

5—200Å 范围激光等离子体 X 射线 辐射特性研究

王晓方 A. Pachtman¹⁾ 徐至展 陈时胜 李跃林 钱爱娣

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800

1989年7月27日收到

利用带有针孔的透射式光栅光谱仪研究了激光等离子体 X 射线辐射的原子序数依赖性和激光功率密度对辐射的影响。得到了波长为 $1.06\mu\text{m}$, 平均功率密度为 $5 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 的激光辐照条件下 $Z = 6(\text{C})$ 到 $Z = 79(\text{Au})$ 的不同原子序数激光等离子体 X 射线发射光谱。点聚焦和线聚焦激光照射方式下 Al, Au 等离子体 X 射线发射的对照实验结果表明, 激光功率密度对低 Z 等离子体 X 射线发射的影响比对高 Z 的影响更明显。

PACC: 5250J; 3320R; 9870Q; 4255V

一、引 言

高功率激光同固体靶(材料)相互作用产生的激光等离子体, 是一高亮度 X 射线辐射源。它的 X 射线辐射特性对于天体物理和激光惯性约束核聚变的研究、高电离态原子光谱分析, 以及具有广泛应用价值的 X 射线激光实现等有着重要意义^[1]。X 射线辐射取决于等离子体的各个因素。原子序数、激光辐照条件是影响等离子体 X 射线发射的基本参量。迄今, 人们进行了大量实验和理论分析以研究原子序数、激光条件对 X 射线辐射特性的影响。尤其是最近关于 X 射线激光的实验研究, 更深刻地揭示了原子序数和激光辐照条件对 X 射线激光的实现和最佳运行所起的决定性作用^[2,3]。

我们利用自制的具有空间分辨能力的针孔透射光栅谱仪 (PTGS)^[4], 对 $1.06\mu\text{m}$ 激光打靶所产生的等离子体 X 射线发射 (5—200 Å) 随原子序数的关系和激光功率密度对 X 射线辐射特性影响进行了研究。结果表明, 激光等离子体 X 射线发射强烈地依赖于原子序数, 而激光功率密度的改变对低 Z 等离子体 X 射线发射的影响比对高 Z 的影响更显著。

二、实 验 条 件

整个实验是在本所六路激光装置上完成的。入射激光波长为 $1.06\mu\text{m}$, 单路脉宽为 250ps。实验中采用点聚焦或线聚焦两种方式正入射打靶。在点聚焦激光打靶条件下, 将单路输出的激光光束经过一个 $f/1.5$ 非球面透镜在靶面上得到直径约 $100\mu\text{m}$ (FWHM) 的光斑。激光能量为 10J 左右。在线聚焦条件下, 利用两路合并同时照射打靶。光束经一

1) 本所激光等离子体物理研究室博士后研究人员。

负柱面透镜和一 $f/1.5$ 非球面透镜后在靶面上形成一条高 1.58 mm, 宽 $100\mu\text{m}$ 的线状焦线。激光能量在 1—30 J 内变化。实验中采用的靶有多种, 如条靶、单层靶、柱靶或薄膜靶等。单层靶是在玻璃基片上镀的一层厚约 3000 Å 的所需材料。通过对多层靶 X 射线发射的研究表明, 这样的膜层已足够厚而不被激光消融烧穿; 不会影响这种材料(膜层)的 X 射线辐射特性。实验中所使用的诊断仪器 PTGS 的特点介绍可见文献[4], 该谱仪的摄谱范围为 5—200 Å, 空间分辨能力为 $60\mu\text{m}$, 光谱分辨优于 4 Å, 其中 5—100 Å 内光谱分辨可达 2—3 Å。实验中谱仪观测方向与入射激光成 37° 角度, 两者都在水平面上, 如图 1。谱仪接收的结果采用上海感光胶片厂生产的无保护层软 X 射线胶片记录。在整个实验中, 激光打靶和仪器接收都是在 10^{-2}Torr 的真空条件下进行。

