

# 复合 X 射线激光空间特性的研究\*

陆培祥 徐至展 范品忠 张正泉

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

## 提 要

本文研究了类锂硅离子和类钠铜离子两种复合 X 射线激光的增益空间分布, 结果表明复合 X 射线激光的增益出现在离靶面一定距离的中等等离子体电子密度区, 而近靶面高密度区存在自吸收现象。

关键词: 复合 X 射线激光, 自吸收, 电子密度。

## 一、引 言

复合 X 射线激光空间特性的研究对进一步研究复合泵浦机制及改善复合 X 射线激光的性能是非常重要的。早在 1976 年, Kononov 等<sup>[1]</sup>在研究类锂铝离子发射特性时已发现只有在距离靶面一定距离的空间区域才有类锂铝离子高能级与低能级之间的粒子数反转。文献[2]用流体编码和 C-R 模型模拟类锂铝离子复合 X 射线激光的研究结果也表明增益只有出现在远离靶面一定距离的空间区域而近靶面是自吸收的。最近, Hara 等在文献[3]中也曾指出类锂铝离子复合 X 射线激光在近靶面存在较强的自吸收, 但没有进一步详细的实验报道。鉴于以往的 X 射线激光实验研究都局限于空间积分, 而忽视其空间分布特性的研究, 本文利用消像散掠入射光栅光谱仪的一维空间分辨特性, 详细研究了复合 X 射线激光的空间特性。

## 二、实验概述

本实验是在中国科学院上海光学精密机械研究所 LF12 激光装置上进行的。驱动激光波长为  $1.053 \mu\text{m}$ , 脉冲宽度约为  $0.9 \text{ ns}$ , 靶面激光能量为  $60 \text{ J}$  (平均偏差小于  $10\%$ )。输出激光经六单元组合柱面透镜-非球面透镜系统<sup>[4]</sup>线聚焦到平面硅和铜靶面上, 产生作为 X 射线激光增益介质的线状高度离化态硅和铜等离子体。扣除焦线两端不均匀部分, 均匀辐照的焦线长度为  $20 \text{ mm}$ , 其激光辐照强度起伏小于  $5\%$ , 焦线宽度为  $130 \mu\text{m}$ , 相应的靶面激光功率密度为  $2.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。另外, 线聚焦的角精度为  $\pm 1 \text{ mrad}$ , 而谱仪的集光角为  $5 \sim 10 \text{ mrad}$ <sup>[5]</sup>。实验所用的靶为表面抛光厚度分别为  $1.0 \text{ mm}$  和  $2.0 \text{ mm}$  的硅和铜平面靶, 通过改变靶的宽度可以得到本实验所需要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<sup>[5]</sup>, 其光谱和一维空

间分辨率分别优于  $0.005 \text{ nm}$  和  $50 \mu\text{m}$ 。实验中通过调节光谱仪使最佳消像散成像位置在所研究的波长上, 以确保在所研究的激光线处有较佳的空间分辨, 从而可以定量研究上述复合 X 射线激光的空间分布特性。实验中由于采用较灵敏的 Kodak 101-01 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

本文利用消像散掠入射光栅光谱仪观察了不同长度的线状硅等离子体(6, 9, 12, 15 和 18 mm)和线状铜等离子体(9 和 18 mm)的轴向时间积分的空间分辨软 X 射线光谱, 成功地获得了类锂硅离子  $5f-3d$  ( $8.884 \text{ nm}$ )、 $5d-3p$  ( $8.728 \text{ nm}$ )、 $6f-3d$  ( $7.583 \text{ nm}$ ) 和  $6d-3p$  ( $7.464 \text{ nm}$ ) 和类钠铜离子  $6g-4f$  ( $7.222 \text{ nm}$ ) 五个跃迁的自发发射放大<sup>[6,7]</sup>, 即 X 射线激光。

借助于消像散掠入射光栅光谱仪的一维空间分辨特性, 本文分析了上述激光线的空间分布特性。根据所用的 Kodak 101-01 软片的定标曲线<sup>[8]</sup>, 得到了由不同长度的增益介质所产生的上述激光线强度的空间分布, 然后利用增益公式<sup>[9]</sup>

$$I = I_0 [\exp(GL) - 1]^{3/2} / [GL \exp(GL)]^{1/2}$$

拟合激光线强度和增益介质长度得到了上述复合 X 射线激光的增益空间分布。为了比较起见, 图 1 中曲线分别给出了类钠铜离子  $6g-4f$  跃迁和与它相应的类锂硅离子  $5f-3d$  跃迁复合 X 射线激光的增益空间分布。图中实心圆点代表拟合所得的增益系数值, 总的增益系数拟合误差分别约为 30% 和 20%, 前者由于采用两种增益介质长度而略大。

