

1.06 μm 激光等离子体软 X 射线辐射 及对原子序数的依赖

陈时胜 李跃林 徐至展 A.Pachtman 王晓方 钱爱娣 项惠珠

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

详细地研究了 1.06 μm 激光等离子体 X 光的辐射特性; 分析了不同谱带发射强度对激光能量的依赖关系, 并给出了 K、L、M、N、O 谱带发射强度对原子序数的依赖关系。

关键词: 激光等离子体, 等离子体光谱、软 X 射线光谱。

一、引 言

激光等离子体具有很高的亚千电子伏 X 射线转换效率, 其辐射光谱具有很高的亮度。它不仅可以作为 X 光刻和 X 光显微光源^[1,2]; 在基础研究方面, 也可作为惯性约束核聚变的驱动源^[3] 和短波长相干辐射的泵浦源^[4]; 因此了解激光等离子体光谱发射对激光和靶参数的依赖, 是具有重要意义的课题。

过去的研究主要集中在对辐射损失的绝对测量^[5~11], 包括辐射的转换效率; 却很少有对不同谱带特性的对比研究。本文报道了用透射光栅谱仪对激光等离子体 X 光辐射分谱带研究的初步结果, 及其对激光能量和原子序数的依赖关系。

二、实验概述

实验是在中国科学院上海光学精密机械研究所六路激光装置^[12] 上进行的, 其布局如图 1 所示。激光波长 1.06 μm , 脉宽 250 ps, 单路能量 1~20 J, 经 $f/D=2$ 非球面镜在靶面聚面聚焦成直径约 100 μm 的焦斑, 功率密度 $\sim 10^{14} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

实验中重点研究了 Au, Cu, Al 平面靶; 靶为在玻璃基底上镀厚为 300, 200, 200 nm 的膜构成, 按文献[13]的经验消融速率^[13]

$$\dot{m} = 10^5 \times (I_{\text{abs}}/10^{13} \text{ Wcm}^{-2})^{0.16} \text{ gcm}^{-2}$$

取上面所给的激光参数, 考虑在激光完全吸收时消融质量约为 $1 \times 10^{-6} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$, 对应于 Au, Cu, Al 的烧蚀深度分别为 40、90 和 200 nm, 而实际吸收效率总是小于 1 (尤其对低原子序数的铝), 故而在激光加热期间, 不会将薄膜烧穿, 因此基底对光谱发射的影响不大。

在研究辐射对原子序数 Z 的依赖关系时, 采用了 $Z=6\sim 79$ 的靶材: C, SiO_2 , Al, Ni,

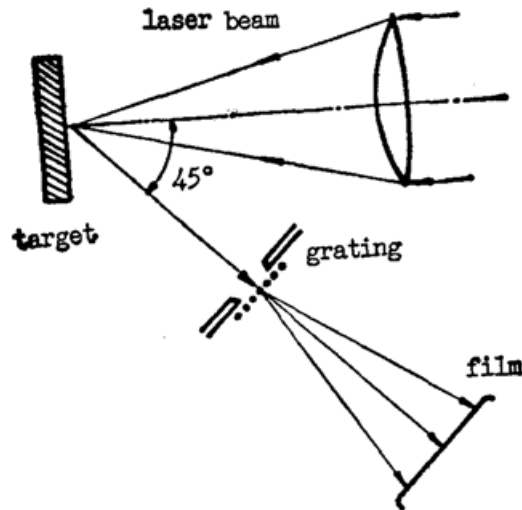


Fig. 1 Schematic setup of the experiments

Cu, Se, Mo, Sn, Er, W, Au 等, 其中 Al, Cu, Au 仍为上述镀膜靶, W 为 $\phi 1\text{ mm}$ 的丝, 其余均为厚度在 0.5 mm 以上的平板靶。对钨丝, 由于其高 Z , 自由膨胀在其能量输运过程中已不重要, 而丝的直径也足够大, 因此该数据有较好的系统性。打靶前, 靶面都进行过细致清洁。

实验的诊断采用了针孔透射光栅谱仪 (PTG)^[14], 该谱仪由 $\phi 25\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$, $d=1\ \mu\text{m}$ 的两个 PTG 组成, 光栅效率经半经验标定, 在亚千电子伏波段有较高而平缓的响应; 其光谱分辨和空间分辨分别为 $0.4\ \text{nm}$ 和 $60\ \mu\text{m}$, 摄谱范围为 $0.1\sim 2\ \text{keV}$ 。纪录采用了改进型国产 5F 胶片, 进行严格的后期处理。