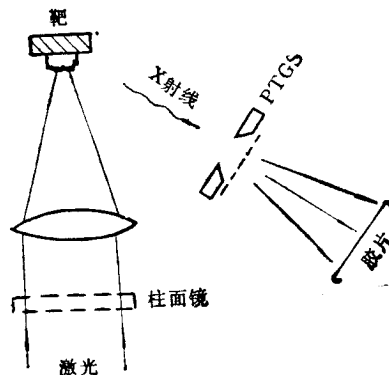


图1 实验装置示意图

三、结果与讨论

1. X 射线发射光谱随原子序数的关系

在点聚焦激光辐照条件下, 得到了平均功率密度为 $5 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 的激光照射不同原子序数的靶所产生等离子体的 X 射线发射光谱。图 2 是各种光谱的微光度计扫描迹 (150Å 之后光谱很弱, 图中未给出), 表明了同一激光功率密度下 X 射线辐射随原子序数的依赖性。尽管辐射都集中在 5—100 Å 范围, 光谱以线谱为主, 但光谱中峰位置的出现随原子序数不同而变化。且随着原子序数由低 $Z(^6\text{C})$ 向高 $Z(^{79}\text{Au})$ 发展, X 射线发射从 K 带移到 O 带^[5]。同一谱带的峰值波长 λ 与原子序数 Z 按照 Moseley 定律 $Z \propto \lambda^{-\frac{1}{2}}$ 变化。对 M 带的分析表明, 按上述关系确定的波长和实际光谱的峰位置偏离仅在 1.5 Å 以内。由此可估计等离子体中原子被电离的程度, 如从 Cu 的发射谱可推断 Cu^{20+} 离子存在, 从 Er 的光谱可肯定部分 Er 原子至少有 40 个电子被剥离等。谱带随原子序数的移动实质上是等离子体电子温度与原子内壳层电子束缚能相关的反映。Nagel 等人的研究^[6]表明, 当等离子体电子温度 (eV) 与原子内某壳层电子束缚能相近时, 光谱中将出现对应谱带的峰。

从图 2 还可注意到, 有些元素的 X 射线发射主要集中在某一谱带中, 如 Cu 的 L 带, Mo 的 M 带。辐射的这一特点提供了寻找适当的靶材和辐照条件得到有效的 XUV (极远紫外) 激光泵浦光源, 高亮度脉冲型 X 射线单色源的途径。同时, 利用一些特征谱线 (如 Cu-L 线) 的发射将有助于等离子体参数和动力学过程的分析^[7]。

利用胶片的定标结果和针孔透射光栅的衍射性质, 还可进一步获得 5—200 Å 范围 X 射线发射的绝对强度、转换效率等。这些结果将另文发表。

2. X 射线发射的空间特性

借助 PTGS 的一维成像特点可对激光等离子体 X 射线发射的空间特性进行分析。X 射线发射空间成像表明, 点聚焦打靶条件下时间积分的 X 射线发射在空间上呈高斯分布。

