

# 小型激光等离子体软 X 射线源 辐射特性研究

郭玉彬 李福田

(中国科学院长春光机所 应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

**提要** 研制了一种高重复频率小型激光等离子体软 X 射线源, 其发射重复性涨落优于  $\pm 4.5\%$ 。采用光谱学诊断方法系统研究了光源的软 X 射线辐射特性。

**关键词** 软 X 射线, 激光, 等离子体, 辐射

## 1 引 言

使用高重复频率小型激光器建立的激光等离子体软 X 射线源在软 X 射线光谱辐射计量、亚微米投影光刻、微机械零件三维刻蚀加工、软 X 射线活体细胞显微术、薄膜光学常数研究、软 X 射线多层膜元件性能评价及软 X 射线吸收光谱学等研究及技术领域具有广泛的应用价值。与通常的激光等离子体源相比, 它体积小、造价低、结构紧凑、使用方便, 是一种向实用化发展、有前途的软 X 射线源。国外对此进行过不少专门的研究<sup>[1~4]</sup>。我们使用国产 800 mJ Nd:YAG 激光器作为激励源, 研制了高重复频率激光等离子体源<sup>[5]</sup>, 采用光谱学诊断方法系统研究了激光等离子体软 X 射线区辐射特性。

## 2 实 验

激光等离子体源软 X 射线辐射测量实验装置如图 1 所示, 主要由脉冲激光器、聚焦镜、靶室、软 X 射线恒偏角单色仪、光电探测系统和真空系统组成。

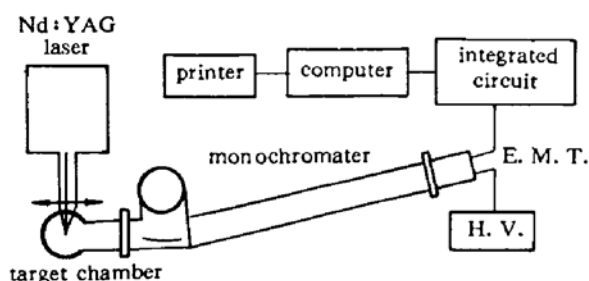


Fig. 1 Experimental setup for a compact laser-produced plasma

调 Q 的 Nd:YAG 激光器单脉冲能量为 800 mJ, 脉冲宽度为 8 ns, 激光束发散角为 0.58 mrad, 脉冲重复频率为 1~10 Hz。采用焦距为 100 mm 的非球面透镜可将输出的  $1.06 \mu\text{m}$  激光束经靶室的绝热玻璃窗聚焦到靶面上。考虑到靶材应有较高的软 X 光发射效率和耐熔性, 我们选用了圆柱状合金铝 (Al)、铁 (Fe)、黄铜 (Cu) 和钨 (W) 作为本实验用靶。当激光器以一定的入射角

打靶时,用步进电机驱动靶绕圆柱轴均匀旋转同时沿轴向移动。可编程控制器对步进电机的步长、步频作实时控制,以保证每束激光脉冲均打到一个新鲜靶面上。

等离子体辐射经掠入射型软 X 射线恒偏角( $166^\circ$ )单色仪分光后,由无窗的电子倍增管(EMT)接收,其光电信号通过预放、积分,最后经 A/D 变换进入计算机中进行存储、显示和打印。其中恒偏角单色仪的波长范围为  $5\sim 40\text{ nm}$ ,光谱分辨率为  $0.2\text{ nm}$ ,波长精度、波长重复性优于  $\pm 0.05\text{ nm}$ 。在测试过程中,单色仪入缝、出缝宽度均为  $0.2\text{ mm}$ ,靶室和测试系统真空度保持在  $1.33\times 10^{-3}\text{ Pa}$  左右。

为防止激光打靶所产生的溅射粒子污染单色仪光栅及杂散光影响测量结果的准确性,在单色仪出缝处设置双光阑可起到准直、消杂光作用。此外,在入缝前加装铝滤光片以消除高级次衍射光和背景光干扰。