三. 结果及讨论

1. 光谱谱带强度的横向分布

图 1 中透射光栅光谱仪的布局得到的空间分辨信息是光源辐射强度在靶面上的横向分布。

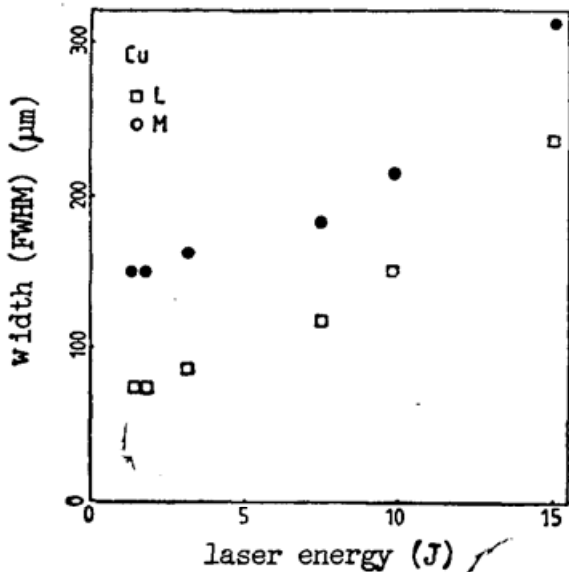


Fig. 2 Spatial widths of Cu-L(1.1 nm), Cu-M($4.9\ \text{nm}$) emission at peak intensity positions vs. laser energy

对六路的光学性质的研究表明^[15], 最佳聚焦时, 激光焦斑大小与激光能量呈线性关系, 且空间分布呈高斯形。因此, 如果靶面等离子体能量的横向输运受到抑制, 则光谱空间分布仅与激光能量相关。由于焦斑中心温度比外围高, 相应的高电离壳层谱带的横向分布比低能带要窄。图 2 给出了具有代表性的一组 Cu-L, -M 谱带峰 (Cu^{19+} , $1.1\ \text{nm}$; Cu^{18+} , $4.9\ \text{nm}$) 的空间宽度, 其特点和上述的分析一致。图中的两个宽度随激光能量作近线性变化, M 带比 L 带宽 $100\ \mu\text{m}$ 左右。对 Al-K, Au-N 和 Al-L, Au-O 宽度的测量分别与 Cu-L 和 Cu-M 具有相同的特点, 可见横向能量输运的确受到了抑制。这种抑制导致等离子体温度分布未能得到匀化。

2. 软 X 光谱辐射强度随入射激光能量的变化

入射激光能量的改变将直接影响激光等离子体的温度和离化态的分布,从而影响到等离子体的光谱发射,但由于不同元素原子壳层结构的差异,使不同元素靶的不同谱带辐射强度对激光强度有不同的依赖关系。图 3 给出了透射光栅光谱仪得到的 Al、Cu、Au 三种元素不同谱带峰值强度随激光能量的变化,其中 Cu, Au 为 $\phi 25 \mu\text{m}$ PTG 的结果;而 Al 为 $\phi 50 \mu\text{m}$ 的结果*。

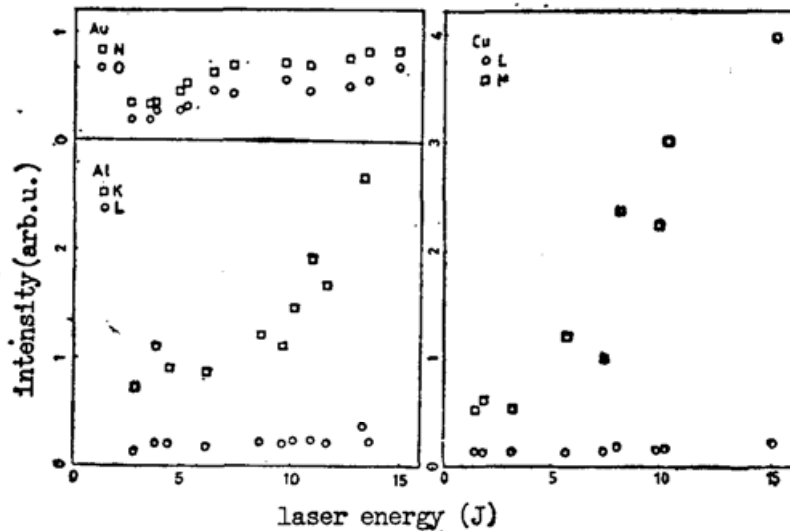


Fig. 3 Peak intensities of different spectral bands of gold, copper, and aluminum targets vs. incident laser energy

