

# 激光预脉冲对双层靶 LPX 辐射特性的影响

冯贤平 陆培祥 徐至展

(中国科学院上海光机所, 201800)

## Effect on LPX radiation characteristics with a laser prepulse irradiated binary-layer target

*Feng Xianping, Lu Peixiang, Xu Zhizhan*

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

**Abstract:** The effect on LPX radiation characteristics with a laser irradiating binary-layer (Au-Al) target is presented with or without a prepulse in this paper. It shows that abundant spectral lines of H-like aluminium ions and a variety of impurity spectral lines emitting from the inner layer of Al are observed with a high spectral resolution due to the narrow linewidths. While without prepulse and the thickness of the outer layer of Au coated more than 200nm, only gold spectral lines emitted from the outer layer of Au are observed.

**Key words:** laser prepulse, binary-layer target, X-ray

以激光产生的等离子体作为短波激光的激活介质,是目前实现X射线激光最有希望的方案之一<sup>[1]</sup>,早在1985年,美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)的D. L. Matthews等人首次观察到了硒等离子体介质中类氟离子的20.9 nm和20.6 nm跃迁的短波激光输出<sup>[2]</sup>,这给许多实验室X射线激光研究带来了新的生机。继后许多实验报道了他们利用各种机制所取得的结果,目前认为最有希望的泵浦机制是电子碰撞激发和碰撞复合,相应地它们对激光条件和靶的结构要求是不同的。为此,我们在文献[3]中已较系统地研究了激光与高、中和低 $Z$ 元素靶相互作用的辐射特性,在文献[4]中研究了激光产生的等离子体基本参数和分布特性,在文献[1]中研究了不同结构靶对短波域粒子数反转的影响。本文是在上述工作的基础上,进一步深入地研究有预脉冲条件下的激光与双层靶相互作用的性质,以期找出不同形式的激光、不同结构的靶对等离子体的影响,为实现X射线激光提供必要的基础研究。

实验是在上海光机所六路大功率钕玻璃激光器上进行的,10 J能量脉宽为100 ps的大功率激光聚焦在靶上,靶是双层平面靶,其基本结构是外层是金,内层是铝并以玻璃作为基板,外层金的厚度分别是1  $\mu\text{m}$ 、200 nm、100 nm和50 nm。实验中利用了激光预脉冲,即在主脉冲之前5 ns加一占主脉冲2%能量的预脉冲。另外为了避免空气对LPX光吸收作用,测量都是在气压为 $10^{-2}$  Torr的靶室内进行,LPX光谱是用一台具有空间积分和分辨的TIAP晶体谱仪拍摄的,用事先标定过的医用5 F型X光底片作为记录胶片,X光晶体谱仪暗盒前覆盖二层厚为50 nm的Formvar膜,每层上均镀200 nm的铝膜以防止可见光曝光。

图 1(a)和图 1(b)分别给出了激光以有预脉冲和无预脉冲形式辐照金铝双层靶(其中金厚

$1\ \mu\text{m}$ , 铝厚  $1\ \mu\text{m}$ )后所得到的激光等离子体 X 射线 (LPX) 光谱的黑度扫描曲线图。在图上我们已对整个光谱线进行了辨认。

比较图 1(a)和图 1(b), 可以明显地看出它们在光谱结构上的差别。在图 1(a)上, 由于激光预脉冲的作用, 等离子体不但发射较强的靶表层金的 LPX 射线, 而且也使内层铝等离子体发射出相当丰富的类氢、类氦离子的 X 射线以及各种杂质离子的 LPX。在图 1(b)中, 由于无激光预脉冲作用, 所以 LPX 光谱中几乎没有铝 LPX 的贡献, 这个结果表明, 利用本实验条件下的激光直接辐照  $1\ \mu\text{m}$  的金箔时, 不可能在激光脉宽时间域内将金靶打穿, 同时也说明上述条件产生的等离子体无法通过热传导作用使内层铝元素产生高阶离子和发射强的 X 射线, 而在有预脉冲条件下, 整个激光加热物质的机制就发生变化, 在预脉冲作用下, 激光首先在靶表层产生较为稀薄的金等离子体, 然后在主脉冲通过表层

时, 部分被外层金等离子体吸收, 部分继续深入内部辐照铝箔, 使其产生铝的 LPX 射线, 另外激光到达铝层部分被反射回来的能量又再次被外层金等离子体吸收, 显然利用预脉冲法激光转换成 LPX 的效率要比激光直接辐照时要高许多。从上面的分析中我们可以预见, 若利用 X 射线条纹相机测 X 射线发射的时间特性, 等离子体发射的 LPX 可能会出现双峰结构, 这是因为金层被二次加热的缘故。

在激光打靶实验和光谱分析中, 还发现激光预脉冲辐照金铝双层靶产生的铝的 LPX 线谱分辨率明显高于激光直接辐照铝平面靶产生的 LPX 发射谱, 我们认为上述现象主要是由于等离子体源加宽对线谱的不同影响所致。在双层靶实验中, 激光加热内层铝箔的能量不大(但能将铝电离到类氢、类氦离子), 在激光预热后所形成的铝等离子体的外膨胀时受到外层金等离子体的制约作用, 根据能量守恒定律, 由于金等离子体质量较大, 所以外膨胀的速度较慢<sup>[3]</sup>, 相应地铝等离子体源在一定时间域内不会太大, 因而源加宽对铝 LPX 线谱的影响不大; 另外经主脉冲激光加热的高温铝等离子体, 在膨胀运动到一定距离时, 将因预脉冲形成的先行的低温高  $Z$  金等离子体的渗杂或碰撞等过程而可能增快冷却, 同时还可能减缓粒子密度的下降, 这对于三体复合是极为有利的, 是提高 X 射线激光增益的一种可行方案<sup>[5]</sup>。而在激光直接辐照铝平面靶时所产生的等离子体因不受外界制约而以自由膨胀方式直接向外喷射,