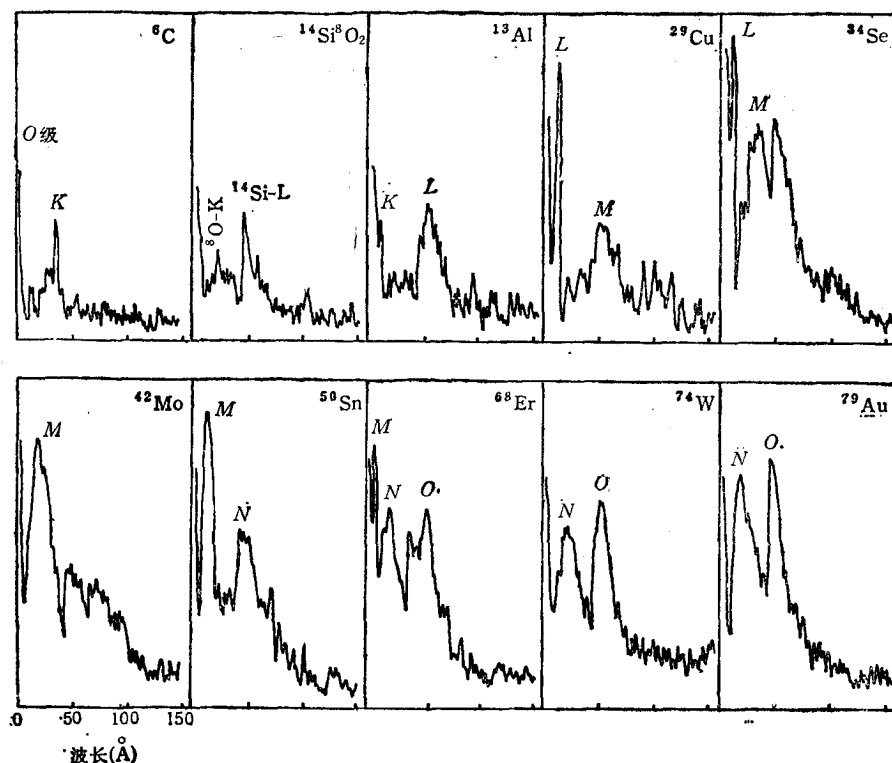


图2 PTGS 获得的 ${}^6\text{C}$ — ${}^{79}\text{Au}$ 激光等离子体X射线发射光谱的微光度计扫描曲线
其它光谱图横轴的坐标标度和 ${}^{42}\text{Mo}$ 的相同,并标出了各自的发射谱带

图3给出激光焦斑和典型X射线发射的空间分布比较:与入射激光的空间分布截然不同,等离子体X射线发射显示出平滑的空间分布特点。这一现象表明,虽然入射激光明显的强度起伏会造成激光对等离子体的加热在空间上不均匀,但由于等离子体内电子热传导等作用将减弱这一不均匀性的影响,并使等离子体温度的空间分布趋于均匀,因此时间积分的X射线发射在空间上表现出“平滑效应”。图4给出相同点聚焦激光照射条件下不同原子序数等离子体X射线发射的空间尺寸。可以看到,X射线发射的区域大致相同。与中、低Z相比,高Z等离子体短波长发射区域略小些,这主要是由于不同原子序数(因而原子质量不同)等离子体的流体膨胀和辐射的时间过程不同造成的^[6]。

3. 激光功率密度对X射线辐射特性的影响

针对点聚焦实验结果,进行了线聚焦激光打靶条件下Al, Au等离子体X射线发射的实验。图5给出两种激光辐照条件下部分波长的强度随激光能量的变化。从图5中可见,相对于点聚焦,在线聚焦条件下,Al的K(或L)带的(峰值)强度明显降低,表明激光功率密度对Al等离子体X射线发射的显著影响。事实上,在我们进行的更长焦线($\sim 9\text{mm}$)的线聚焦实验中(靶面平均功率密度 $2 \times 10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$),只出现L带,K带发射已观察不到。Au的结果则显示出激光功率密度的改变对发射的影响不大,只是在发射光谱中N带峰的位置从 $19\text{\AA}$ 移到 $25\text{\AA}$ 。对比这两种元素的结果表明,激光功率密度主要影响低Z等离子体的辐射特性。