作者注意到 Al-K (Al^{11+} , 0.8 nm), Cu-L (1.1 nm) 峰值随激光能量近线性增长,而 Al-L (Al^{10+} , 5.2 nm), Cu-M (4.9 nm) 峰值没有明显的变化,相对强度也小很多。从壳层结构上看, Al^{11+} 离子是 K 壳层的第一个离化态,电离势 (2086 eV) 比 L 带最高离化态的电离势 (442 eV) 要高很多;故离化 Al^{10+} 离子而得到 Al^{11+} 离子容易,继续离化 Al^{11+} 离子则非常困难,使 Al^{11+} 在很宽的电子温度范围 (0.3~2 keV) 都有很高的丰度分布。于是,当激光强度达到一定值并继续提高时,其效果是提高了 Al^{11+} 离子丰度,使其 X 射线发射增强;而相应的 Al^{10+} 及更低的离化态由复合产生,故光谱发射 (Al^{10+} 2p—3d, 5.2 nm 为代表) 出现“饱和”,对激光能量依赖较弱。对铜也有类似的情况, Cu^{18+} 的电离势 (671 eV) 比 Cu^{19+} 离子电离势 (1697 eV) 小很多,造成 Cu^{19+} 离子与 Al^{11+} 离子相近的行为。

而 Al-K, Cu-L 强度随激光能量的近线性变化,也说明在该激光强度 ($\sim 10^{14} \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$) 内,这两个谱带对激光的转换效率基本不变,但 Al-K, Cu-M 的效率则随激光强度的提高反而下降。这与 Chaker 等人^[8]对铜的能量分区测量在 0.26 μm 激光条件下的结果是符合的。他们还发现,在强度为 $10^{12}\sim 10^{13} \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间时, Cu-L (0.75~2 keV) 谱带转换效率随激光强度的提高而提高,实际上是 Cu-L 壳层离子从无到有的过程。

但 Au-N, -O (1.9 nm, 4.8 nm) 谱带峰值的响应就大不相同。作者看到 Au-N, -O 峰强度相差不大,且都随激光能量提高而增长,在 高能区出现明显的饱和趋势。在低强度 ($10^{12} \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$) 的实验中曾发现,随激光能量的提高, Au-N 峰从 2.5 nm 向 1.9 nm 漂移^[9],说明

* 在理想针孔情况下,要除以 4。

在包含了很多离化级的 N 带中, 亚壳层的分化已经明显影响离化态分布和光谱发射。在 N 带的高离化态中, 电离势很高, 阻碍了离子的进一步离化; 而且, 激光强度高时, 使得临界面密度变陡, 温度太高, 影响对激光能量的经典吸收, 造成 N 带辐射峰的“饱和”趋势。同时由于激光等离子体温度密度分布不均匀, 而 N、O 带各自包含的许多离化态的同时存在, 很容易造成光学吸收匹配形成光学厚条件, 使 M、N 带的行为相接近。而 Al、Cu 等离子体中基本是单种离化态主导了一个谱带的发射, 这是高 Z 和中低 Z 元素等离子体的重要区别。这种高 Z 等离子体光学厚特性造成的近黑体光谱, 被强化用作 ICF 的间接驱动源^[3]。由于数据处理时没有考虑到光谱叠级及 N 带光谱的宽带特性, 这里的 O 带峰值可能偏高。

3. X 光辐射对 Z 的依赖关系

上面已经讨论过不同 Z 元素谱带发射对激光能量改变的不同响应。图 4 给出了一组 $Z=6-79$ 的元素在相近的功率密度下由 $\phi 25 \mu\text{m}$ 透射光栅光谱仪得到的光谱的黑度扫描迹。可见这些光谱由线辐射光谱谱带组成, 随 Z 的提高依次出现 K、L、M、N、O 谱带。由于所包含的离化态较少, K、L 谱带要比 M、N、O 带要窄; 图中 Se-M, Mo-N 和 Er-N 带都出现了亚壳层结构造成的分裂。Er 谱短波处的窄峰可能是某种低 Z 元素杂质峰。

