

对应于铜离子 X 射线激光条件下的等离子体基本参数和光谱结构*

冯贤平 徐至展 张正泉 范品忠 王晓芳 沈百飞 陆培祥 陈时胜
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文是在复合泵浦类钠铜软 X 射线激光系统实验^[1]基础上, 对该体系的等离子体参数、光谱结构进行测量和分析, 给出了类钠铜离子粒子数反转, 增益系数与等离子体参数及发射谱结构的内在联系。文中也给出了不同激光功率对各种等离子体参数、光谱结构的影响。

关键词: X射线激光, 类钠铜离子, 等离子体参数。

一、引 言

激光产生的铜等离子体特性研究是一个极为热门的课题^[2], 其原因不仅在于铜离子已显示出了复合泵浦^[3]与碰撞激发泵浦 X 射线激光器的可行性^[4], 而且还在于它的典型光谱结构^[5,6]。因此目前开展有关铜等离子体 X 射线激光介质研究极为活跃, 也发表许多有关文章讨论二种机制产生 X 射线激光的问题^[3,4]。最近上海光机所徐至展小组也成功地进行了这方面的研究工作, 取得了许多可喜结果^[1]。

然而实验研究和结果分析主要集中在激光增益测量上^[1,3,7], 而与之密切相关的等离子体温度, 密度以及时间特征等参数诊断工作开展的较少, 其原因是相应的诊断理论没跟上, 测量技术也存在着一些问题。基于上述原因, 本文采用各种光谱仪从几个侧面联合测量, 从而诊断出各种等离子体基本参数与 X 射线激光, 泵浦激光间的内在联系, 较深入地揭示类钠铜离子 X 射线激光介质的物理机制。

二、实 验 条 件

实验中**各元素的 X 射线谱测量主要采用多台光栅光谱仪和晶体谱仪拍摄, 目的是为了获得更广范围内的激光等离子体发射谱, 以从各个侧面来揭示等离子体参数和特性。

一台具有空间分辨的掠入射光栅谱^[10,11]被安置在线状等离子体柱的一端并与之准直, 激光在不同的入射条件下, 测量不同元素等离子体极紫外发射谱, 另一台针孔光栅谱仪^[12]与 X 射线条纹相机连结被安置在线靶另一端, 以获得时间分辨的 X 射线谱, 目的是

收稿日期: 1991年2月12日

* 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资助。

** 本实验是在上海光机所 LF12 激光装置和六路激光装置上完成的, 有关 LF12 和六路激光装置的性能在文献 [8,9] 已作了详细论述。

诊断等离子体的动力学行为,此外还有一台 OHM 平晶谱仪被安置在靶侧面上端以获得线聚焦等离子体发射的空间分辨和积分 X 射线谱^[3]。整个实验布局如图 1 所示。

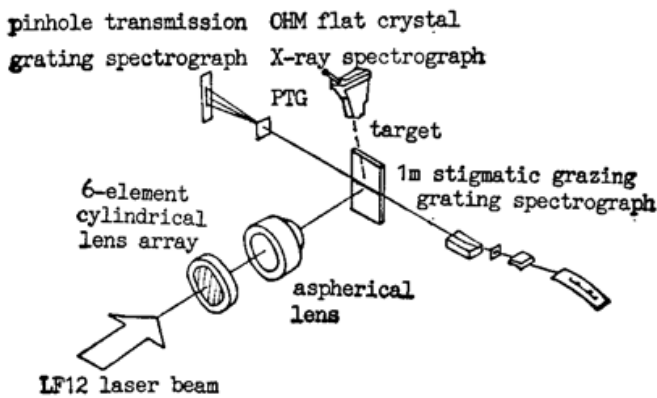


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

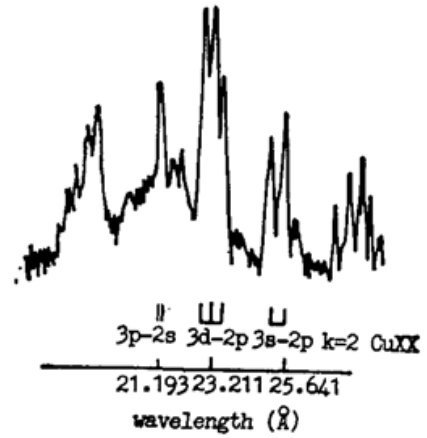


Fig. 2 The microdensitometer trace of X-ray emission spectrum of a copper plasma. The laser intensity on target is about $2.5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$. K is diffraction order

