

类锂硅离子软 X 射线激光的空间特性

陆培祥 范品忠 张正泉 孙 岚 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道类锂硅离子软 X 射线激光的空间分布特性, 研究表明软 X 射线激光的最佳增益在离靶面约 300 μm 的中等等离子体密度区, 而临近靶面的高密度区增益则较小。

关键词: 软 X 射线激光, 类锂硅离子。

一、引 言

自从 1984 年美国利弗莫尔国家实验室首次成功地获得类氩硒离子 $3p \rightarrow 3s$ 跃迁波长为 206 \AA 和 209 \AA 的软 X 射线激光以来^[1], 国际上一些著名的实验室相继利用各种泵浦机制进行了软 X 射线激光研究^[1~8]。其主要的泵浦机制是类氩^[1, 2]、类镍离子^[3]电子碰撞激发泵浦和类氢^[4~6]、类锂离子^[6~8]复合泵浦; 其中类锂离子复合泵浦相对电子碰撞激发泵浦及类氢离子复合泵浦所要求的泵浦功率要低得多, 最有可能在较小规模的驱动装置上获得大的增益长度乘积值和较短波长的 X 射线激光。基于上述考虑, 我们的研究工作一直把重点放在类锂离子复合泵浦机制的研究上; 采用这种泵浦机制, 1988 年底我们就已在上海光机所六路钹玻璃激光装置上获得了类锂铝离子的 $5f-3d$ 、 $4f-3d$ 跃迁波长分别为 105.7 \AA 和 154.7 \AA 的软 X 射线激光^[8]。1989 年 8 月我们又在上海光机所的 LF12 激光装置上^[9], 利用类锂离子复合泵浦首次获得了类锂硅离子的 $5f-3d$ 跃迁 (88.9 \AA) 和 $5d-3p$ 跃迁 (87.3 \AA) 软 X 射线激光, 这一结果徐至展等已在文献 [10] 中作了报道, 本文将根据 1989 年 8 月的实验结果, 第一次进一步分析了类锂硅离子软 X 射线激光的空间分布特性, 并通过比较激光线与非激光线随等离子体长度的变化关系, 进一步验证了这一实验结果。

二、实验条件

本实验是在上海光机所 LF12 激光装置上进行的。驱动激光波长为 1.05 μm , 脉冲宽度约为 0.9 ns, 靶面激光能量为 50 J (平均偏差小于 10%)。输出激光经 LF12 激光装置靶场提供的六单元组合柱面透镜-非球面透镜系统线聚焦到平面硅靶上, 产生作为 X 射线激光增益介质的线状高离化态硅等离子体。扣除焦线两端不均匀部分, 均匀辐照的焦线长度为 18 mm, 其激光辐照强度起伏小于 5%, 焦线宽度为 130 μm , 相应的靶面激光功率密度为 $2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。另外, 线聚焦的角精度为 $\pm 1 \text{ mrad}$, 而谱仪的集光角为 $5 \sim 10 \text{ mrad}$ ^[11]。实验中所用的靶为表面抛光厚度为 1.0 mm 的硅平面靶, 通过改变靶的宽度可以得到本实验

所需要的同一激光辐照条件下产生的不同长度线状等离子体增益介质。

本实验主要诊断仪器为自行研制的一米消像散掠入射光栅光谱仪^[11], 其光谱分辨率和一维空间分辨率分别优于 $50 \text{ m}\text{\AA}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 。实验中调节光谱仪使最佳消像散成像位置在 80 \AA 附近, 以确保在类锂硅离子 $5f-3d$ 、 $5d-3p$ 跃迁波长 88.9 \AA 和 87.3 \AA 处有较佳的空间分辨, 从而可以定量研究上述类锂硅离子软 X 射线激光的空间分布特性。实验中由于采用较灵敏的 Kodak101-01 X 光软片记录, 一发打靶就能得到高质量的光谱照片。

三、实验结果与讨论

利用消像散掠入射光栅光谱仪, 观察了不同长度(9, 12, 15, 18 mm)线状硅等离子体轴向时间积分 XUV 光谱, 发现类锂硅离子 $5f-3d$ 跃迁(88.9 \AA)和 $5d-3p$ 跃迁(87.3 \AA)的谱线强度随线状等离子体长度呈非线性指数增长, 即实现了自发发射放大(ASE)。