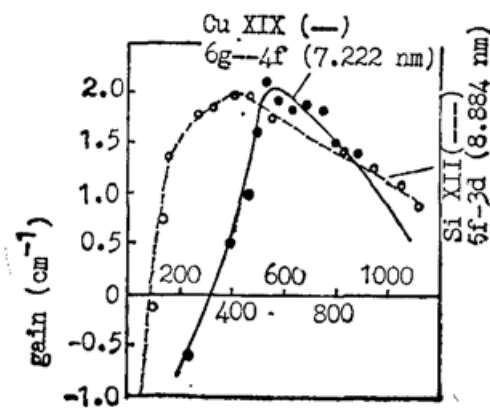


Fig.1 The gain spatial distribution of Na-like CuXIX ion  $6g-4f$  ( $72.22 \text{ \AA}$ ) and Li-like SiXII ion  $5f-3d$  ( $88.84 \text{ \AA}$ ) transition recombination X-ray laser

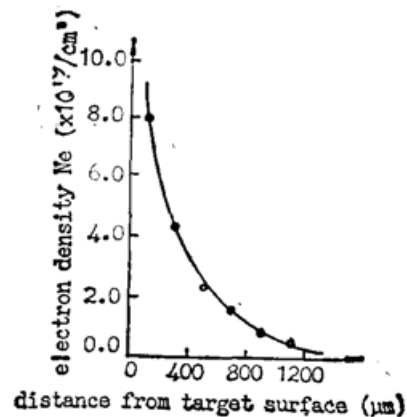


Fig.2 The electron density spatial distribution of Li-like SiXII ion recombination X-ray lasing gain medium

比较图 1 两条曲线可以看到, 类钠铜离子和类锂硅离子 X 射线激光的增益空间分布轮廓基本相同, 反映了复合 X 射线激光所特有的空间分布特性, 即: 近靶面呈现负增益(自吸收)现象, 随着远离靶面距离的增大, 吸收渐渐转变为放大而出现增益, 并在远离靶面一定距离的空间位置上达到最佳增益值, 然后增益逐渐减小。复合 X 射线激光增益空间分布所表现的这种近靶面的自吸收现象, 作者认为主要是由于近靶面较高的等离子体电子密度所致; 另外, 近靶面等离子体尚未经充分绝热膨胀而冷却, 复合效率低也是导致这一现象的原因之

一。在研究复合 X 射线激光谱线宽度时发现类锂硅离子 X 射线激光具有较大的谱线宽度(峰值增益处为  $0.021 \text{ nm}$ )<sup>[10]</sup>, 研究表明其主要的谱线展宽机制是斯塔克展宽。图 2 给出了用线性斯塔克理论得到的类锂硅离子复合 X 射线激光增益介质电子密度的空间分布。从图 2 可看出, 对应图 1 中虚曲线的自吸收区( $<100 \mu\text{m}$ )的电子密度大于  $10^{20}/\text{cm}^3$ , 如此高的电子密度将大大增强在激光上能级上的碰撞去激发和下能级上的辐射俘获。从而不能产生激光上下能级间的粒子数反转而呈现负增益(自吸收)。从图 2 还可得到对应图 1 中虚曲线增益区的电子密度在  $\sim 10^{19}/\text{cm}^3$  左右, 而最佳增益处的电子密度为  $2.9 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ , 这相对低的电子密度使激光上能级碰撞去激发和下能级辐射俘获大大减弱, 加上此时等离子体已充分膨胀冷却, 复合速率增大, 从而形成激光上下能级间的粒子数反转, 出现增益区。另外, 由于增益成正比于电子密度的平方, 所以随着离靶面距离的进一步增大, 过低的电子密度使增益系数逐渐减小而消失。在复合等离子体中, 随着电子密度的增高, 当碰撞去激发速率增大到与辐射衰减速率相当时, 激光上下能级间的粒子数反转消失而出现自吸收, 本文定义这时的电子密度为出现自吸收的阈值电子密度。比较图 1 中的虚曲线和图 2, 可以得到类锂硅离子复合 X 射线激光出现自吸收的阈值电子密度约为  $8 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 。复合 X 射线激光这种特殊的空间特性使复合 X 射线激光的总效率降低, 并使其有效孔径减小; 不利于获得高效率、高相干的大孔径复合 X 射线激光。同时这种空间特性也表明要提高复合 X 射线激光的效率, 增大其有效孔径及改善其激光性能必须设计一种新型的靶结构和打靶方式, 产生能迅速冷却并具有中等等离子体电子密度的线状等离子体来作为复合 X 射线激光的增益介质。

