

泵浦功率密度对复合类锂离子 X 射线激光特性的影响*

陆培祥 徐至展 张正泉
范品忠 王晓方 孙 岚

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文通过分析不同泵浦功率密度下类锂离子 X 射线激光的实验结果以及有可能实现 X 射线激光的其它类锂离子的光谱特性, 表明利用类锂离子复合方案, 在现有驱动激光装置上实现“水窗”波段放大器有很大的可能性。

关键词: 类锂离子, X 射线激光, 泵浦功率密度。

一、引 言

自从 20.6 nm 和 20.9 nm 极紫外放大器被成功地演示以来^[1], 人们为探索波长小于碳的 K 吸收边 (4.376 nm) 的放大器付出了很大的努力, 其主要目的是为了获得波长在碳和氧的 K 吸收边之间, 即“水窗”波段, 以适用于作为研究生物活样品的全息照像的、具有高亮度的单色相干光源。虽然目前利用爆炸箔靶已使类氙 3p—3s 跃迁 (20.6, 20.9 nm) 放大器达到增益饱和并具有较好的相干性, 而且其结果也可以外推到高 Z 离子 (例如 Y²⁹⁺, Mo³²⁺), 但是由于所要求的泵浦功率密度随 Z 迅速增高而使类氙离子碰撞激发方案不适于按原子序数 z 外推到“水窗”波段。比如, 为了获得波长小于 4.376 nm 的 Gd⁵⁴⁺ 离子 3p—3s 跃迁放大器, 大约需要 10¹⁶ W/cm² 的泵浦功率密度^[2]; 这对目前所拥有的驱动激光器来说是不可能产生一较长的等离子体柱来获得大的增益长度积的。相反, 类锂离子复合泵浦所要求的泵浦功率密度低, 效率高及迅速按原子序数 Z 定标至“水窗”波段, 故很有可能在目前的驱动激光装置上获得“水窗”波段的 X 射线放大器。基于这一考虑, 我们进行了类锂离子复合 X 射线激光实验, 并获得了类锂离子 5f—3d (8.89 nm)、5d—3p (8.73 nm)、6f—3d (7.58 nm) 和 6d—3p (7.46 nm) 跃迁的自发发射放大的实验证明^[3]。本文在这一基础上, 进一步研究了类锂离子 X 射线激光对泵浦激光功率密度的依赖关系, 找到了一合适的泵浦功率密度并取得了较大的增益系数。另外, 本文还给出了有可能产生激光作用的类锂离子跃迁的光谱数据, 并分析了用类锂离子复合泵浦实现“水窗”波段 X 射线放大器的可能性。

收稿日期: 1991年1月11日; 收到修改稿日期: 1991年4月8日

* 本项目得到中国科学院重大项目; 国家自然科学基金和国家高技术项目的资助。

二、实验布局

实验是在上海光机所高功率激光联合实验室 LF12* 激光装置上进行的, 驱动激光的波长为 $1.053\ \mu\text{m}$, 脉冲宽度 (FWHM) 约为 900 ps, 激光输出能量起伏小于 10%, 其实验布局图如图 1 所示。图 1 中, 输出激光经六单元组合柱面透镜-非球面透镜组合^[4]线聚焦在 1 mm 厚、表面抛光的平面硅靶上, 产生高度离化的均匀线状硅等离子体增益介质。均匀辐照的焦线长度为 20 mm, 焦线宽度为 $130\ \mu\text{m}$, 其轴向的辐照强度起伏小于 5%。实验所采用的三种泵浦功率密度分别为 1.3, 2.5 和 $4.7 \times 10^{12}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。通过改变靶的长度得到本实验所需的不同长度 (6, 9, 12, 15, 18 mm) 的线状硅等离子体增益介质。