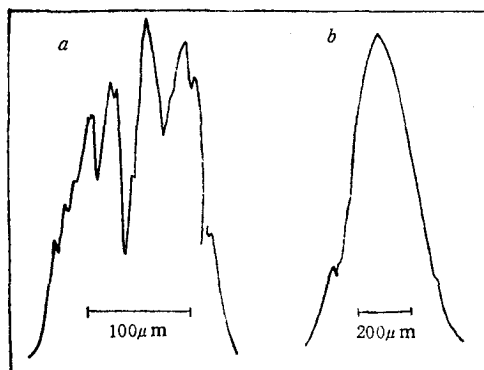


图3 激光聚焦 (a) 和典型 X 射线发射 (b) 的空间分布

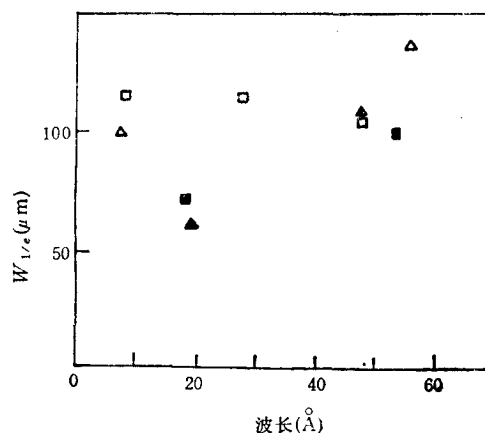
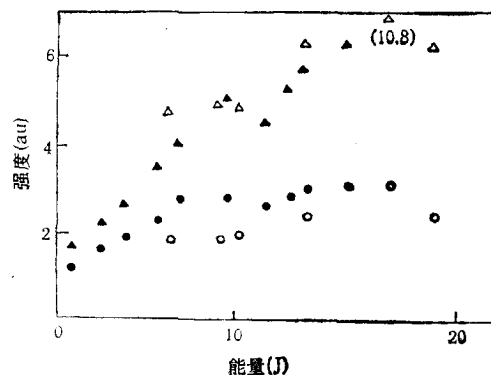
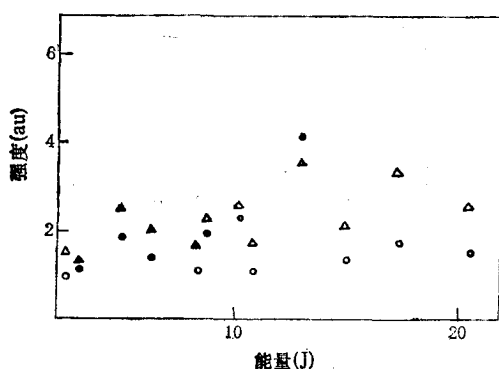


图4 X 射线发射区域的半宽度 $W_{1/e}$ (强度峰值 $1/e$ 处半宽度) 随原子序数的变化
△ 为 ^{13}Al ; □ 为 ^{34}Se ; ■ 为 ^{74}W ; ▲ 为 ^{79}Au



(a) Al 圆形为 8 Å; 三角形为 55 Å (b) Au 圆形为 19 Å; 三角形为 48 Å

图5 点聚焦和线聚焦 (1.58 mm 焦线) 两种激光打靶条件下 Al, Au 等离子体 X 射线发射的部分波长的强度随激光能量的变化 实心点代表点聚焦; 空心点代表线聚焦

Al, Au 等离子体 X 射线发射随激光功率密度的变化所表现出的差异也反映了低 Z 和高 Z 等离子体内不同的动力学行为。不同靶所吸收的激光能量在等离子体中的输运方式和分配 (如流体力学动能、热能、辐射能等) 的差异将影响相应等离子体的 X 射线辐射特性。对于低 Z 元素 Al, 由于其良好的热传导效率, 使吸收的激光能量从靶区外部传输到过密度区主要依赖电子热传导。当激光功率密度降低时, 等离子体电子温度降低^[9], 导致高阶电离态的离子数量减少。而对于高 Z 元素 Au, 电子热传导效率相对减弱, 辐射输运占有重要地位, 黑体辐射成份增加^[10], 等离子体各阶电离态上的粒子布居更接近平衡分布。在激光功率密度变化时 (变化不是特别大), 尽管由于功率密度降低使得靶区电子温度下降, 但辐射输运的影响将补偿温度降低带来的高阶电离态粒子数减少, 使 N 带的粒子布居数变化不大。而 N 带峰位置的移动则表明高 Z 等离子体的辐射不仅与主量子数有关, 还将受次壳层电子组态的差异所产生的能级分裂的影响^[11]。

