

## 类锂离子软 X 射线激光实验研究\*

徐至展 张正泉 范品忠 陈时胜 林礼煌  
陆培祥 王晓方 钱爱娣 张燕珍 王黎君  
孙 岚 冯贤平 周锦智  
(中国科学院上海光机所)

### Experimental investigation on Li-like ion soft X-ray laser

*Xu Zhizhan, Zhang Zhenquan, Fan Pingzhong, Chen Shisheng,  
Lin Lihuang, Lu Peixiang, Wang Xiaofang,  
Qian Aidi, Zhang Yanzhen, Wang Lijun,  
Sun Lan, Feng Xianping, Zhou Jinzhi*

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

**提要:** 在上海光机所 6 路激光装置上成功地进行了软 X 射线激光增益实验, 利用自制的一维空间分辨掠入射光栅光谱仪研究了 1 mm 厚平板靶激光等离子体中铝和硅的类锂离子的自发发射放大(ASE)性能。实验表明,  $Al^{10+}$  离子的  $5f-3d$  跃迁(波长 10.57 nm)的时间积分发射强度随线状等离子体的长度非线性增长, 相应的增益系数为  $2.3 \pm 0.7 \text{ cm}^{-1}$ , 最大增益长度乘积约为 2; 空间分辨光谱显示增益最大的区域离靶面约 440  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** X 射线激光, 增益, 类锂离子

自从 1985 年以来, 已有几个实验室报道成功地演示了激光等离子体中软 X 射线波段的自发发射放大(ASE)<sup>[1~7]</sup>, 有利用类氦<sup>[1, 6]</sup>和类镍离子<sup>[7]</sup>电子碰撞激发泵浦的, 也有利用类氢<sup>[4, 5]</sup>和类锂离子<sup>[3]</sup>复合泵浦的。实验的结果丰富, 大量的理论模拟计算也增进了对实验结果的理解, 但是迄今实验的最佳条件还没有为人们所掌握。在类锂离子复合泵浦机制方面, Jaog13 等人<sup>[8]</sup>作了不少实验工作与理论分析。为了得到同样波长的激光作用, 类锂离子所要求的靶材原子序数  $Z$ 、电离能、比吸收能量都要比类氢离子低得多, 比电子

碰撞激发泵浦的要求则更低得多。也就是说, 采用类锂离子复合泵浦机制, 我们有可能在较小规模的驱动激光装置上演示 ASE 激光作用, 而在较大规模的高功率激光实验装置上则有可能得到很大的增益长度乘积值和得到接近“水窗”范围(2.33~4.37 nm)的波长更短的激光。在复合泵浦实验中使用了各种靶, 如细纤维靶、薄箔靶、平板靶、或磁约束激光等离子体, 在电子碰撞激发泵浦实验中也

收稿日期: 1989 年 3 月 11 日。

\* 本课题项目由国家高技术、国家自然科学基金和中国科学院重大项目基金资助。

使用了薄箔靶、平板靶、以及结构更复杂的靶。细的纤维靶虽然绝热膨胀冷却非常迅速，但是激光耦合效率很低，而薄箔靶和平板靶则有更高的耦合效率，可以有效地利用泵浦功率，这对于小型激光驱动装置上的实验尤为重要。而从增进对获得最佳激光输出的流体力学条件的了解来说，各种型式的靶以及各种主要的泵浦方案，都还有深入探讨的必要。

基于以上考虑，我们在上海光机所的6路钽玻璃激光装置上<sup>[8]</sup>，用线聚焦激光辐照铝和硅平板靶，进行软X射线激光增益演示实验，取得了复合泵浦类锂 $Al^{10+}$ 离子的 $5f-3d$ 跃迁(波长 $10.57\text{ nm}$ )和 $Si^{11+}$ 离子的 $5f-3d$ 跃迁(波长 $8.89\text{ nm}$ )、 $5d-3p$ 跃迁(波长 $8.73\text{ nm}$ )软X射线辐射的显著放大的实验证明。

