

类锂硅软 X 射线激光模拟

沈百飞 王晓方 徐至展 滕华国 张文琦

周忠源 潘守甫

(中国科学院上海光学精密机械研究所,

上海 201800)

(吉林大学原子与分子物理研究所,

长春 130023)

摘 要 对 116 ps, 功率密度为 $5.4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 的激光脉冲和硅平板靶的相互作用进行了数值模拟, 得到了类锂硅离子 4f 粒子波居数和 4f-3d 跃迁增益系数的时空变化, 并与实验结果进行了比较。

关键词 软 X 射线激光, 类锂硅离子。

1 引 言

类锂离子方案是软 X 射线激光复合泵浦机制的一个非常重要的方案。自从法国南巴黎大学最早开始复合泵浦类锂铝离子软 X 射线激光实验研究以来^[1], 世界上不少著名实验室, 包括具有大型激光装置的实验室, 如劳伦斯·里弗莫尔国家实验室, 也相继开始软 X 射线激光的研究^[2], 上海光机所也在 LF12 激光装置上进行了一系列成功的实验^[3]。复合机制具有所需泵浦光功率密度比较低, 易向短波长推进等优点, 引起人们广泛的兴趣, 同时又有增益乘积 GL 不易做大等缺点。为此, 人们提出了短脉冲泵浦(1ps~100 ps)^[4], 超短脉冲泵浦(<1 ps)^[5], 辐射冷却^[6], X 射线泵浦等方案^[7]。在最近进行的类锂硅离子软 X 射线激光实验中, 作者采用短脉冲激光打靶, 取得了成功。为了更好地理解实验中的物理过程, 对激光与靶相互作用, 电离动力学和三体复合产生粒子数反转及激光增益的物理过程进行了数值模拟, 并将计算结果和实验进行比较。

2 理论模型和计算方法

激光与靶相互作用的物理过程, 用下面一组方程描述:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p - \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \nabla F_L = 0, \quad (2)$$

$$c_{ve} \frac{\partial \mathcal{N}_e}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{F}_e - \nabla \cdot \mathbf{F}_L - S_r - P_{\omega} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} - K, \quad (3)$$

$$C_{vi} \frac{\partial T_i}{\partial t} = -\nabla \cdot F_i + K, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times \mathbf{u} \times \mathbf{B} = -\nabla \times \mathbf{E}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = A f, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_R}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{F}_R + S_R, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \varepsilon \mathbf{u} + p \nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (8)$$

其中, ρ , u , T_e , T_i , B , f , ε , ε_R 分别为流体密度, 流体速度, 电子温度, 离子温度, 电离度, 辐射场能量密度, 内能密度。为计算等离子体参数的时空变化, 用了二维流体程序 CASTOR 2^[8], 该程序原为二维点聚焦模型, 现使流体在 r 方向不动, 从而变成一维平板模型。计算中同时考虑了电子温度, 离子温度和辐射温度, 打靶激光脉宽为 116 ps, 功率密度为 $5.4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。在计算中调用了计算原子过程的程序包 TRIP^[9]。由于二维流体程序 CASTOR 2 采用的是欧拉形式, 为了得到等离子体电离态分布的准确结果, 利用 CASTOR 2 程序输出的等离子体参数及流体速度的时空分布, 得到各个流体元位置和等离子体参数的时间变化, 再利用自己编制的计算电离态分布的程序, 得到各流体元电离态分布的时间变化。利用这些等离子体参数, 可以用碰撞-辐射模型^[10]计算类锂硅离子 $4f$ 粒子布居数和 $4f-3d$ 跃迁增益系数的时空变化。碰撞-辐射模型所需的原子参数, 如能级结构及各跃迁的光谱性质: 跃迁波长, 振子强度, 跃迁几率等, 用 Cowan 的大型原子结构与光谱计算程序包^[11], 用 Hartree-Fock 自洽场方法进行计算。计算结果和已有理论值及实验值都能很好符合。

3 计算结果与讨论

用上述的理论模型和计算方法, 进行了计算, 图 1 是距靶面不同距离处类锂硅离子 $4f$ 粒子布居数随时间的变化。可以看到, 距靶面较近的地方, 峰值布居数比较大, 峰值布居数出现的时间比较早, 布居数随时间的变化比较快, 而距靶面较远的地方则相反。这是因为等离子体先膨胀到距靶面较近的地方, 所以距靶面较近的地方较早出现 $4f$ 粒子布居, 同时由于距靶面较近的地方, 密度较高, 使类氮离子的绝对数量可以比较大, 而三体复合速率也比较快, 因此类氮离子数量迅速减少, 从而 $4f$ 粒子布居数的减小也比较快。所以, 近靶面处 $4f$ 粒子峰值布居数比较大, 而峰值出现的时间比较早。图 2 是距靶面 $160 \mu\text{m}$ 处, 类锂硅离子 $4f-3d$ 激光增益系数和 $4f$ 粒子布居数随时间的变化, 计算表明, 最大 $4f$ 粒子布居数出现在 1.3 ns, 而最大激光增益则出现在 500 ps, 这时的 $4f$ 粒子布居数还不是很大。可以认为这是由于当等离子体膨胀到观测空间一段时间后, 虽然电子温度还没有冷却得很低, 但因为电子密度比较合适, 而且离子温度比较低, 因而激光增益线的多普勒展宽还不小。离子温度比较低是因为电子能量还没来得及很多地传给离子。而后随着电子密度的增加, 虽然仍有较多的类氮离子, 由于 $4f$ 和 $3d$ 的粒子数分布逐渐趋向玻耳兹曼分布, 增益系数变小, 乃至变负, 这时 $4f$ 的粒子数布居则仍在增加, 而后随着类氮离子的进一步减少, 类锂离子 $4f$ 和 $3d$ 上布居粒子数的绝对数量也逐渐减少, 因此增益系数再次变大, 但增益系数一般不会重新变正, 即使为正,