三、实验结果与讨论

本实验工作是类钠铜离子 X 射线激光总体实验的一个组成部分,本文只是从物理特性上来研究等离子体作为 X 射线激光介质的机制,详细地分析了整个等离子体 X 射线伴线结构、共振线结构及时间结构等有关参数。在激光功率密度 $3 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 条件下,利用 OHM 平晶谱仪摄到的铜激光等离子体 X 射线谱黑度扫描曲线(如图 2 所示),并对图 2 中各条线谱进行了标号和辨认,其中类氮铜离子的 $n=3-n'=2$ 能级间跃迁辐射占极对的优势,除此之外还存在着一些较弱的类钠离子伴线谱。这个现象说明本激光条件下研究类钠铜离子 X 射线复合泵浦激光是可行的。至少在各电离离子丰度分配上是合理的。随着泵浦激光功率密度的提高,铜等离子体 X 射线谱明显地变得复杂起来。如图 3、图 4 就是对应激光功率密度 $2 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 条件下得到的铜,硒等离子体 X 射线谱黑度扫描曲线。

从图 2、图 3 X 射线谱结构特别是连续谱结构,可以发现在波长 $\lambda=5 \sim 13 \text{ \AA}$ 区域内连

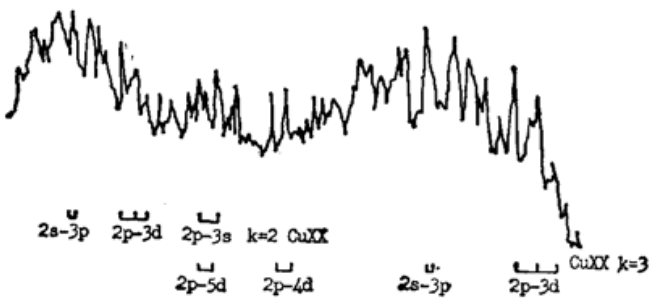


Fig. 3 The microdensitometer trace of a copper plasma X-ray emission spectrum recorded by OHM crystal spectrograph. The laser intensity on the target is about $2 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$

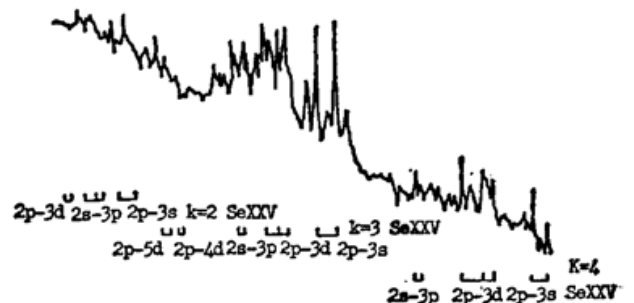


Fig. 4 The microdensitometer trace of X-ray emission spectrum of a Se plasma corresponding to Fig. 3. experimental condition

续谱强度与波长关系呈抛物状结构。假设本系统 X 射线连续谱是由电子离子碰撞韧致辐射起主要作用。则利用连续谱峰值强度对应的波长与等离子体电子温度间关系, 可估计出相应的等离子体温度^[13]。