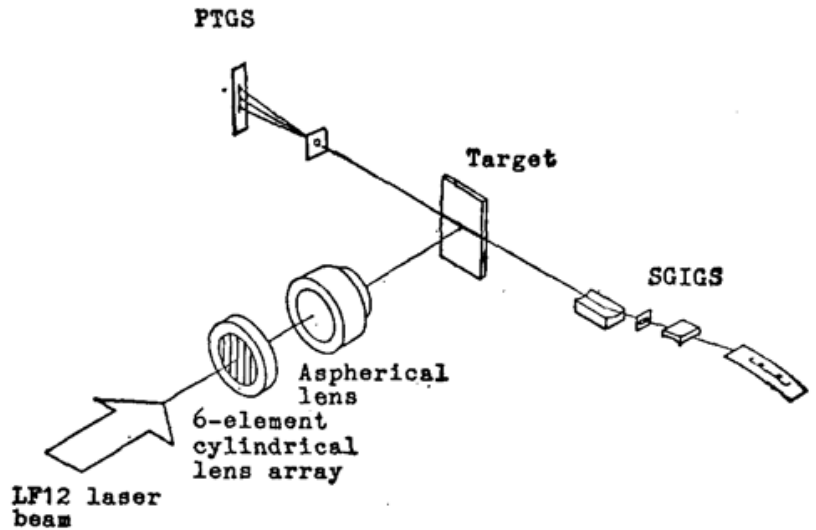


Fig. 1 Schematic of the experiment setup.

实验中, 1 m 消像散掠入射光栅光谱仪 (SGIGS)^[5] (摄谱范围: 2.0~12.0 nm, 光谱和空间分辨为 0.005 nm 和 $50\ \mu\text{m}$) 和针孔透射光栅光谱仪^[6] (摄谱范围: 0.5~25.0 nm, 光谱和空间分辨为 0.2 nm 和 $60\ \mu\text{m}$) 分别被相向放置于水平焦线的两端, 用来测量增益和等离子体参数。实验所用记录软片是已标定的灵敏 Kodak 101-01 软片^[7]。

三、实验结果和讨论

在上海光机所高功率激光联合实验室 LF12* 激光装置上, 利用 1 m 消像散掠入射光栅光谱仪, 获得了三种不同泵浦功率密度下的类锂离子 $5f-3d$ (8.89 nm)、 $5d-3p$ (8.73 nm)、 $6f-3d$ (7.58 nm) 和 $6d-3p$ (7.46 nm) 跃迁的自发发射放大。图 2 给出了增益系数最大的类锂离子 $5f-3d$ (8.89 nm) 跃迁激光线在三种不同泵浦功率密度 ($4.7, 2.5, 1.3 \times 10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$) 下的线强度随线状硅等离子体长度的变化关系, 图中实线代表用增益公式^[8] $I = I_0 \{ [\exp(GL) - 1]^{3/2} / [GL \exp(GL)]^{1/2} \}$ 拟合所得的增益曲线, 相应的增益系数分别为 1.0, 1.9 和 $1.4\ \text{cm}^{-1}$ 。从图 2 中可见, 在 $2.5 \times 10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 泵浦功率密度下所获得的增益系数最大, 表明这一泵浦功率密度对于类锂离子 X 射线激光实验来说是较为合适的。从图 2 还可看出, 过高和过低的泵浦功率密度都不利于 $5f-3d$ 能级间的粒子数反转, 导致增益系数的减小。作者认为过高的泵浦功率密度可能由于硅等离子体增益介质过电离而减小了类锂离子丰度, 而且, 过高的初始温度也不利于等离子体的快速冷却; 而过低的泵浦功率密度使得只有少量硅原子能被剥离到类锂离子, 使总的复合效率降低, 不利于激光上下能级间的粒子数反转, 使增益系数降低。

