

类锂硅离子 X 射线激光谱线宽度和 电子密度的空间分布

陆培祥 张正泉 徐至展 范品忠 沈百飞 陈时胜

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

1991 年 4 月 3 日收到

通过分析类锂硅离子 X 射线激光谱线宽度的空间分布特性, 表明斯塔克展宽是主要的展宽机制; 由此得到增益介质电子密度的空间分布显示增益区电子密度约在 $10^{19}/\text{cm}^3$ 左右, 对应最大增益处的线宽为 $0.21 \text{ \AA}$, 电子密度为 $2.9 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 。

PACC: 5250J; 3220R; 4255V

一、引 言

X 射线激光谱线宽度及激光增益介质的电子温度和密度是实验室 X 射线激光研究中极为重要的参量。X 射线激光谱线宽度与增益系数直接相关, 因此在理论计算增益系数时, 往往由于线宽取值不当而使理论值与实验值相差较大, 特别是在复合 X 射线激光中, 实验发现主要的线展宽为斯塔克展宽^[1], 这要比多普勒和自然展宽要大十几倍之多。而激光增益介质电子密度是研究 X 射线激光增益介质原子过程及动力学过程的重要参量。因此, 实验室 X 射线激光谱线宽度及增益介质电子密度的测量对进一步深入研究 X 射线激光抽运机制及改善其激光性能是非常必要的。

在本所 LF12 激光装置上获得类锂硅离子 X 射线激光输出的基础上^[2], 本文进一步分析了类锂硅离子 X 射线激光谱线宽度的空间分布特性, 并用线性斯塔克理论, 得到了激光增益介质电子密度的空间分布。

二、实 验 条 件

本实验是在所 LF12 激光装置上进行的类锂硅离子 X 射线激光实验^[2]的一部分, 采用完全相同的实验条件, 即实验采用的南路激光波长为 $1.053 \mu\text{m}$, 脉冲宽度 (FWHM) 约为 900 ps , 输出激光经六单元组合柱面透镜-非球面透镜组合^[3] 线聚焦在 1 mm 厚表面抛光的平面硅靶上, 产生一长度为 18 mm , 宽度为 $130 \mu\text{m}$ 高度离化的均匀线状硅等离子体增益介质来研究类锂硅离子 X 射线激光谱线展宽及增益介质电子密度。实验采用的靶面激光能量为 60 J , 相应靶面的激光功率密度为 $2.5 \times 10^{12} \text{ W}/\text{cm}^2$ 。

本实验主要诊断仪器是具有一维空间分辨的消像散掠入射光栅光谱仪^[4]。为了使激光谱线的仪器加宽足够小,实验采用了较小的谱仪狭缝宽度 ($5\mu\text{m}$), 此时对应的光谱和空间分辨率将分别优于 $50\text{m}\text{\AA}$ 和 $50\mu\text{m}$ 。实验还采用灵敏的 kodak 101-01 软片^[5]记录, 确保一发打靶就能得到一高质量的光谱照片。

三、实验结果

图 1 为类锂硅离子 $5f-3d$ ($88.84\text{\AA}$) 跃迁激光谱线在距离靶面不同空间位置上的线轮廓扫描。由图 1 中可见, 激光线宽随着远离靶面而变窄; 激光谱线的峰值强度并非临近靶面, 而是存在于离靶面几百微米的空间区域。这一现象表明复合 X 射线激光具有较明显的空间变化特性。图 2 为用高斯线型拟合图 1 中类锂硅离子 $5f-3d$ 跃迁激光谱线轮廓所得的激光谱线半高全宽随离靶面距离的变化关系曲线。由图 2 所示, 类锂硅离子 $5f-3d$ 跃迁激光谱线具有较大的线展宽, 在距离靶面 $100\mu\text{m}$ 处的线宽达 $0.42\text{\AA}$ 。