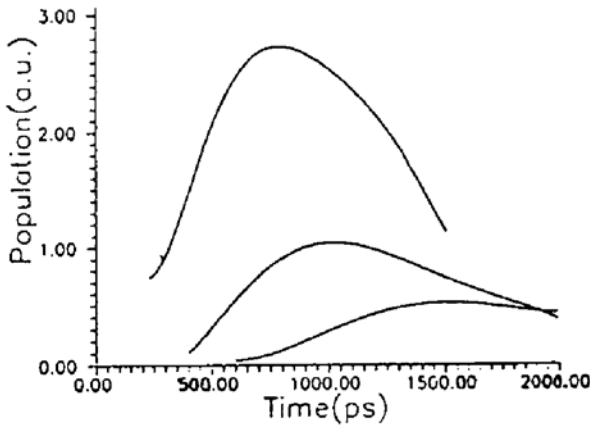


Fig. 1 Population of energy level 4f of Li-like Si ions, as a function of time at the site 60 μm , 120 μm and 200 μm far from the target surface, respectively

也必然很小。这里需要说明的是，在增益计算公式中，仍用多普勒展宽，这是因为在产生 X 射线激光的等离子体区域，依然是多普勒展宽占主导，而不是斯塔克展宽^[12,13]。图 3 为距靶面不同距离处，类锂硅离子 4f-3d 激光增益随时间的变化。可以看到，距靶面较远的地方，增益峰值出现的时间较晚，而持续的时间则比较长。而且与实验比较可以知道，距靶面较近地方，理论值和实验值差别不大，随着距靶面距离的增大，理论值与实验值的差别变大，这是膨胀冷却在起作用。在理论计算中，所用模型是一维平板模型，而实际实验中，用的是线聚焦，焦线为 110 $\mu\text{m} \times 18 \text{ mm}$ ，所以在距靶面较远的地方 (<110 μm)，膨

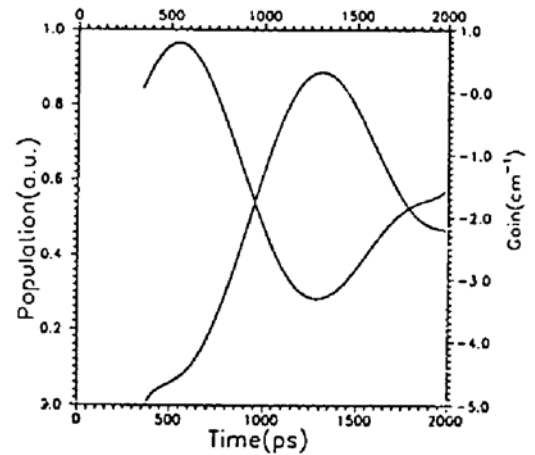


Fig. 2 Population of energy level 4f and gain of transition 4f-3d of Li-like Si ions as a function of time at the site 160 μm far from the target surface

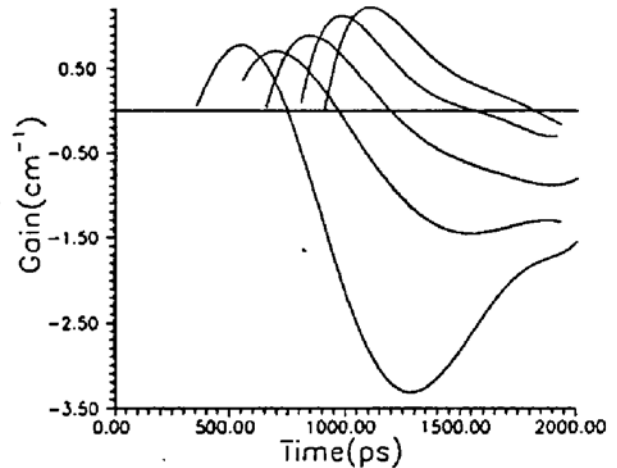


Fig. 3 Gain of transition 4f-3d of Li-like Si ions as a function of time at the site 160 μm , 200 μm , 240 μm and 320 μm far from the target surface, respectively