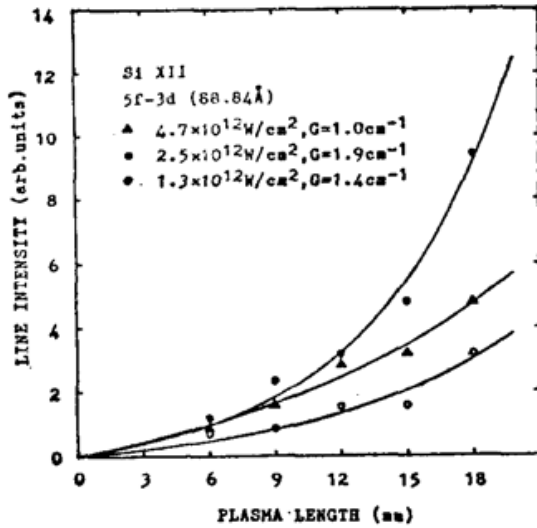


Fig. 2 Intensities of SiXII 5f—3d 8.89 nm line as a function of plasma length for three different pumping laser irradiances on target surface

激光波长 $\lambda_L = 1.053 \mu\text{m}$, f 一般取 $0.03^{[10]}$, 对于本实验条件 ($1.053 \mu\text{m}$, 900 ps , $\sim 2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$), 吸收系数 α 约为 $70\%^{[11]}$ 。计算所得的这一合适泵浦功率密度与本实验找到的合适泵浦功率密度 $2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 非常接近, 表明在 $2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 泵浦功率密度下, 产生的硅等离子体增益介质具有高丰度的类氦离子, 具备了产生较大增益系数的条件。

实验中, 本文还利用针孔透射光栅光谱仪测量了不同泵浦功率密度下的线状硅等离子体参数, 结果表明在相同焦线条件下, 不同泵浦功率密度对 X 射线激光增益有明显的影响。图 3 是用针孔透射光栅光谱仪在 $2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 、等离子柱长为 18 mm 条件下拍摄的轴向时间积分光谱的扫描曲线。图中主要的发射峰是由 $\text{Si}^{12+} \rightarrow \text{Si}^{11+}$ 的复合谱 (2.4 nm) 和 Si^{11+} 的 L 带 ($3\text{d}-2\text{p}$) 发射谱 (4.4 nm)。 2.4 nm 强的复合谱表明了等离子体具有较高的类氦离子丰度, 而 4.4 nm 较强的发射谱 ($3\text{d}-2\text{p}$) 表明了激光下能级 3d 能级迅速排空而有利于粒子数反转。表 1 给出了针孔透射光栅光谱仪在三种不同泵浦功率密度下测量的硅等离子体参数。由表 1 可见, 1.3 和 $2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 两种泵浦功率密度下产生的线状硅等离子体的空间分布比较接近, 但后一泵浦条件下, 用 2.4 nm 和 4.4 nm 峰值强度估算^[12] 的类氦离子和类锂离子 3d 能级的粒子数丰度比 R 值较大, 所以相应的增益系

在类锂离子复合方案中, 产生自发发射放大的必要条件是要求等离子体增益介质是一具有高丰度的类氦离子源。对于线状硅等离子体增益介质, 原子序数 $Z=14$, 所以所需剥离的电子数 $z_0=12$; 采用剥离电子数与等离子体电子温度的关系公式^[9]

$$z_0 \approx (2/3) [ZT_e (\text{eV})]^{1/3},$$

可以计算得到, 在激光脉冲加热产生的硅等离子体电子温度 T_e 达到 417 eV 时, 硅等离子体中才能产生大量类锂离子复合方案所需的类氦离子。然后根据等离子体电子温度和泵浦功率密度的关系公式^[10]

$$\frac{T_e}{1 \text{ keV}} \approx 0.6 \left[\frac{1}{f} \left(\frac{\alpha I}{10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}} \right) \left(\frac{\lambda_L}{1 \mu\text{m}} \right)^2 \right]^{2/3},$$

计算得到类锂离子复合 X 射线激光实验所需的泵浦功率密度 $I \approx 2.3 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$, 其中泵浦

