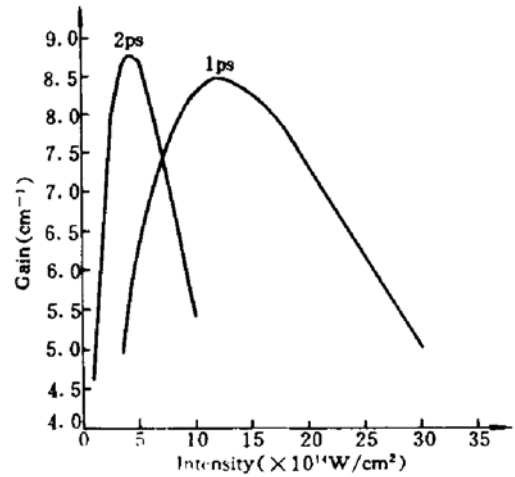


Fig. 2 Calculated laser intensity dependencies of gain coefficient, with the condition of $t = 2 \text{ ps}$ and 1 ps , $R = 4 \text{ m}$ for Li-like aluminum

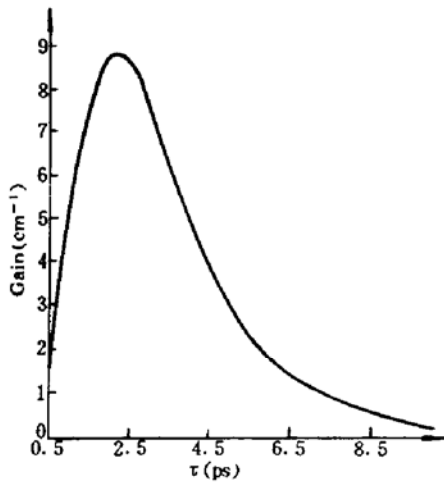


Fig. 3 Calculated pulse duration dependencies of gain coefficient, with the condition of $I = I_{obs} = 4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, $R = 4 \text{ }\mu\text{m}$ for Li-like aluminum

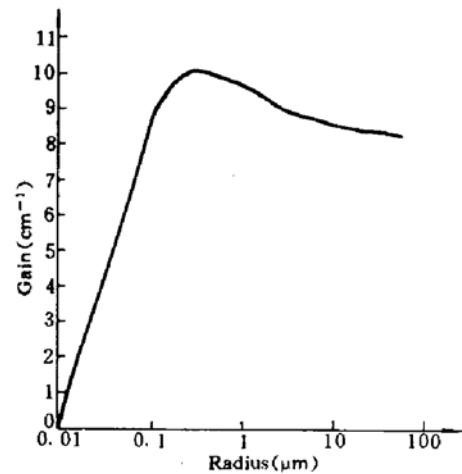


Fig. 4 Calculated fiber radius dependencies of gain coefficient, with the condition of $t = 2 \text{ ps}$, $I_{obs} = 4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ for Li-like aluminum

下面研究峰值增益数和泵浦激光及靶条件的关系。从图 2 可以看到峰值增益随功率密度的变化,当激光脉宽为 2 ps,靶半径为 4 μm ,在这种条件下,最佳功率密度大约为 $4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。由此也可以计算出,对焦线宽 10 μm ,长 5 mm 这样的聚焦系统,所需的泵浦激光能量为 400 mJ。当激光脉宽为 1 ps 时,最佳的功率密度大约为 $1.2 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$,这比 2 ps 时大了三倍,这主要是对于更短的脉冲,需要更大的功率密度,才能保证所需的激光能量。我们进一步研究在泵浦激光功率密度为 $4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$,靶半径为 4 μm 时峰值增益和激光脉宽的关系(图 3)。可以看到大约在 2 ps 时,峰值增益达到最大。过长的脉宽,由于总能量太大,以至初始电子温度过高,同时长脉宽不利于迅速冷却,因此峰值增益变小,而过窄的脉冲,则主要是由于能量过小,而使初始电子温度太低。图 4 是峰值增益和靶半径的关系,靶半径过小时,由于初始电

子密度过低因而不适合产生 X 射线激光增益。靶半径过大时,因冷却速度变慢,从而导致峰值增益变小,但并不会使增益变小很多。也即,即使使用平板靶,而不是纤维靶,我们仍能得到较大的激光增益。

参 考 文 献

- 1 S. Suckewer, C. H. Skinner, H. Milchberg *et al.*. Amplification of stimulated soft X-ray emission in a confined plasma column. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55** : 1753
- 2 P. Amendet, D. C. Eder, S. C. Wilks. X-ray laser by optical-field-induced ionization. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66** : 2589
- 3 N. H. Burnett, Enright. Population inversion in the recombination of optically ionized plasma. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1990, **QE-26** : 1997
- 4 D. C. Eder, P. Amendet, L. B. DaSilva *et al.*. Table X-ray lasers. *Phys. Plasma*, 1994, **1** : 1744
- 5 J. Zhang, M. H. Key, P. A. Norreys *et al.*. Intensity ratio of resonance line as a diagnostic of initial conditions suitable for XUV laser action in recombining plasmas. *Opt. Commun.*, 1993, **95** : 51
- 6 Y. Li, J. Zhang. A compact model for ultra-short pulse driven recombination X-ray lasers in hydrogen-like ions. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1994, **27** : 1
- 7 R. Fedosejevs, R. Ottmann, R. Sigel *et al.*. Absorption of subpicosecond ultraviolet laser pulse in high density plasma. *Appl. Phys.*, 1990, **B50** : 79
- 8 沈百飞, 徐至展, 张文琦. 类锂铝离子“纯原子”弛豫及粒子数布居的数值计算. *中国激光*, 1993, **A20** : 291

Simulation for Ultra-short Pulse Driven X-ray Lasers in Li-like Aluminum Ions

Shen Baifei Zhang Wenqi Xu Zhizhan Lu Peixiang Zhang Zhengquan

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

Abstract A compact model for the description of ultra-short pulse driven X-ray lasers in Li-like ions is established. Initial electron density, electron temperature and distribution of plasma of the fibre target irradiated by ultra-short pulses have been related to the intensity and pulse duration of driving lasers and fibre radius. Evolution of Li-like aluminum ion X-ray laser gains with time is investigated as well as peak gain dependencies upon the driving laser pulse intensity and the duration and fibre radius

Key words X-ray laser, short pulse laser, compact model