X 射线激光谱线展宽是实验室 X 射线激光

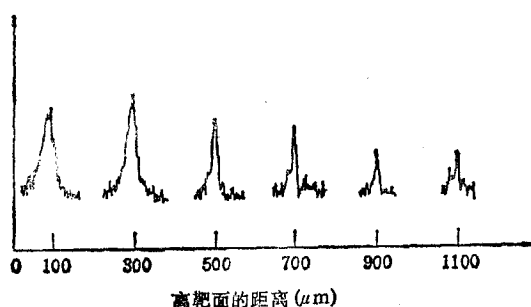


图 1 类锂硅离子 $5f-3d$ ($88.84\text{\AA}$) 跃迁激光谱线在距离靶面不同空间位置上的线轮廓扫描

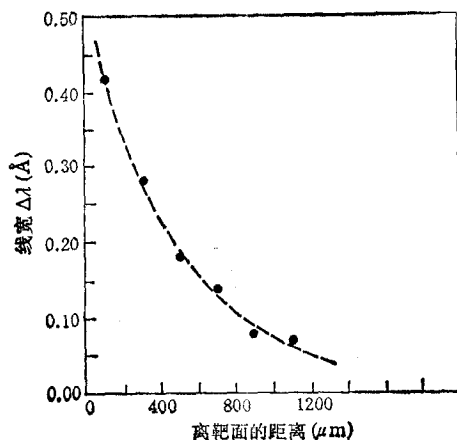


图 2 类锂硅离子 $5f-3d$ ($88.84\text{\AA}$) 跃迁激光谱线宽度随离靶面距离的变化曲线

研究中的一个重要参量^[6], 它与增益系数直接相关, 其表达式为^[6]

$$G = 2(\pi l n^2)^{1/2} \frac{e^2 \lambda^2 f}{m c^2 \Delta \lambda} \left[N_u - \frac{g_u}{g_l} N_l \right].$$

由文献[2]可知, 类锂硅离子 $5f-3d$ 跃迁激光谱线最大增益存在于离靶面 $450\mu\text{m}$ 处, 增益系数为 1.9cm 。由图 2 可得此处的激光半高全宽 $\Delta \lambda_M = 0.21\text{\AA}$, 代入上式得到在距离靶面 $450\mu\text{m}$ 处 $5f-3d$ 能级间最大的反转粒子数 $\Delta N_M = N_u - \frac{g_u}{g_l} N_l = 5.5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。

激光等离子体中的主要展宽是多普勒和斯塔克展宽。多普勒展宽主要决定于离子温度, 而斯塔克展宽主要决定于电子密度, 所以在低温高密度等离子体中, 斯塔克效应起主要作用。在高温低密度等离子体中, 多普勒效应起主要作用。在复合 X 射线激光中, 激光增益区出现在低温度的中等等离子体密度区, 因此激光谱线展宽的主要机制是斯塔克展宽。在本实验中, 假定类锂硅离子的离子温度小于 200eV ^[7], 则类锂离子 $5f-3d$ 激光谱线的多普勒展宽小于 $0.02\text{\AA}$ ^[7]; 谱仪狭缝为 $5\mu\text{m}$ 时的仪器加宽小于 $0.05\text{\AA}$ ^[4]。可见激光谱

线的多普勒展宽和仪器加宽都远小于图 2 中实验测得的线宽, 因此可以认为这两类加宽在本实验中是次要的, 可以忽略. 这一现象同时说明本实验中类锂离子 X 射线激光谱线展宽的主要机制是斯塔克展宽. 由于斯塔克展宽主要取决于增益介质的电子密度, 激光谱线宽在空间上的变化正显示了电子密度的空间分布特性, 所以斯塔克效应是诊断复合 X 射线激光增益介质电子密度的一种有效手段.

采用线性斯塔克理论^[8,9], 激光谱线展宽半高全宽的公式可以表示为

$$\Delta\lambda = 2F_0\alpha_{1/2}(2/Z)^3,$$

式中 Z 为原子序数, 这里的 $\alpha_{1/2}$ 为 Kepple^[8] 计算类氢氦离子 ($Z=2$) 所得的数据. F_0 可以表示为

$$F_0 = 1.25 \times 10^{-9} N_e^2 \bar{z}^{1/3},$$

式中 $\bar{z}$ 为平均的离子电荷数, N_e 为电子密度. 由上述两式可得到电子密度的表达式

$$N_e = \left[\Delta\lambda / 2.5 \times 10^{-9} \alpha_{1/2} \left(\frac{2}{Z} \right)^3 \bar{z}^{1/3} \right]^{3/2}.$$