$$T(\text{eV}) = 6200/\lambda_{I\max},$$

由此可得在激光功率密度 $3 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 条件下的等离子体电子温度 $T_2 = 569 \text{ eV}$ (见图 2, $\lambda_{I\max} = 10.98 \text{ \AA}$) 此时体系有 X 射线激光增益, 但随着入射激光功率变大, 波长 $\lambda_{I\max}$ 逐渐向短波方向移动如图 3 所示, 在入射功率 $2 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 条件下, $\lambda_{I\max} = 10.44 \text{ \AA}$, 相应的等离子体电子温度是 $T_3 = 594 \text{ eV}$, 即 $T_3 > T_2$, 由此可得不同入射强度激光的作用, 产生了不同温度的等离子体, 最终导致等离子体发射的不同光谱结构和强度。而针对复合泵浦类钠铜离子软 X 射线激光情况, 等离子体温度一般控制在 $T_3 = T_2 = 569 \text{ eV}$ 左右为好。此时的各离子丰度结构(如图 2 所示)较合理。事实上, 在这种条件下已经得到了类钠铜离子的 X 射线激光放大和增益。而对于过强或过弱的激光入射产生的等离子体, 无论在离子丰度分布上, 还是在激发态粒子的布局上都将不利于产生复合泵浦类钠铜离子软 X 射线激光。

同样图 3 硒等离子体光谱, 可发现它也有类似的抛物状连续谱结构, 但此时的连续谱峰值强度对应的波长已移至类氩硒离子 $2p-3d$ 线附近, 类似上述方法, 相应地得到在 $2 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 激光辐照条件下的硒等离子体电子温度是 $T_3 = 778 \text{ eV}$, 这个时空平均温度比起同激光条件下的铜等离子体电子温度要大。这个结果揭示在相同激光条件下产生的高原子序数等离子体平均电子温度要比低 z 大的可能, 实际上, 根据激光加热等离子体过程的基本理论知道, 等离子体的激光能量吸收主要是通过逆韧致辐射过程^[13], 即

$$\epsilon_n \sim z^2 N N_i,$$

式中 N , N_i 分别为电子密度, 离子密度, z 为原子序数, 如不考虑其他参数的影响, 大致可估计铜、硒等离子体对激光能量的吸收之理论。比值 $\alpha = (\epsilon_{\text{Se}}/\epsilon_{\text{Cu}}) \sim (34/29)^2 \sim 1.37$, 即高原子序数有利于激光能量吸收。而本文的实际测得等离子体参数诊断中, 铜、硒等离子体电子温度之比 $\alpha' = T_{\text{Se}}/T_{\text{Cu}} \approx 1.31$ 。其次从图 3、图 4 曲线的 $2p-3s$, $2p-3d$ 谱线强度之比上也可明显地看出铜、硒 X 射线结构的不同性。进一步分析光谱结构, 还可以发现图 3 谱线的分辨率或者说线半宽要比图 4 硒谱的结构要差一些。而图 4 所对应的电子温度要比图 3 的高, 由此可推断本体系多普勒加宽并不重要。对于斯塔克加宽, 它为电子密度和原子序数成正比^[14] $\Delta\lambda \sim N^{2/3} z^{-5}$ 。在电子密度变化不是太大的情况下, 不同原子序数等离子体 X 射线线宽大小主要由原子序数起主要作用。由于硒的原子序数 z_{Se} 要大于铜 z_{Cu} , 因此图 4 谱线比铜谱线宽要好, 由此得到本体系谱线加宽主要是由斯塔克效应所致。

图 5 是利用透射式光栅谱仪与 X 射线条纹相机连接所拍摄到的铜等离子体 X 射线时间特征谱, 由于谱仪分辨率问题^[12], 线叠加较严重, 整个光谱呈准带状。通过分析与文献 [12, 15] 的比较, 已辨认出它们主要是属于 L 、 M 、 N 带谱。利用谱仪几何关系和光栅方程, 可以估计出 L 带谱的峰值位置对应波长是 1.1 nm 。然而比较图 2 和图 3 谱结构, 在图 3 中 L 带谱的主要贡献应是类氩离子 $n=3-n'=2$ 跃迁线, 相应的平均波长应是 1.2 nm 。引起上述 0.1 nm 差别的原因可能是靶-透射光栅-条纹相机间的空间位置确定困难。现取 L 带峰值波长为 1.2 nm , 由此推出 M 带峰值波长 5.1 nm , N 带峰值波长 8.7 nm , 它们主要由类钠铜离子 $n=4-n'=3$, $n=5-n'=4$ 间电子跃迁产生的。