四、结 论

利用 PTGS 对激光辐照靶所产生的等离子体 X 射线辐射特性研究表明,不同原子序数激光等离子体 X 射线发射的光谱范围和空间区域基本一致,但光谱随原子序数不同而明显变化,并且部分元素的发射集中在较窄的带中。在激光功率密度变化条件下,X 射线发射表明,低 Z 等离子体的辐射更易受功率密度的影响。根据这些结果,可以选取不同材料的靶和适当的激光功率密度,获得所需要的 X 射线辐射,以有利于 X 射线激光, XUV 激光泵浦光源或高亮度 X 射线单色源的研究。

项惠珠制作并提供了部分靶;本所六路激光装置的工作人员在实验期间给予了协助;激光等离子体物理研究室其它成员在有关实验和本文完成过程中提供了必不可少的帮助。谨此深表谢忱。

- [1] B. C. Fawcett, *J. Opt. Soc. Am.* **B1**(1984), 1; D. Matthews, M. Rosen, *J. Opt. Soc. Am.*, **B4**(1987), 575; R. Pakula, MPQ Report, MPQ95, (1985), p. 6.
- [2] T. Mochizuki, T. Yabe, K. Okada *et al.*, *Phys. Rev.*, **A33**(1986), 525.
- [3] P. Mortensen, *Laser Focus World*, 6(1989), 33; Guang-Yu Ying *et al.*, *Opt. Lett.*, 12(1987), 331.
- [4] A. Pachtman, Xu Zhizhan, Cheng Shisheng *et al.*, in Proc. of the Second Symposium on Plasma-Wave and Plasma-Matter Interactions. Association For Plasma Studies of China Report, APS-88-006, (1988), p. D-1.
- [5] T. Kishimoto, MPQ Report, MPQ105, (1985), p. 89; T. Mochizuki, T. Yabe, K. Okada *et al.*, *Phys. Rev.*, **A33**(1986), 525.
- [6] D. Nagel, P. G. Burkhalter G. A. Doscheck *et al.*, NRL Report, No. 7838, (1974); T. Mochizuki *et al.*, *Phys. Rev.*, **A33**(1986), 527.
- [7] N. M. Ceglio, R. L. Kauffman, A. M. Hawryluk *et al.*, *Appl. Opt.*, 22(1983), 318.
- [8] R. Fedosejevs, R. Popil, SPIE, 831, (1987), p.66.
- [9] P. Mora, *Phys. Fluids*, 25(1982), 1051.
- [10] R. F. Schmalz, J. Meyer-ter-vehn and R. Ramis, *Phys. Rev.*, **A34**(1986), 2177.
- [11] P. D. Goldstone, S. R. Goldman, W. C. Mead *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 59(1987), 56.

LASER PLASMA X-RAY EMISSION FROM 5Å TO 200Å

WANG XIAO-FANG A. PACHTMAN XU ZHI-ZHAN CHEN SHI-SHENG

LI YAO-LING QIAN AI-DI

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

(Received 27 July 1989)

ABSTRACT

This paper presents the studies of the dependence of soft X-ray emission on atomic-number and laser intensities by using a new diagnostic tool, pinhole transmission grating spectrograph (PTGS). Plasma X-ray spectra of various elements from $Z=6(\text{C})$ to $Z=79(\text{Au})$ produced by a laser beam with an average power density $5 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ reveal the strong dependence of X-ray emission on atomic number Z . Comparative experiments of Al or Au plasma X-ray emission under both spot and line focused laser illumination show that changes of the laser intensity have more remarkable influence on low Z plasma X-ray emission than that on high Z .

PACC: 5250J; 3320R; 9870Q; 4255V