### 3 结果及讨论

#### 3.1 等离子体光点尺寸

时间积分的软 X 射线针孔照像被用来确定热等离子体的形状和空间位置。直径  $50\text{ }\mu\text{m}$  针孔前加装一块  $0.8\text{ }\mu\text{m}$  厚的聚丙烯膜,膜上镀厚  $40\text{ nm}$  的铝以滤除可见光等长波辐射。针孔相机被封入真空室内。图 2 所示的针孔照片清晰地显示了铜等离子体的位置,可测得等离子体亮点尺寸约为  $150\text{ }\mu\text{m}$ 。而等离子体位置明显的横向系统位移是由于连续 15 个激光脉冲打到同一靶点上至使靶坑损蚀严重所造成的。由于衍射和几何效应的影响,估计实际等离子体光点尺寸应略小于  $150\text{ }\mu\text{m}$ 。



Fig. 2 Pinhole picture of a laser-produced plasma

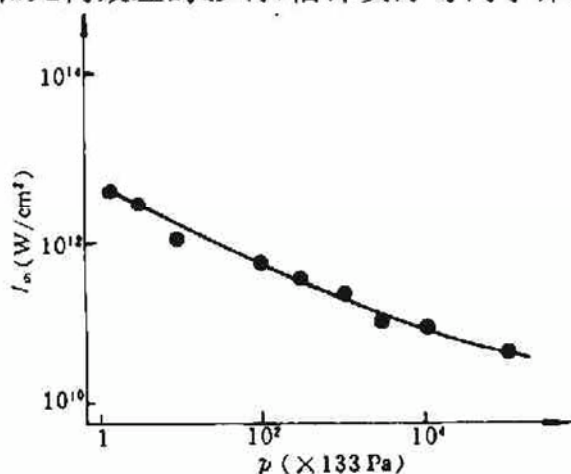


Fig. 3  $I_m$  against  $p$  breakdown curves for  $\text{N}_2$  using single  $\sim 1.06\text{ }\mu\text{m}$  laser pulses

根据气体放电理论<sup>[6]</sup>,当脉冲激光束聚焦到高压氮气区域中时,由于氮原子中多光子电离过程的作用,将会导致氮气体发生聚爆击穿。Ireland 对此进行过专门的实验研究<sup>[7]</sup>,并给出了使氮气击穿的激光功率密度阈值  $I_m$  与氮气体压力  $p$  所存在的确定的关系曲线(如图 3 所示),由此得到如下测定等离子体光点尺寸的方法。

先用高压纯氮气瓶向真空靶室内注入氮气,使之形成具有高于大气压的纯氮气区,然后用聚焦镜将单脉冲能量  $200\text{ mJ}$  调 Q 的 Nd:YAG 激光束导入靶室,逐渐增大气压,即可测出发生氮气击穿的气压阈值。对照图 3 所示曲线,可知使氮气击穿的激光功率密度阈值为  $2 \times 10^{11}\text{ W}/\text{cm}^2$ 。故可推算出等离子体光点尺寸

$$D = (4E/\pi I_m t)^{1/2} \approx 130\text{ }\mu\text{m} \quad (1)$$

其中  $E$  为单脉冲激光能量,  $t$  为脉冲时间宽度。考虑到激光光点形状的稳定性和聚焦过程等人为因素的影响, 实际等离子体光点尺寸要略大于  $130 \mu\text{m}$ 。

用显微电镜观察激光打靶所形成的靶面凹痕, 其横向形状是一直径为  $140 \mu\text{m}$  左右的圆斑, 故可证实该等离子体最小焦斑尺寸为  $140 \mu\text{m}$  左右。另外, 针孔相机的观测也验证了这一结果。由此可得到激光靶面的平均功率密度为  $6.5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 。