除了复合 X 射线激光所共有的上述空间特性外, 比较图 1 两条曲线可明显地看到两类复合 X 射线激光的增益空间分布所存在的差别, 即类钠铜离子 X 射线激光的增益区的空间尺度要较类锂硅离子 X 射线激光要小, 分别约  $700 \mu\text{m}$  和  $1000 \mu\text{m}$ ; 而前者的近靶面自吸收区比后者要宽, 分别约  $300 \mu\text{m}$  和  $100 \mu\text{m}$ ; 前者的增益峰值位置也较远离靶面一些, 分别约  $550 \mu\text{m}$  和  $450 \mu\text{m}$ 。上述这些差别, 作者认为主要是由于两类复合 X 射线激光出现自吸收的阈值电子密度不同造成的。由于类钠铜离子 X 射线激光的碰撞去激发和辐射俘获要比类锂硅离子 X 射线激光来得严重, 因此其出现自吸收的阈值电子密度要低一些。所以类钠铜离子复合 X 射线激光在略高的电子密度下就出现负增益, 这样其自吸收区变大, 相应地它的增益空间范围缩小, 最佳增益也就出现在离靶面略远密度略低的空间位置上。然而从图 1 中两条曲线可看到类钠铜离子 X 射线激光的峰值增益与类锂硅离子 X 射线激光基本相同, 作者认为这主要是由于类钠铜离子 X 射线激光具有较窄的谱线宽度和较大的振子强度所致的。

#### 四、结 语

总之, 复合 X 射线激光近靶面所呈现的自吸收现象的主要原因是由于近靶面较高的电子密度使激光上能级碰撞去激发和下能级辐射俘获增强。另外, 类钠铜离子 X 射线激光出现自吸收的阈值电子密度要比类锂硅离子 X 射线激光要小, 致使类钠铜离子复合 X 射线激光的自吸收区变宽, 增益区的空间范围缩小。

致谢: 衷心感谢 LF12 激光装置运行组的精诚合作!

### 参 考 文 献

- [1] E. Ya. Kononov *et al.*; *Sov. J. Quantum Electron*, 1976, **6**, No. 2 (Feb), 308~314.
- [2] P. Jaeglé *et al.*; *J. Opt. Soc. Am.*, 1987, **B4**, No. 4 (Apr), 563~570.
- [3] T. Hara *et al.*; *Japanese J. Appl. Phys.*, 1989, **28**, No. 6 (June), L1010~1012.
- [4] W. N. Chen *et al.*; *CLEO/IQEC'90*, 1990, Paper: OWF42.
- [5] 张正泉等;《光学学报》, 1988, **8**, No. 8 (Aug), 762~763。
- [6] 徐至展等;《中国科学 A 辑》, 1991, No. 4 (Apr), 414~423。
- [7] 陆培祥等;《科学通报》, 1991, No. 22 (Nov), 1704~1706。
- [8] T. Kishimoto; *Report of Max-Planck-Institut für Quantenoptik*, (Garching, 1985), No. 108, 70~71.
- [9] G. J. Linford *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 7 (Apr), 397~403.
- [10] Pei-Xiang Lu *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, to be published.

## Spatial characteristics of recombination X-ray laser

LU PEIXIANG, XU ZHIZHAN, FAN PINZHONG AND ZHANG ZHENGQUAN

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

(Received 29 May 1991)

### Abstract

The gain spatial distributions of Li-like SiXII ion and Na-like CuXIX ion recombination X-ray laser are investigated in this paper. It shows that recombination X-ray lasing gain appears at designated distance from target surface, i. e. in the region with intermediate plasma electron density, while there exists self-absorption near target surface with higher plasma electron density.

**Key words:** recombination X-ray laser, self-absorption, electron density.