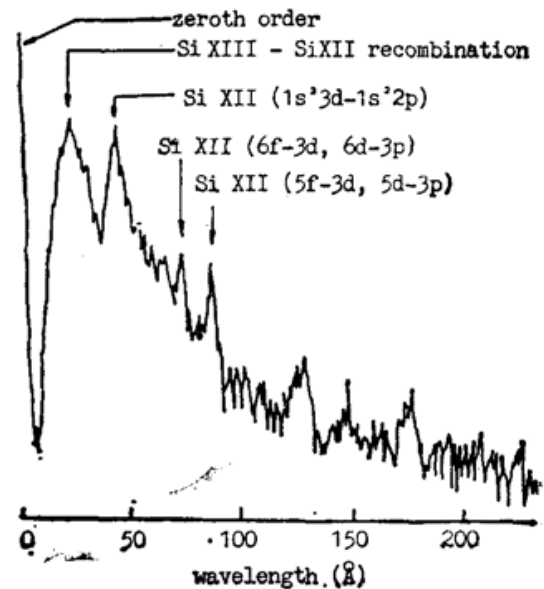


Fig. 3 Microdensitometer trace of the time-integrated axial spectrum measured with the PTGS for an 18 mm-long Si plasma in the case of the irradiance of $2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$

数较大。而对于 $4.7 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 泵浦条件下, 虽然 R 值较大, 但是硅等离子体具有很大的横向宽度, 不利于激光下能级 $3d$ 的横向排空和等离子体的快速膨胀冷却, 所以获得的增益系数较小。另外, 不同泵浦功率密度下, 不同的等离子体流体动力学过程也会影响粒子数反转, 即增益的大小。

综上所述, 对于类锂硅离子 ($7.46 \sim 8.89 \text{ nm}$) X 射线激光, 合适的泵浦功率密度仅为 $2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$, 如此低的泵浦功率密度显示了用类锂离子复合方案在现有激光驱动

Table 1 The silicon plasma parameters measured with the PTGS for three different pumping laser irradiances, (a) spatial width (FWHM) of the plasma columns along the normal direction of the target surface, (b) the distance from target surface of the emission peaks of 2.4 nm and 4.4 nm , (c) the population abundant ratio of He-like ion and $3d$ level of Li-like ion at the peak of 4.4 nm , (d) the measured gain coefficients of SiXII $5f-3d$ transition.

focus line (inhomogeneity)		30 mm \times 130 μm ($<5\%$)		
laser power density (10^{12} W/cm^2)		1.3	2.5	4.7
$\Delta X (\mu\text{m})$ (a)	2.4 nm	240	240	310
	4.4 nm	383	330	540
$X_m (\mu\text{m})$ (b)	2.4 nm	113	113	150
	4.4 nm	135	142	190
$R(X_m)$ (c)		29	36	57
gain (d)		1.4	1.9	1.0

Table 2 The calculated wavelengths of interest in X-ray laser study of Li-like ions from sodium to calcium₉

ion	transition (0.1nm)	5f-3d	6f-3d	5d-3p	6d-3p
	Na ⁸⁺		158.014	134.859	154.582
Mg ⁹⁺		127.993	109.237	125.413	107.339
Al ¹⁰⁺		105.779	90.278	103.784	88.810
Si ¹¹⁺		88.883	75.857	87.303	74.695
P ¹²⁺		75.732	64.633	74.455	63.694
S ¹³⁺		65.297	55.727	64.246	54.954
Cl ¹⁴⁺		56.878	48.542	56.000	47.895
Ar ¹⁵⁺		49.987	42.661	49.243	42.112
K ¹⁶⁺		44.276	37.787	43.637	37.316
Ca ¹⁷⁺		39.490	33.703	38.935	33.293