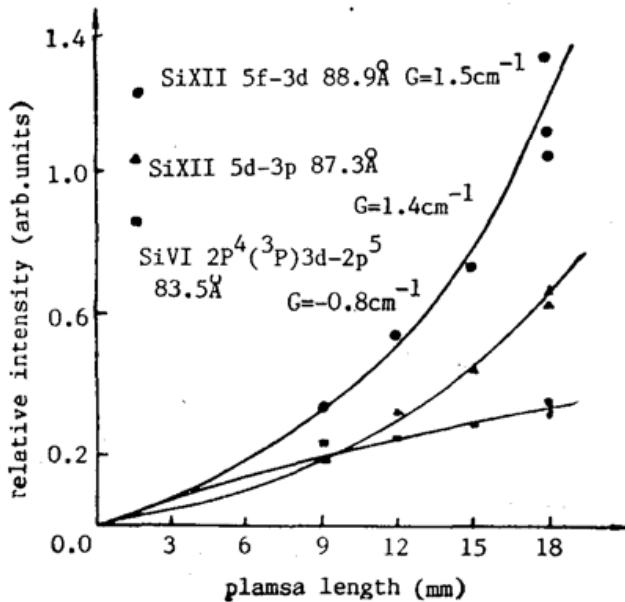


Fig. 1 The relative intensities at $300 \mu\text{m}$ from target surface vs the plasma length for the spectral lines of the Li-like silicon ions at 88.9 \AA ($5f-3d$) and 87.3 \AA ($5d-3p$), and for the spectral line of the F-like silicon ions at 83.5 \AA ($2p^5-2p^4(^3P)3d$)

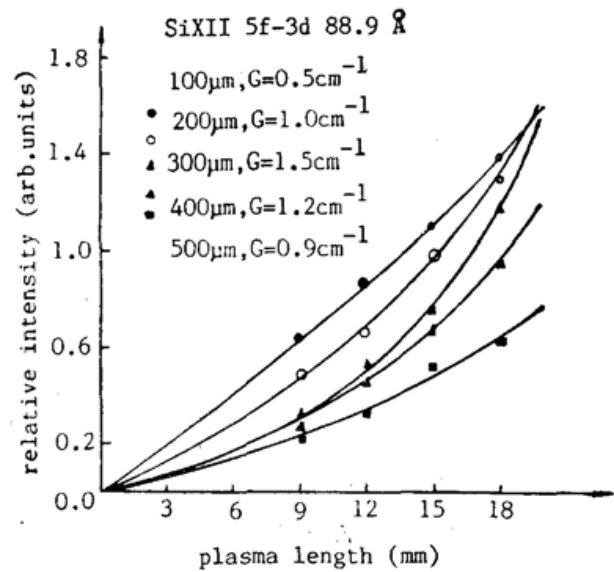


Fig. 2 The gain curves of the lasing line at 88.9 \AA ($5f-3d$) for different distances from target surface

谱线的相对强度是根据 Kodak 101-01X 光软片的定标曲线^[12], 把谱线黑度换算成曝光量而得到的。图 1 给出了类锂硅离子 $5f-3d$ 跃迁(88.9 \AA)、 $5d-3p$ (87.3 \AA) 跃迁谱线和类氟硅离子 $2p^4(^3P)3d-2p^5$ (83.5 \AA) 跃迁谱线在离靶面 $300 \mu\text{m}$ 处的相对强度随线状等离子体增长的变化曲线。图中实线代表用增益公式^[13] $I = I_0 \frac{(e^{GL} - 1)^{3/2}}{(GLE^{GL})^{1/2}}$ 拟合所得的增益曲线, 相应的增益系数 G 分别为 $1.5 \pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$ 、 $1.4 \pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$ 和 $-0.8 \pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$ 。从图 1 中发现, 对应于类锂硅离子 $5f-3d$ 跃迁(88.9 \AA)和 $5d-3p$ 跃迁(87.3 \AA)的两条激光线的相对强度随线状硅等离子体长度的增长而呈指数非线性增强, 而非激光类氟硅离子 $2p^4(^3P)3d-2p^5$

