

# 非同轴双束激光产生的等离子体辐射\*

冯贤平 徐至展 余 玮 张文琦

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 采用非同轴双束激光, 可得到时空差可控的二束不同性质的等离子体, 实现在绝对同等条件下研究多束等离子体辐射的空间非均匀性和等离子体喷射对线加宽的影响. 实验结果显示出在最简单的实验装置上实现等离子体强 X 射线泵浦 X 射线激光方案的可能性.

**关键词** 双束等离子体, 非均匀性.

激光等离子体辐射特性的研究无论是对 X 射线激光本身还是对激光核聚变都极为重要<sup>[1,2]</sup>. 早在 1982 年本文作者已较为系统地分析了多种元素的等离子体辐射, 1988 年测量了等离子体电子温度、密度与入射激光功率之间的关系<sup>[2]</sup>. 最近又研究了各种离子分布以及它们丰度的变化等<sup>[3,4]</sup>. 本文就是在上述工作的基础上, 利用非同轴激光产生的双束等离子体方法严格考查、比较不同入射激光在不同时间、空间条件下产生的等离子体. 以控制等离子体各参数.

实验是在本所“六路”激光装置上完全的. 为获得二束不同特性的等离子体, 采用非同轴二束激光经组合透镜以点(或线)形式聚焦在靶面上. 每束激光输出能量约 5~10 J, 相应的面功率约  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>(或  $5 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>)左右.

实验中靶材主要选用铝、铜平板材料, X 射线主要由 TLAP 晶体谱仪和 X 光针孔相机记录, 整个实验安排如图 1 所示.

采用非同轴双束激光产生的二个不同性质的等离子体, 从根本上简化了多束等离子体需要多个激光聚焦系统的复杂结构. 在本系统中, 只要控制二束激光的光程差和光束间的夹角大小, 就可以获得时空差可控的双束等离子体, 以考察不同等离子体的时空特性以及它们间的相互作用和边界效应, 图 2 就是在时间同步但空间位置不同时由  $1.3 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> 和  $1 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> 二束不同功率激光产生的双束铜离子体发射的 X 射线(LPX)光谱图. 不难发现它们主要是由类氦、类氟和类氧离子以及众多杂质离子谱组成, 波长在 0.4~1.6 nm 之间. 其中类氦离子辐射的 X 射线电强, 它的丰度最大, 且在空间所占据的线度也比类氟和类氧的要大许多, 离子丰度及其空间占据随离子电离度提高而下降. 比较连续谱与线谱结构, 不难看出连续谱空间区域要小于线辐射区域的 2~3 倍. 连续谱主要是由靠近靶面区域的电子和离

\* 本课题得到国家自然科学基金和国家科委 863 高科技基金资助.

收稿日期: 1993 年 11 月 1 日

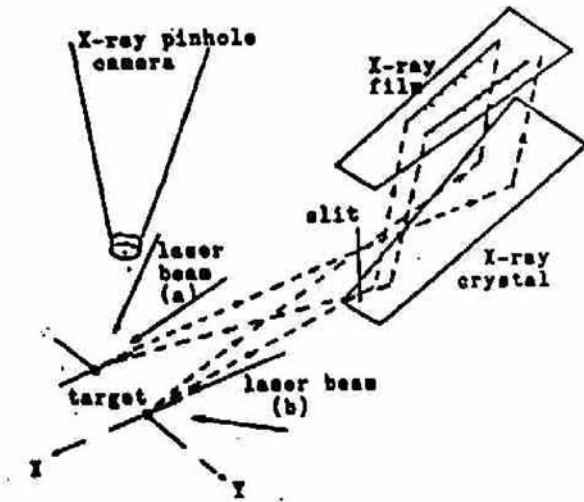


Fig. 1 The experimental set-up. dash line  
 ----- X-ray track

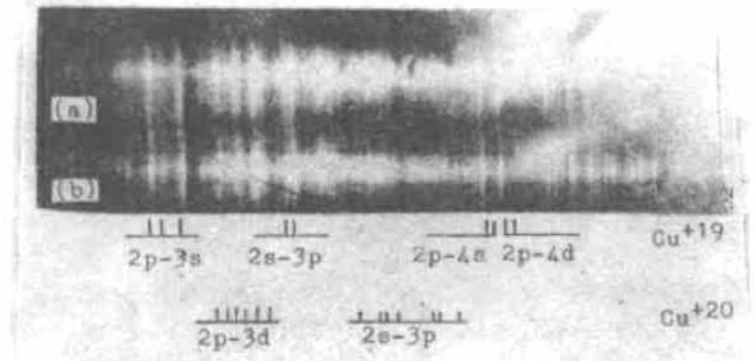


Fig. 2 Copper-LPX spectra produced by two-beam laser  
 (a)  $1.3 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ; (b)  $1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$

子碰撞复合产生, 因为在该区域附近的电子密度较高, 而电子、离子温度较低, 电子离子复合相互作用强烈. 对于远离该区域外侧等离子体密度和温度因膨胀而变稀和冷却, 尽管电子离子也有碰撞, 但作用相对较弱. 进一步分析图 3 的光谱结构, 还可以看出不同激光功率辐照下等离子体 X 射线辐射结构的差别, 即入射激光能量大时, 无论是连续谱还是线谱, 空间发射范围都在增大. 其中最明显的变化是谱线加宽, 谱线叠加变得更为严重.