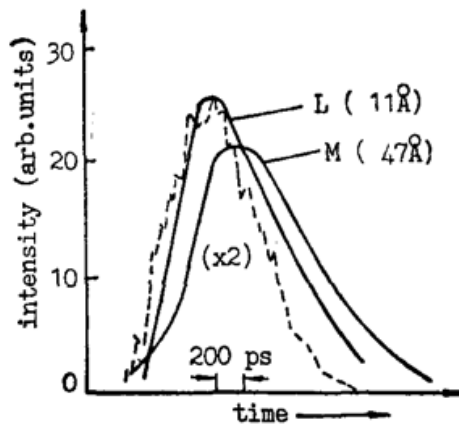


Fig. 5 Featured curve of copper plasma L-bond and M-bond spectroscopic intensities with time evolution. The spot line represents time profile of laser corresponding to Fig. 2. experimental condition

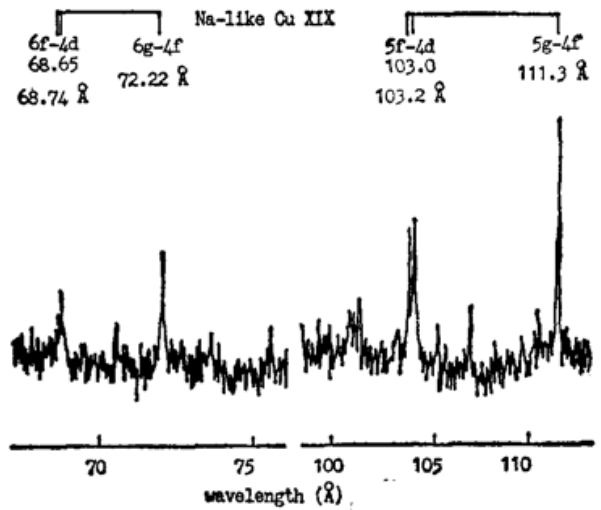


Fig. 6 Corresponding to Fig. 2 experimental condition. The microdensitometer trace of XUV emission spectrum of a copper plasma recorded by 1m grazing incidence grating spectrograph with 5μ entrance slit.

现考虑等离子相对电子密度时间特性,从图5可看出, L 带类氩铜离子的形成一般要比激光脉冲推迟 100 ps 左右,而类钠铜离子生成一般要比类氩离子推迟 170 ps 左右,且在强度上(或丰度上)要比类氩离子少。这个结果的解释,作者认为,一开始激光脉冲前沿比较弱,故先在等离子体中产生低电离离子(图5时间初始部分),随着激光脉冲强度的增加和峰值的到来,等离子体中离子电离占绝对优势,高电离离子具有高的丰度。假设体系是准静态过程,则由日冕沙哈方程^[13] $n_{Ne}\alpha = n_{Na}S$, 可以很容易证明在等离子体前级段,类氩铜离子丰度要远大于类钠离子丰度。即 $n_{Ne} \gg n_{Na}$ 。此时体系的 X 射线连续谱辐射主要是由电子-离子碰撞韧致辐射决定,且其波长较短。根据上述诊断结果,估计这一级段(激光功率升级段)的电子温度可能是 $T_e \geq T_0 = 569$ eV,随着时间的推移,入射激光强度的变弱,等离子体温度渐渐降低,体系逐渐由占优势的电离状态转变成占优势的复合状态。大量类氩离子复合成类钠离子。由复合占优势的速率方程^[10],估计出此时的丰度比 $n_{Na} \gg n_{Ne}$,这个结果在 X 射线时间特征谱上已比较直观地表现出来。由于电子与高电离离子(类氩离子)复合优先占居高激发态。因此在获得的光谱(图6)中明显表现为大量高激发态电子向低能态跃迁谱。

上述结果实际上已进一步证明了等离子体中各离子随时间变化的动力学过程,在这种结构条件下,等离子体体系是很可能获得类钠铜离子能极上的粒子数反转,事实上在上述体系中已发现了复合泵浦类钠铜离子软 X 射线激光。此外,上述结果也解释了为什么不可能在太强激光或太弱激光条件下得到类钠铜离子复合 X 射线激光的原因。