利用高量子数类锂离子可看成类氢离子这一近似^[11,12], 即把类锂离子看成类氢离子, 所以本文取 $\bar{z} = 11$, $Z = 12$. 对于类锂离子 $5f-3d$ 跃迁, 对应的类氢离子的 $\alpha_{1/2} = 3.2 \times 10^{-2}$ ^[11,12]. 这样, 利用电子密度的表达式由图 2 的数据, 得到了类锂离子 X 射线激光增益介质电子密度的空间分布曲线, 如图 3 所示. 由图 3 可见, 电子密度的空间变化曲线是近指数型变化的. 图 3 中对应于文献[2]中的增益区的电子密度约在 $10^{19}/\text{cm}^3$ 左右, 距离靶面 $450\mu\text{m}$ 对应最大增益处的电子密度为 $2.9 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, 这与一般的理论值和测量值基本相符. 另外, 图 3 中距离靶面 $100\mu\text{m}$ 以内的电子密度较高, 大于 $10^{20}/\text{cm}^3$. 在复合 X 射线激光中, 这样高的电子密度将使激光上能级的碰撞去激发和下能级的辐射俘获增强, 不利于激光上下能级间的粒子数反转, 这一结果与文献[2]发现这一区域呈现自吸收现象是非常一致的.

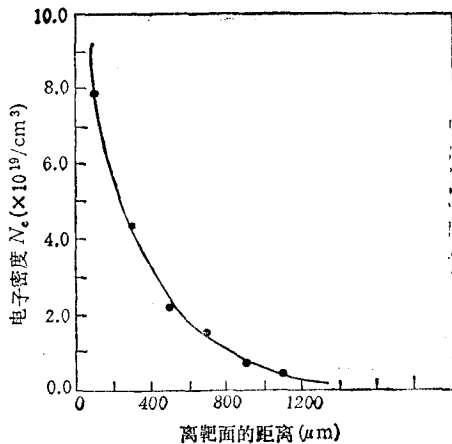


图 3 类锂离子 X 射线激光增益介质电子密度随靶面距离的变化曲线

四、结 论

综上所述, 类锂离子复合 X 射线激光谱线展宽的主要机制是斯塔克展宽. 用线性斯塔克理论得到的增益区电子密度约在 $10^{19}/\text{cm}^3$ 左右, 对应最大增益处激光线展宽为 $0.21 \text{ \AA}$, 相应的电子密度和反转粒子数分别为 $2.9 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 和 $5.5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$.

作者衷心感谢本所 LF12 激光装置运行组的大力支持和合作.

- [1] J.C. Moreno *et al.*, *Phys. Rev.*, **A39**, (1989), 6032.
- [2] Z.Z. Xu *et al.*, Proceedings of 2nd International Colloquium on X-ray Lasers, 17—21 September 1990, York University, York, UK to be published.
- [3] W.N. Chen *et al.*, CLEO'90 Paper: CWF42.
- [4] 张正泉等, 光学学报, **8**, (1988), 762.
- [5] T. Kishimoto, Report of Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, (108) (1985). 70.
- [6] H. R. Griem, Plasma Spectroscopy (McGraw-Hill Press, New York, 1964).
- [7] 项志遵、俞昌旋, 高温等离子体诊断技术(上海科学技术出版社, 1982), 第 92 页.
- [8] C. Keppeler, *Phys. Rev.*, **A6** (1972).
- [9] H. R. Griem, Spectral Line Broadening by Plasmas (Academic Press, New York, 1974).
- [10] Y. H. Wang *et al.*, *Phys. Rev.*, **A**, **42** (1990), 2322.

SPATIAL DISTRIBUTIONS OF X-RAY LASING LINEWIDTH AND ELECTRON DENSITY IN A Li-LIKE SILICON PLASMA

LU PEI-XIANG ZHANG ZHENG-QUAN XU ZHI-ZHAN

FAN PIN-ZHONG SHEN BAI-PEI CHEN SHI-SHENG

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

(Received 3 April 1991)

ABSTRACT

Through analyzing the spatial distribution characteristics of the linewidth of Li-like silicon ions X-ray lasers, we show that Stark broadening is the main line broadening mechanism for Li-like Si^{11+} ions recombine X-ray laser. Spatial distribution of the electron density of gain medium obtained by Stark broadening shows that the electron density in the gain region is about $10^{19}/\text{cm}^3$, and the lasing linewidth and electron density are 0.21 Å and $2.9 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ at the gain maximum respectively.

PACC: 5250J; 3220R; 4255V