在文献[5]中, 利用连续谱斜率法和斯塔克谱线加宽法可以求出等离子体电子温度和密度参数, 从诊断结果显示, 一般等离子体平均电子密度受入射激光功率变化影响不大, 而电子温度对入射功率要灵敏些. 在本实验条件下, 等离子体的电子温度约为  $T = (500 \sim 600) \text{ eV}$ , 但

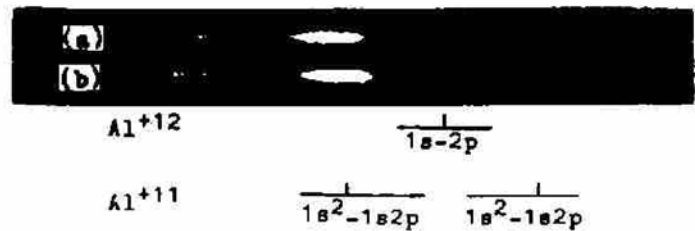


Fig. 3 Aluminium-LPX spectra produced by two beam lasers (a)  $5.6 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ; (b)  $6.1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$

作者无法从图 2 线宽中得到有关电子密度系数. 从图上测出类氦  $2p - 3s$  线宽是  $3.4 \times 10^{-3} \text{ nm}$ , 假设电密度等于临界密度, 电子温度是  $600 \text{ eV}$ , 由此两个效应引起的加宽都要小于  $3.4 \times 10^{-3} \text{ nm}$ , 即等离子体源加宽是主要的, 这对提高等离子体参数的测量精度是不利的. 相对而言, 激光铝离子体的光谱结构要比铜 LPX 谱简单得多, 图 3 是利用非同轴线聚焦(X轴)激光辐照铝平面靶得到的两束时间同步但位置不同的等离子体谱, 相应的激光功率分别是  $5.6 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$  和  $6.1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ . 图 3 中, 三条 LPX 线分别属于类离子  $1s^2-1s2p$ ,  $1s^2-1s3p$  跃迁和类氢离子  $1s-2p$  跃迁. 线谱的源加宽极为严重. 从图 1 线状 X 射线源(x轴)在晶体衍射原理图上很容易理解源加宽的起因, 如将图 1 x 轴上的 TIAP 平晶谱仪放置的 y 轴上测量, 能够克服源加宽问题, 但由此而起两个等离子体 X 射线谱在纵向(衍射方向)的相互叠加. 采用最新研制的针孔式晶体谱仪能够解决这个问题[6].

从图 3 中还可以看到在低激光功率辐照条件下, 铝等离子体膨胀区域较小, 而文献[7]结果显示出低 Z 等离子体的空间膨胀要明显地大于高 Z 等离子体. 由此可推算出在相同的激光条件下, 低 Z 元素等离子体的膨胀要比高 Z 的等离子体对外界激光功率更敏感, 但低 Z 等

离子体 X 射线发射强度较弱.

本实验的基本目的是为了演示在比较简单的实验装置上产生双束等离子体, 以实现强 X 射线泵浦 X 射线激光的方案, 同时也是为了比较绝对同等条件下不同性质等离子体辐射的差别. 从得到的结果已显示出上述方法是可行的. 进一步的工作只是改变双束或更多束激光的夹角和光程差, 就可研究不同空间位置、不同时间和不同性质的两个或多个等离子体间相互作用和边界效应等物理机制, 为实现等离子体强 X 射线源泵浦 X 射线激光作好必要的准备.

感谢本所六路实验组对实验的大力帮助.

### 参 考 文 献

- [1] Xu Zhizhan, Zhang Zhengqiu, Fan Pinzhong *et al.*, Soft-X-ray amplification by Li-like  $Al^{10+}$  and  $Si^{9+}$  ions in recombining plasmas. *Appl. Phys.*, 1990, B50: 147~151
- [2] 冯贤平, X 射线激光器研究初步结果. *物理学进展*, 1988, 8(3): 311~327
- [3] 冯贤平, 徐至展, 林礼煌等, 激光辐射凹形靶提高激发态离子丰度. *光学学报*, 1990, 10(3): 193~195
- [4] 冯贤平, 徐至展, 江志明, 等离子体中高阶电离离子的空间分布. *物理学报*, 1988, 37(7): 1183~1187
- [5] C. D. Michelis, M. Mattioli, Soft-X-ray spectroscopic diagnostics of laboratory plasmas. *Nuclear Fusion*, 1989, 26(6): 677~754
- [6] 冯贤平, 韩申生, 徐至展等, 等离子体 X 射线激光介质的均匀性测量. *光学学报*, 1994, 14(4): 342~345
- [7] 冯贤平, 徐至展, 陆培祥等, 线聚焦激光等离子体 X 射线辐射特性. *J. Fizik (Malaysia)*, 1989, 10(1): 49~54

## Plasmas X-Ray Radiation Produced by Two-Beam Non-Coaxial Laser

Feng Xianping      Xu Zhizhan      Yu Wei

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

(Received 1 November 1993)

**Abstract** Using non-coaxial two-beam laser, we can obtain specially designated plasmas with certain parameter in space and time, and realize the study of spatial distribution of plasma radiation and effect of plasma source on spectroscopic line shape in absolute the same condition. The experimental results show that possibility of X-ray laser pumped by plasma X-ray source in a very simple facility.

**Key words** two plasmas, inhomogenous.