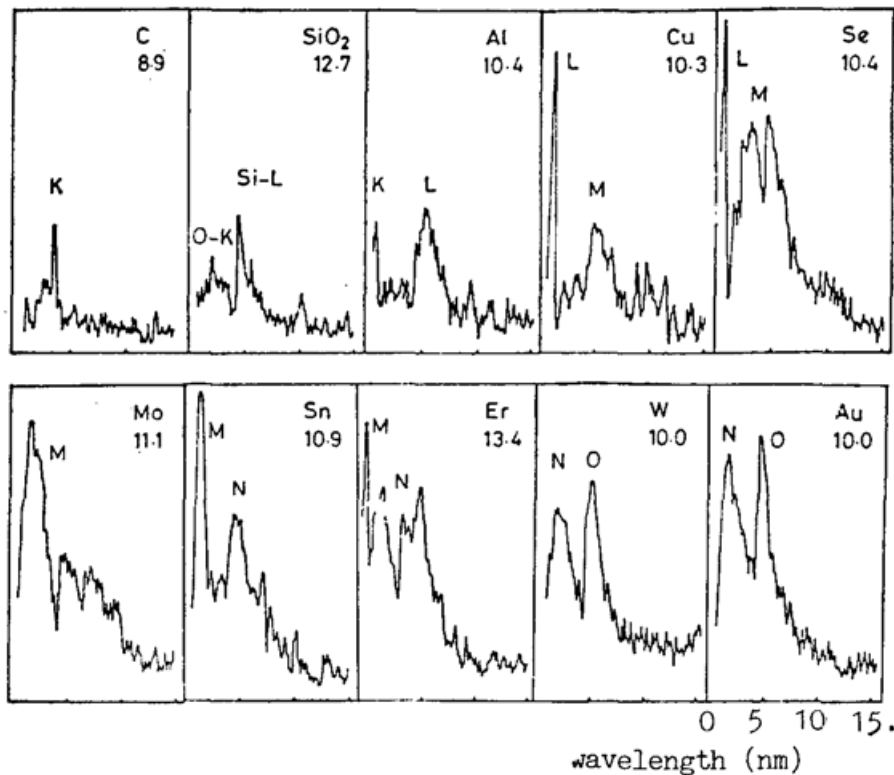


Fig. 4 Density traces of spectra from targets of various atomic numbers.
Laser energies are also given in joules

图 5 给出了各谱带峰值位置, 这些峰位置与 Z 有近线性关系, 与文献[17]的结果符合。

作者感兴趣的是各谱带 X 光发射转换效率随 Z 的变化, 由于缺乏能量绝对测量手段, 图 6 只给出了各谱带峰值的相对强度; 图中的强度都按 $E_L=10 \text{ J}$ 和 Er-O 带峰光子能量进行了归一, 对应的光子能量在 $0.2\sim 2 \text{ keV}$ 之间。图中各谱带强度随 Z 单调上升, 在 $Z=13, 30, 50$ 处, K、L、M 谱带分别达到最大, 增长很快; N、O 谱带的增长相对较慢, 因为谱带太宽。图中没有给出各谱带强度达到最大后又下降的过程, 因为这时其光子能量超出了透射

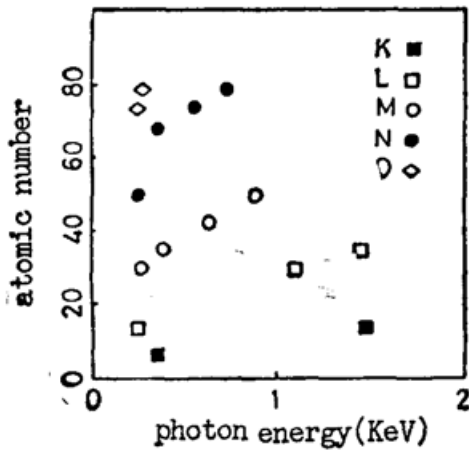


Fig. 5 Peak intensity position of variable spectral bands

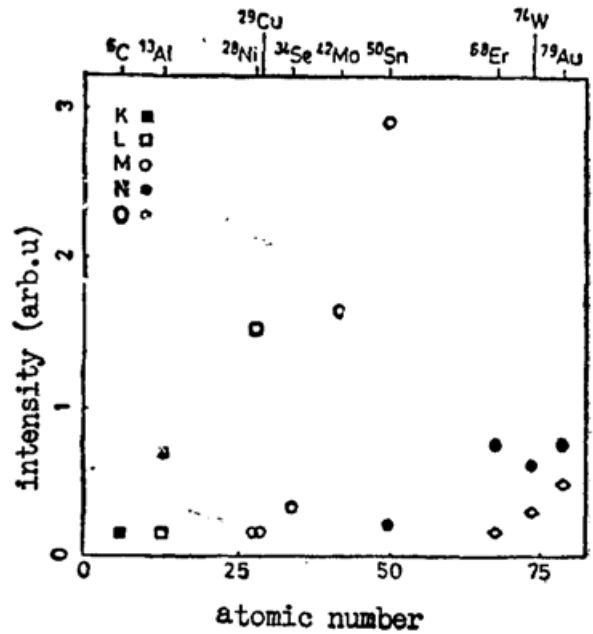


Fig. 6 Peak intensities of different spectral bands vs. atomic number

光栅光谱仪的摄谱范围。

从原子壳层结构来看,只有当壳层离化能与电子温度的匹配,即电子温度密度使壳层离化态维持时间长,丰度高时,才会形成该谱带辐射峰值。因此激光参数的改变,也会改变图 6 中所给出的强度分布。