器上获得“水窗”波段放大器的巨大潜力。表 2 给出了用 Cowan 程序^[13]计算得到的有可能产生激光作用的类锂离子 (Na^{8+} — Ca^{17+}) 跃迁的波长数据, 其中划线的为已获得增益的跃迁。计算结果表明: 类锂离子复合方案是以 $\lambda \propto z^{-2.5}$ 定标至短波长的, 比类氦、类镍碰撞激发方案和类氢复合方案要快得多, 并且所要求的泵浦功率也小得多。由表 2 可看出, 类锂离子 K^{10+} 的 $6f-3d$, $5d-3p$ 和 $6d-3p$ 跃迁及类锂离子 Ca^{17+} 的 $5f-3d$, $5d-3p$, $6f-3d$ 和 $6d-3p$ 跃迁都已进入“水窗”波段 ($4.376 \text{ nm} \sim 2.332 \text{ nm}$)。对于类锂离子 K^{10+} 和 Ca^{17+} X 射线激光实验, 用上述方法^[9, 10]计算所需的泵浦功率密度分别为 $8 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 和 $9.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$, 其中吸收系数 (对于 $1.053 \mu\text{m}$, 900 ps , $\sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$) α 约为 60%^[11]。这对于 LF12 激光装置 1 ns , 800 J 的指标来说, 可以形成约 5 cm 长的线状等离子体柱, 所以用类锂离子复合方案在 LF12* 激光装置上获得“水窗”波段的放大器具有很大的可能性。

四、结 论

通过研究不同泵浦功率密度下的类锂离子 X 射线激光, 表明 $2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 为一合适的泵浦功率密度, 这一结果与计算所得的合适泵浦功率密度非常接近。计算还表明: 在现有激光装置上用类锂离子复合方案实现“水窗”波段放大器具有较大的可能性。

本文作者感谢上海光机所高功率激光联合实验室 LF12* 激光装置运行组的大力支持和帮助, 感谢江志明博士、沈百飞、陈荣清博士的帮助以及所提的宝贵意见。

参 考 文 献

- [1] D. L. Matthews *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**, No. 2 (Jan), 110~113.
- [2] M. D. Rosen *et al.*; *Phys. Fluids*, 1988, **31**, No. 3 (Mar.), 666~670.
- [3] Z. Z. Xu *et al.*; *Proceedings of International Colloquium on X-ray Lasers*, 17~21 September 1990, York University, York, UK, to be published.
- [4] W. N. Chen *et al.*; *CLEO'90 Paper*: CWF42.
- [5] 张正泉等;《光学学报》; 1988, **8**, No. 8 (Aug.), 762~763.
- [6] A. Pachtman *et al.*; *Association for Plasma Studies of China Report No. APS-88-006* (1988), paper D-1.
- [7] T. Kishimoto; *Report of Max-Planck-Institut für Quantenoptik*, Garching, 1985, No. 108, 70~71.
- [8] G. J. Linford *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 7 (Apr), 397~403.
- [9] D. Colombant G. F. Tonon; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, No. 8 (Aug), 3524~3537.
- [10] C. E. Max; *LLNL report*, 1981, UORL-53107.
- [11] C. Carban-Labaune *et al.*; *Rapport d' Activite 1979, Greco Interaction Laser-Matiere* (Ecole Polytechnique, Palaiseau, France), pp. 64~75.
- [12] 王晓方等;《光学学报》, 1990, **11**, No. 1 (Jan), 1~6.
- [13] R. D. Cowan; *in the Theory of Atomic Structure and Spectra*, University of California, Berkeley, 1981.

Effect of pumping laser irradiances on X-ray lasers in recombining Li-like plasmas

LU PEIXIANG, XU ZHIZHAN, ZHANG ZHENGQUAN, FAN PINZHONG,

WANG XIAOFANG AND SUN LAN

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

(Received 11 January 1991; revised 8 April 1991)

Abstract

Through analyzing the experimental results of the lithium-like Si^{11+} ion soft X-ray laser obtained at different pumping laser irradiances and the spectral characteristics of the other Li-like ions which maybe have gains, we find that it is much possible to obtain an amplifier in the 'water window' region at the existing driving laser facilities.

Key words: Li-like ion, X-ray laser, pumping laser irradiance.