实验中，利用6路激光装置的两束激光合并成为一束激光，波长 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的激光脉冲由双脉冲构成，单个脉冲的宽度为 $250\sim 300\text{ ps}$ ，而两个脉冲的峰值间隔为 $200\text{ ps}$ ，组合激光脉冲的总能量约为 $20\text{ J}$ ，能量值不重复的起伏为 $\pm 25\%$ 。激光经柱面透镜-非球面透镜组合聚焦到平板靶上，产生作为X射线激光增益介质的线状高阶离化态激光等离子体。扣除两端不均匀部分，最长的焦线长度为 $8\text{ mm}$ ，宽度约为 $200\text{ }\mu\text{m}$ ，相应的靶面聚焦激光强度约为 $1.5\times 10^{12}\text{ W/cm}^2$ 。实验中使用厚度为 $1\text{ mm}$ 的条状平板靶，为了产生尽量均匀的辐照强度并避免边缘效应，选择靶的宽度等于或小于上述水平焦线的长度，来产生本文增益实验所要求的各种长度，但靶面激光强度却保持相同的线状等离子体。

实验的主要诊断设备是我们自行研制的一台具有一维空间分辨能力的消像散掠入射XUV光栅光谱仪<sup>[9]</sup>和一台带有针孔成像的透射光栅光谱仪<sup>[10]</sup>。另外，实验中还用了法拉第筒电荷收集器检测等离子体的离子发射时间特性；用TiAP晶体谱仪拍摄空间分辨和空间积分的X射线光谱；用X光针孔像机拍

摄线状等离子体的X光发射像，还布置了测量后向散射的二次谐波的一维空间分辨光谱的光栅光谱仪等。

$1\text{ m}$ 掠入射XUV光栅光谱仪装有 $2400\text{ 槽/mm}$ 、闪耀角为 $2^\circ 0'$ 的涂金光栅，摄谱范围为 $2\sim 12\text{ nm}$ ，采用国产无保护层X光软片或Kodak 101-01软片记录，当入射狭缝宽度为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时，仪器的光谱分辨率为 $0.005\text{ nm}$ 。为了增加仪器的集光效率和得到等离子体X光源的一维空间分辨像，消像散光谱仪中采用了涂金超环面掠反射镜，超环面两个方向的曲率半径分别为 $3315\text{ mm}$ 和 $30.5\text{ mm}$ ，超环面镜与X光源的距离为 $55\text{ cm}$ 。利用超环面镜可将光谱仪的光轴准直到线聚焦的轴线方向上，对准精度为 $0.1\text{ mrad}$ 和 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。线聚焦的角精度约为 $\pm 2\text{ mrad}$ ，而超环面镜的集光角为 $5\sim 10\text{ mrad}$ 。XUV光谱仪的入射狭缝方向与驱动激光束的传播方向，即靶面法线方向平行，可以观察到沿靶面法线方向上的空间分辨谱，近轴的一维空间分辨率为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。与掠入射光栅谱仪相对，在线聚焦等离子体轴线另一端，布置有自制的针孔透射光栅谱仪，针孔孔径为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 或 $50\text{ }\mu\text{m}$ ，摄谱范围为 $1\sim 25\text{ nm}$ 。由于驱动激光脉冲的能量值小，转换的软X射线剂量低，光谱仪的摄谱采取了多发激光积累的方式；多发积累附带的好处是将激光参量的起伏带来的影响平均化了。

利用掠入射光栅光谱仪，我们观察了激光产生的复合等离子体中类锂 $Al^{10+}$ 离子 $5f-3d$ 跃迁(波长 $10.57\text{ nm}$ )的自发发射放大(ASE)特性。实验中我们分别沿线状等离子体的轴向和非轴向观察，沿轴线方向观察时， $10.57\text{ nm}$ 谱线十分明显，而沿非轴向观察时，该谱线消失为光谱背景，正如图1所示；我们进一步观察到，随着线状等离子体长度的增加， $10.57\text{ nm}$ 谱线的强度增加得非常迅速，呈指数关系非线性增长。相应的增益系数 $G$ 由谱线的强度与等离子体长度的依

赖关系确定。根据 X 光软片在低曝光条件下 ( $D \leq 0.5$ ) 曝光量与黑密度值  $D$  呈线性关系<sup>[11~13]</sup>, 考虑扣除背景连续谱强度, 并以类氧类氟离子跃迁光学薄谱线作为参考线, 我们可以得到归一化的相应于各种等离子体长度的 10.57 nm 谱线的时间积分相对强度, 如