跃迁(83.5Å)是自吸收的。

利用消像散掠入射光栅光谱仪的一维空间分辨特性,还得到了上述两激光线沿靶面法线方向上的空间分布。图2给出了类锂硅离子的5f-3d跃迁(88.9Å)激光谱线在距离靶面不同位置处的增益曲线。为清晰起见,图中18mm处实验强度点是三次重复实验强度的平均值。由图2可以看出,增益区域主要出现在离靶面300μm附近的中等等离子体密度区,而在临近靶面的更高密度区增益较小。我们认为这主要是由于近靶面等离子体尚未经充分绝热膨胀而冷却,故复合效率低;另外,近靶面处高的等离子体密度也使3d(3p)能级上的辐射俘获较强,从而不利于5f-3d和5d-3p能级间的粒子数反转。

采用剥离电子数与等离子体电子温度公式^[14]

$$z \cong \frac{2}{3} [AT_e(\text{eV})]^{1/3}$$

估算得到的激光脉冲加热产生的等离子体电子温度 $T_e \cong 400 \text{ eV}$;对于Si原子序数 $A = 14$,剥离电子数 z 约为12,这显然是我们所需要的。因为在类锂复合泵浦机制中,出现自发发射放大的条件要求具有足够丰度的类氦离子;然后再经过绝热膨胀冷却,通过三体复合而产生X射线激光的工作离子——类锂离子。这里需要说明的是,实际上等离子体在达到最佳复合状态时,由于经绝热膨胀冷却,此时的电子温度已降低至约几十电子伏特的量级。

本文的研究工作是在上海光机所高功率激光物理实验室的LF12激光装置运行组的密切配合下完成的,尤其是LF12靶场组为我们提供了高质量的激光线聚焦系统,西德马普学会生物物理化学所所长Schäfer教授为我们提供了Kodak 101-01 X光软片,另外本工作得到了王之江所长的支持与指导。作者在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] D. L. Matthews *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**, No. 2 (Jan), 110~113.
- [2] T. N. Lee *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**, No. 11 (Sep), 1185~1188.
- [3] B. J. MacGowan *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**, No. 19 (Nov), 2157~2160.
- [4] C. Chenais-Popovics *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**, No. 19 (Nov), 2161~2164.
- [5] S. Suckewer *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**, No. 17 (Oct), 1753~1756.
- [6] G. P. Kiehn *et al.*; *Proc. SPIE.*, 1987, **831**, 270~275.
- [7] P. Jaeglé *et al.*; *J. O. S. A.*, 1987, **B4**, No. 4 (Apr), 563~570.
- [8] 徐至展等;《中国激光》,1989, **16**, No. 7 (Jul), 385~388.
- [9] 邓锡铭等;私人通信。
- [10] 徐至展等;《中国科学A辑》,1990, No. 1 (Jan), 17~27.
- [11] 张正泉等;《光学学报》,1988, **8**, No. 8 (Aug), 762~763.
- [12] T. Kishimoto; 《Report of Max-Planck-Institut für Quantenoptik》, (Garching, 1985), No. 108, 70~71.
- [13] G. J. Linford *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 7 (Apr), 397~403.
- [14] D. Colombant, G. F. Tonon; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, No. 8 (Aug), 3524~3537.

Spatial characteristics of Li-like soft X-ray lasers in a laser-produced silicon plasma

LU PEIXIANG, FAN PINZHONG, ZHANG ZHENQUAN,
SUN LAN AND XU ZHIZHAN

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

(Received 2 May 1990)

Abstract

A study on the spatial characteristics of Li-like soft X-ray laser in a laser-produced silicon plasma is reported. It shows that the main region of the soft X-ray laser gain is in the region with intermediate plasma density, which is about 300 μm from the target surface, while the gain coefficient near target surface with high plasma density is small.

Key words: soft X-ray laser; Lithiumlike silicon ions.

更 正

今年第三期第 286~288 题为“保偏光纤双折射主轴的旋转对消光比的影响”，一文有五点更正：

1) p. 286 引言中第一行“在控制保偏光纤时，”
应为“在拉制保偏光纤时”

2) p. 287 第(7)式 $ER = 10 \log \left(\frac{P'_y}{P'_x} \right) = \dots$
应为 $ER = 10 \log \left(\frac{P'_y}{P'_x} \right) = \dots$

3) p. 288 Fig. 2 中横坐标“r1(deg)”
应为“rl(deg)”

4) p. 288 Fig. 2 的文字的最后一行“rotation rate of birefringent axes 1/mm”
应为“rotatron rate of birefringent axes 1°/mm”

5) p. 288 Fig. 3 中横坐标“log α (dey mm)”
应为“log α (deg/mm)”

特向作者，读者致歉！

光学学报编辑部