人们也注意到了 X 光辐射效率随 Z 变化对应于 K、L、M、N 谱带有调制结构^[9~11],图 6 所给出的结构正是其体现。这样也就容易理解人们对效率~Z 依赖关系的实验结果并不完全一样^[9~11]的原因了。

4. 误差分析

由于激光焦斑的大小依赖于激光能量,而透射光栅光谱仪针孔直径与焦斑大小也很接近,这样文中所给的源半高全宽和峰值强度与实际值没有一致的对应。考虑实际中的两个极端情况,当源宽与针孔直径比值为 5 和 2 时,对同样的源峰值,像峰值比为 1.2,宽度比为 0.87。以大线度源为准,则有限针孔使小源峰值降低而源变宽。在涉及转换效率的讨论时,图 3 中的强度还应乘一面积因子,该因子随源大小而改变,对高低能谱带相差不远,基本上不影响讨论结果。

另一方面,有些谱带曝光过强致使弱曝光谱线近似不适用; Se-L 带在图 6 中没有给出正是这一原因。

图 3 Al 的结果是 φ50 μm 针孔透射光栅光谱仪,曝光很弱,主要误差是由于源线度的变化造成;而 Cu-L 的结果则还有胶片强曝光的影响。综合的结果是一种比线性稍快的增长。

作者感谢六路工作人员的精诚合作,并感谢张正泉研究员,范品忠副研究员的有益讨论。

参 考 文 献

- [1] D. J. Nagel *et al.*; *Electron. Lett.*, 1978, **14**, No. 8(Apr), 781.
 [2] B. Yaakobi *et al.*; *Appl. Phys., Lett.*, 1983, **43**, No. 14(Nov), 686.
 [3] S. Sakabe *et al.*; *Phys. Rev.*, 1988, **A38**, No. 11(Dec), 5756.
 [4] P. L. Hagelstein; *Plasma Phys.*, 1983, **25**, No. 10(Oct), 1345.
 [5] W. C. Mead *et al.*; *Phys. Fluids*, 1983, **26**, No. 8(Aug), 2316.
 [6] K. Eidmann, T. Kishimoto; *Appl. Phys. Lett.* 1986, **49**, No. 7(Aug), 377.
 [7] Yao-lin Li *et al.*; *Laser. Part. Beams*, 1991, 9, 待发表。
 [8] M. Chaker *et al.*; *Proc. SPIE*, 1986, **733**, 58.
 [9] T. Mochizuki *et al.*; *Phys. Rev.*, 1986, **A33**, No. 1(Jan), 525.
 [10] P. Alaterre *et al.*; *Phys. Rev.*, 1986, **A34**, No. 5(Nov), 4184.
 [11] R. Popil *et al.*; *Phys. Rev.*, 1987, **A35**, No. 3(Sept), 3874.
 [12] 徐至展等;《物理学报》, 1980, **29**, No. 3(Mar), 439.
 [13] M. H. Key *et al.*; *Phys. Fluids*, 1983, **26**, No. 7(Jul), 2011.
 [14] A. Pachtman *et al.*; *Association for Plasma Studies fo China report*, No. APS-88-006, 1988.
 [15] 梁向春等;《光学学报》, 1982, **2**, No. 2(Feb), 113.
 [16] 王晓方等;《物理学报》, 1990, **39**, No. 6(Jun), 922.
 [17] T. Mochizuki, C. Yamanaka; *Proc. SPIE*, 1986, **733**, 23.

Soft X-ray emission from 1.06 μm laser plasmas and its atomic number dependence

CHEN SHISHENG, LI YAOLIN, XU ZHIZHAN, A. PACTHMAN,
 WANG XIAOFANG, QIAN AIDI AND XIANG HUIZHU

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

(Received 22 January 1991; revised 31 May 1991)

Abstract

Characteristics of the soft X-ray emission from 1.06 μm laser produced plasma are studied in detail. The dependences of emission intensities of different spectral bands on laser energy are analysed, and the intensities of K, L, M, N, O bands are characterized by atomic numbers.

Key words: laser plasma, plasma spectroscopy, soft X-ray spectra.