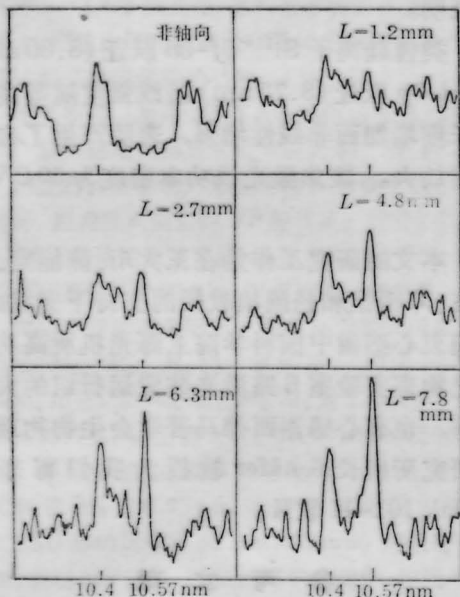


图1 用 1 m 掠入射光栅光谱仪测得的不同长度线状激光等离子体的时间积分 XUV 光谱, 显示类锂铝离子 5f-3d 跃迁 (10.57 nm) 谱线强度随等离子体长度增加而非线性增强, 表明产生了自发发射放大。聚焦激光功率密度为 30 GW/cm<sup>2</sup>

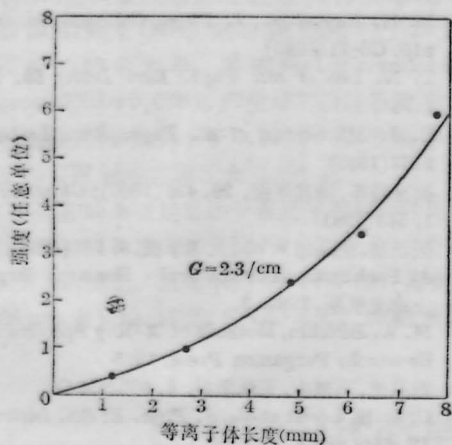


图2 增益特性曲线: 类锂铝离子 5f-3d 跃迁谱线强度随线状等离子体长度的变化

图 2 中所示。将这些数据按公式  $I = S(e^{GL} - 1)$  进行拟合, 其中  $G$  为增益系数,  $L$  为长度,  $I$  为强度,  $S$  为源函数, 得到相应的增益系数为  $2.3 \pm 0.7 \text{ cm}^{-1}$ , 最大的增益长度乘积约为 2。

利用我们自制的一维空间分辨 XUV 光栅光谱仪, 还得到了距离靶面不同位置处等离子体的软 X 射线发射光谱, 如图 3 所示。根据拍摄到的空间分辨光谱, 可以得到 10.57 nm 谱线的增益的空间分布; 由图 4 可见, 最大增益出现在大约距离靶面约 440  $\mu\text{m}$  处, 分析表明这对应于驱动激光脉冲峰值后