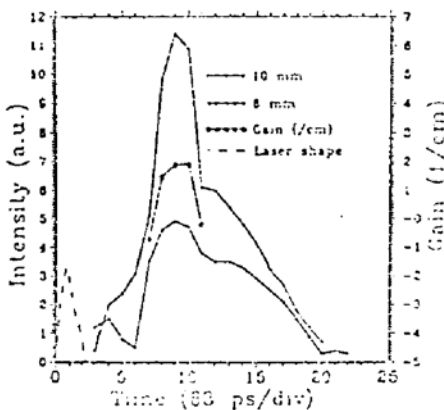


Fig. 4 Experimental gain and intensity of transition 5s-3d of Li-like Si ions as a function of time at the site 160 μm far from the target surface

胀冷却仍可认为近似一维的，而在距靶面较远的地方，二维膨胀冷却将起作用，因此，理论值和实验的差别变大。这也说明，用短脉冲激光打靶时，如果不相应减小焦线宽度，二维膨胀冷却的效应将减小，从而影响等离子体的快速冷却。分析图 2，图 3，还可以获得增益系数和谱线强度的关系。从图 2 可以定性地看到，放大发生在 4f 粒子布居数增加时，而后则出现吸收，所以谱线强度的峰值，相对 4f 粒子布居将提前，在距靶面更远的地方，等离子体密度增加到一定数量后，变化不再显著，这也表现在 4f 粒子布居数变化将比较平缓，这时激光增益将显著改变谱线强度的时间分布，并使得激光增益的峰值，与谱线强度的峰值基本出现在同一时刻。

谱线强度的详细计算需要考虑大尺度等离子体中线辐射输运过程,这已超出本文考虑的范围。

本文还对 $5f-3d$ 跃迁进行了计算,发现实际 $5f$ 粒子布居数和 $5f-3d$ 跃迁增益的变化趋势与 $4f-3d$ 跃迁相似,只是 $5f-3d$ 跃迁的增益系数明显小于 $4f-3d$ 。

实验是在 LF12 激光装置上进行的,激光脉宽为 116 ps,焦线为 $110\ \mu\text{m} \times 18\ \text{mm}$,功率密度 $5.4 \times 10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$,图 4 为距靶面 $150\ \mu\text{m}$ 处,类锂硅离子 $5f-3d$ 跃迁谱线强度和激光增益系数随时间的变化。理论结果和实验在定性上能很好符合。

感谢 J. P. Christiansen 教授在 CASTOR 2 程序调试过程中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] G. Jaegle, G. Jamelot, A. Carillon *et al.*, Soft X-ray Amplification by lithiumlike ions in recombining hot plasmas. *J. O. S. A. (B)*, 1987, 4(4): 563~573
- [2] C. J. Keane, N. M. Ceglio, B. J. MacGowan *et al.*, Soft X-ray laser sourcedevelopment and applications at Lawrence Livermore National Laboratory. *J. Phys. (B)*, 1989, B22(21): 3343~3362
- [3] 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,1991,11(4): 414~423
- [4] M. Steyer, F. P. Schafer, S. Szatmari *et al.*, Feasibility of laboratory X-Ray laser pumped by ultrashort UV laser pulse. *Appl. Phys. (B)*, 1990, B50(4): 265~273
- [5] N. H. Burnett, G. D. Enright, Population Inversion in Recombination of Optically-Ionized Plasmas. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, 26(10): 1797~1808
- [6] J. P. Apruzese, P. C. Kepple, J. Davis *et al.*, Recombination Lasering in Heliumlike Silicon; A possible Path to the Water Window. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1988, 16(5): 529~533
- [7] Baifei Shen, Zhizhan Xu, Huaguo Teng *et al.*, X-ray laser pumped by intense X-ray. *Chinese Phys. Lett.*, 1993, 10(Suppl.): 223~225
- [8] J. P. Christasen, N. K. Winsor, CASTOR2; a two dimensional laser target code. *Comput. Phys. Commun.* 1979, 17(2): 397~412
- [9] J. Magill, TRIP1, Time-dependent recombination ionisation package. *Comput. Phys. Commun.*, 1978, 16(1): 129~135
- [10] 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,1993,20(4): 291~295
- [11] R. D. Cowan, *The theory of Atomic Structure and Spectra*, University of California Press, Berkely, California, 1981: 214
- [12] P. A. Loboda, V. A. Lykov, V. V. Popova, Line shape for the $n=5$ to $n=3,4$ transition of Lithium-like ions for laboratory X-ray laser. *Proc. SPIE.*, 1992, 1028: 145~156
- [13] R. C. Elton, *X-Ray Laser*, Academic Press, San Diego, 1990, 17

Simulation of X-Ray Laser for Li-Like Silicon

Shen Baifei Wang Xiaofang Xu Zhizhan Teng Huaguo Zhang Wenqi

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

Zhou Zhongyuan Pan Shoufu

(Institute of Atomic and Molecular Physics, Jilin University, Changcheng 130023)

(Received 8 December 1993)

Abstract Simulation of X-ray laser has been performed for Li-like silicon, pumped by the 116 ps laser pulse with intensity of $5.4 \times 10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$ and wavelength of $1.06\ \mu\text{m}$. The results have been compared with experiment.

Key words soft X-ray laser, Li-like silicon ions.