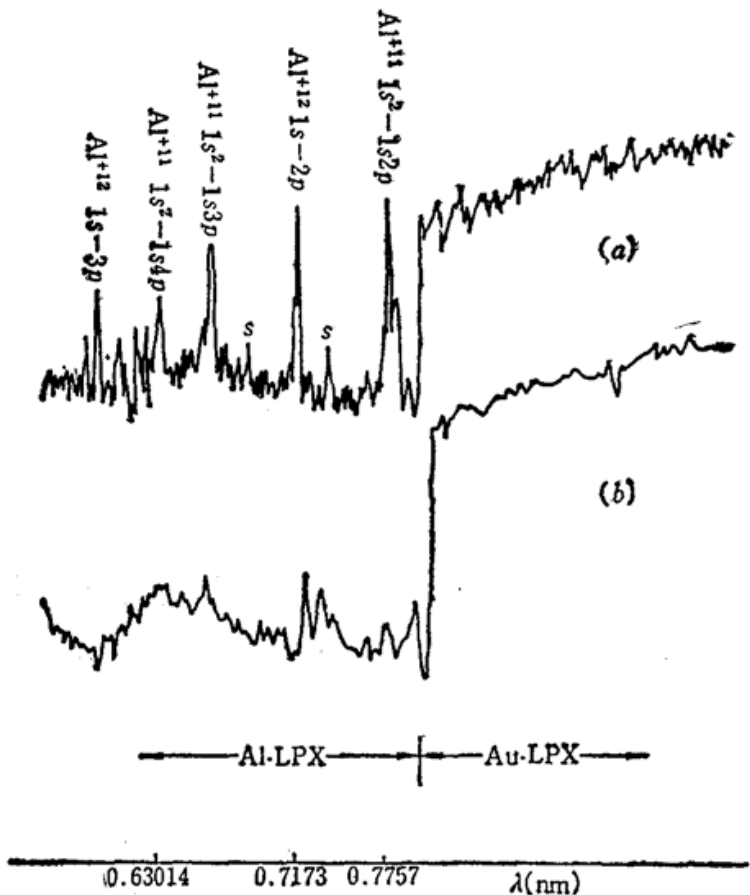


Fig. 1 LPX spectral microdensitometer traces of plasmas produced by laser irradiated binary-layer target

(a) with a laser prepulse;

(b) without a laser prepulse

因此X射线源加宽较大,相应谱分辨率也差一些,X光针孔相机照像已直接证明了这一现象。

本实验中,还利用本装置激光分别对表层金厚为50 nm、100 nm和200 nm的金铝双层靶进行了分析和侧量,结果表明无预脉冲条件下激光直接辐照表面金厚为50 nm和100 nm的金铝双层靶时,我们能够从等离子体中直接获得铝的LPX射线谱,在靶外表层金厚超过200 nm厚度时,一般就很难再得到铝的LPX发射谱;实验结果还表明激光脉冲或激光的时间特性好坏对靶内层铝LPX发射的影响也很大,当激光脉宽超过300 ps或更宽时,从激光辐照表层厚为200 nm的金铝双层靶所得谱中可发现有铝的LPX发射,根据前面分析的有预脉冲激光与物质相互作用原理以及等离子体膨胀特点很容易理解这个现象。

下面用膨胀的等离子体来估算激光烧融靶的深度。考虑等离子体密度轮廓是指数型的,则激光烧融靶的深度为

$$d = \int_0^{L_0} n_c e^{-x/L_0} dx / n_0,$$

式中定标长度  $L_0 = C_s \Delta\tau$ , 由功率密度估算所得电子温度为1 keV<sup>[6]</sup>, 由此计算得到金的离子声速为  $1.1 \times 10^7$  cm/s<sup>[6]</sup>。  $n_c, n_0$  分别为金的等离子体临界密度和金的固体密度, 它们分别为  $9.8 \times 10^{20}$  /cm<sup>3</sup><sup>[6]</sup> 和  $5.9 \times 10^{22}$  /cm<sup>3</sup>。  $\Delta\tau$  为定标时间。

由上述激光烧融深度公式可以得到,当激光脉宽为100 ps时,烧融金靶的深度为115 nm,所以当金层厚大于200 nm,就不能穿透金层而得到铝的谱线;而当用间隔为5 ns的预脉冲打靶时,定标时间  $\Delta\tau$  增大,烧融深度达5.9  $\mu$ m,这足以穿透1  $\mu$ m的金层而获得较强的铝的谱线。上述理论估算与实验结果符合很好,从中我们发现激光烧融靶的深度主要取决于定标时间。最后指出一点,在有关实验中,金厚为100 nm时得不到铝的谱线,而在本实验中观察到Al的谱线,我们认为这可能由于脉冲前沿不够理想或脉宽偏差所致。根据上述理论计算,当脉宽100 ps时,烧融金的深度约115 nm,这对于100 nm的金层来说正处于临界状态,脉冲宽度值的偏差就有可能导致两种不同的结果。

### 参 考 文 献

- 1 冯贤平,物理学进展,8 (3), 311 (1988)
- 2 D. L. Mathews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 54, 110 (1985)
- 3 冯贤平 *et al.*, 量子电子学, 5 (4), 332 (1988)
- 4 冯贤平 *et al.*, 物理学报, 37 (7), 1183 (1988)
- 5 徐至展 *et al.*, 中国科学, A 辑, 2, 178 (1983)
- 6 C. E. Max, *Interaction Laser-Plasma*, edited by R. Balian and J. C. Adam, eds., North-Holland Publishing Company, 1982, 304~307

(收稿日期:1989年7月6日)