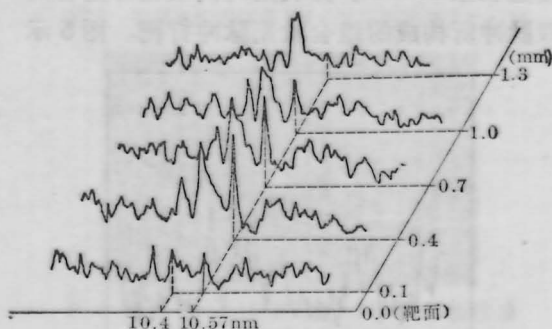


图3 距离靶面不同位置处的铝激光等离子体的 XUV 光谱

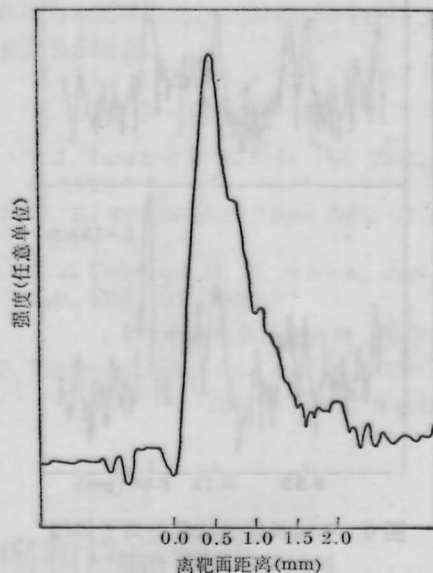


图4 类锂铝离子 5f-3d 跃迁谱线强度的空间分布

约8ns时刻,这时等离子体已经充分地绝热膨胀并迅速冷却而处于最佳的复合泵浦状态。

TIAP晶体X射线谱仪的摄谱结果显示在激光等离子体中类氢离子基本上不存在,而类氦离子丰度却较大,表明我们选择的靶面激光强度是符合类锂离子复合泵浦要求的。

我们利用掠入射XUV光栅光谱仪还观察到了类锂离子 $Si^{11+}$ 离子 $5f-3d$ 跃迁(8.89nm)和 $5d-3p$ 跃迁(8.73nm)的软X光辐射的显著自发发射放大。实验中,采用了新的柱面透镜-非球面透镜组合,将线聚焦的焦线长度延长至18mm,并利用时间上相互重合的双脉冲所构成的组合激光脉冲打靶。图5示

出了拍摄到的三种线状等离子体长度(1、8、15mm)激光产生的硅等离子体的时间积分的XUV谱。类锂离子 $Si^{11+}$ 离子的 $5f-3d$ 跃迁(8.89nm)和 $5d-3p$ 跃迁(8.73nm)的辐射强度随等离子体长度的非线性增长,给出了上述波长软X光辐射的自发发射放大的实验证明。

类锂离子 $Si^{11+} 5f-3d$ 跃迁(8.89nm)和 $5d-3p$ 跃迁(8.73nm)谱线强度随等离子体长度增加而非线性增强,表明产生了自发发射放大。聚焦激光功率密度为50GW/cm。

本文的研究工作是在王大珩、陈能宽、王之江、邓锡铭和杨国楨教授的支持下完成的。我们衷心感谢中国科学院上海光机所高功率激光物理实验室6路激光装置运行组的大力协作,也衷心感谢西德马普学会生物物理化学研究所所长Schäfer教授为我们寄来了Kodak 101-01软片。

### 参 考 文 献

- 1 D. L. Mathews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **54**, 110 (1985)
- 2 S. Suckewer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **55**, 1753 (1985)
- 3 P. Jaeglé *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B4**, 563 (1987)
- 4 H. Milchberg *et al.*, *App. Phys. Lett.*, **47**, 1151 (1985)
- 5 M. H. Key *et al.*, *J. Phys.*, Colloque C6, supp-n10, C6-71(1986)
- 6 T. N. Lee *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **59**, 2157 (1987)
- 7 B. J. MacGowan *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, **59**, 2157(1987)
- 8 徐至展等,物理学报, **29**, 439(1980); *Chinese Phys.*, **1**, 548(1981)
- 9 张正泉,范品忠 *et al.*, *光学学报*, **8**, 762(1988)
- 10 A. Pachtman, Postdoctoral Research Report, 上海光机所, 1989. 3.
- 11 M. A. Blokhin, *Methods of X-Ray Spectroscopic Research*, Pergamon Press, 1965
- 12 范品忠,毛楚生, *光学学报*, **4**, 956(1984)
- 13 C. L. S. Lewis *et al.*, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **17**, 744(1984)

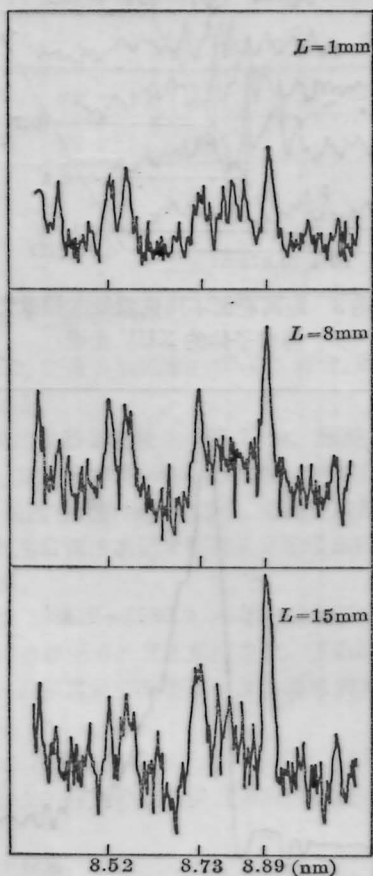


图5 不同长度线状硅等离子体的时间积分XUV光谱