最后必须指出在等离子体电子温度、密度测量中,由于实验测量及数据处理上的误差和在利用美国利弗莫尔实验室 Cowen 程序计算原子参数时的误差原因^[17]。实验结果有一定的不精确性,但在量级上和发展势趋上是可靠的,如利用文献[18]的激光功率与等离子体电子温度理论计算结果估计出在 $3 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 条件的电子温度 $T = 600$ eV,而实验测量结果是 $T_2 = 569$ eV,这二个结果还是比较接近的。

作者衷心感谢中国科学院上海光机所高功率激光物理实验室 LF12 激光装置运行组的紧密配合和大力协作。感谢李跃林博士, 江志明博士, 马锦秀博士在实验工作中的大力帮助。

参 考 文 献

- [1] Xu Zhi-zhan, Fan Pin-zhong *et al.*; *International Colloquium of X-ray laser*, 17~21, September 1990, York University, York, UK.
- [2] 冯贤平, 徐至展等;《物理》, 1989, **18**, No. 12 (Dec), 708~712.
- [3] 冯贤平;《物理学进展》, 1988, **8**, No. 3 (Sep), 311~327.
- [4] 冯贤平, 徐至展等;《物理》, 1990, **19**, No. 4 (Apr), 395~399.
- [5] 冯贤平, 徐至展等;《光学学报》, 1989, **9**, No. 8 (Aug), 680~684.
- [6] 冯贤平, 徐至展等;《量子电子学》, 1989, **6**, No. 3 (Sep.), 273~278.
- [7] C. M. Brown, J. O. Ekberg *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1987, **4**, No. 4 (Apr), 533~538.
- [8] Zhi-zhan Xu, An-ming Li *et al.*; *Chinese Physics*, 1981, **1**, No. 3 (Sep), 548~556.
- [9] Xi-ming Deng, Wen-yan Yu *et al.*; *Report of Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica* 1987.
- [10] 冯贤平, 张正泉等;《光学仪器》, 1989, **11**, No. 3 (Sep), 39~42.
- [11] Pin-zhong Fan, Zheng-guan Zhang *et al.*, *International Colloquium on X-ray laser*, 17~21, September 1990, York University, York, UK.
- [12] A. Pachtman *et al.*; *Association for plasma studies of China*. Report No. APS-88-006, Paper D-1, Nov., 1988.
- [13] 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, p. 70~72, p. 61~63.
- [14] J. C. Moreno, H. R. Griem *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1989, **39**, No. 11 (Jun), 6032~6037.
- [15] 王晓方, A. Pachtman 等;《物理学报》, 1990, **39**, No. 6 (Jun), 923~927.
- [16] O. Willi, D. Bassett *et al.*; *Proc. SPIE* 1986, Vol. 688, p. 2~7.
- [17] R. D. Cowan; *In the Theory of Atomic Structure and Spectra*, (California Press, Berkeley, Calif., 1981), 214~236, 456~483.
- [18] C. E. Max; *Physics of the Coronal Plasma*, (North-Holland Publishing Company, 1982), 306~307.

Basic parameters and spectroscopic structure of plasma corresponding to Na-like Cu ion X-ray laser

FENG XIANPING, XUZHIZHAN, ZHANG ZHENGQUAN, FAN PINZHONG,
WANG XIAFANG, SHEN BEIFEI, LU PEIXIANG AND CHEN SHISHENG
(Shanghai Institute of Optics and Mechanics Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 12 February 1991)

Abstract

Recently our group has succeeded in systematic experiment on X-ray laser in recombining plasma at LF12 facility SIOM. on this base. We measured and analyzed spectroscopic structure corresponding above system and derived basic relation of population inversion, gain parameter with plasma parameters. Meanwhile, it also gives the effect of different laser intensities on plasma parameters and spectroscopic structure.

Key words: X-ray laser, Na-like copper ion, plasma parameters.