### 3.2 等离子体的发射光谱

实验中采用了外径  $19 \text{ mm}$ 、长  $25 \text{ mm}$  的激光靶, 在点聚焦激光辐照条件下, 得到了铝、铁、铜、钨等离子体发射的软 X 射线相对辐射强度分布曲线, 如图 4 所示。可见在  $6.5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  激光功率密度下, 等离子体软 X 射线辐射强度随着原子序数的增大而增强。尽管辐射主要集中于  $8 \sim 40 \text{ nm}$  光谱区, 但光谱曲线的峰值位置将随着原子序数的不同而改变。如轻金属元素铝的发射光谱以分立的线谱为主; 铁、铜的发射光谱是迭加有少数特征谱线的连续谱, 其峰值波长分别位于  $20 \text{ nm}$  和  $17 \text{ nm}$  附近。沿长波方向随波长的增加而缓慢衰减, 并出现阶段性跳跃, 这正是韧致辐射和复合辐射的结果; 而钨等离子体发射光谱是几乎不含谱线的较强连续谱。结果表明, 铜、钨等元素的软 X 射线发射主要集中在某一谱带中, 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高亮度脉冲等离子体软 X 射线单色源和 XUV 激光泵浦源的技术途径。这与 Carroll 等人<sup>[8~10]</sup>在  $\sim 10^{11} \text{ W/cm}^2$  功率密度的激光等离子体源上得到的结果相符合。

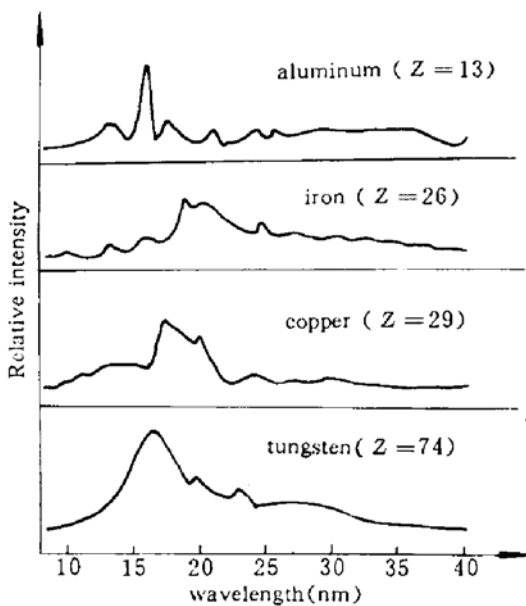


Fig. 4 Spectra of various target materials. The intensity scales are the same for all spectra

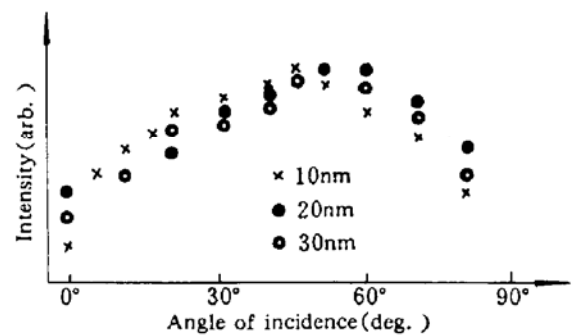


Fig. 5 Variation of the intensity (integrated over one pulse) of soft X-ray radiation from Cu against the angle of incidence of the laser beam. Intensities are normalized for each wavelength at  $45^\circ$

### 3.3 等离子体辐射的角分布特性

图 5 给出了铜等离子体分别在  $10 \text{ nm}$ 、 $20 \text{ nm}$  和  $30 \text{ nm}$  波长处辐射强度随激光束入射角的变化曲线(激光束入射角以正入射靶面时为  $0^\circ$  基准)。表明辐射强度随入射角的增大而相对增强, 在接近  $45^\circ$  时, 有较平坦的峰值分布, 而后逐渐下降。取三个波长值的发射强度在入射角  $45^\circ$  时归一化, 在接近正入射时, 其辐射强度的变化最大。这说明由于靶坑边缘对等离子体的吸留作用导致低电离态辐射增加而连续谱辐射减弱。

### 3.4 靶材料耐蚀性能

图 6 给出了铝、铁和铜靶表面经 1 Hz 和 10 Hz 脉冲激光束照射后凹陷坑的扫描电镜 (SEM) 显微照片。对于易损蚀的较软金属铝, 激光束对其表面灼蚀最为严重, 形成较深的凹陷坑; 铁靶的灼蚀情况较铝轻; 而黄铜靶由于其耐蚀性较强, 表面硬度较高, 故损蚀情况较前二者为轻。此外, 由比较可知, 靶表面凹陷坑的外形尺寸和深度随着激光脉冲重复频率和单脉冲能量的提高而增大, 且溅射物也随之增加。

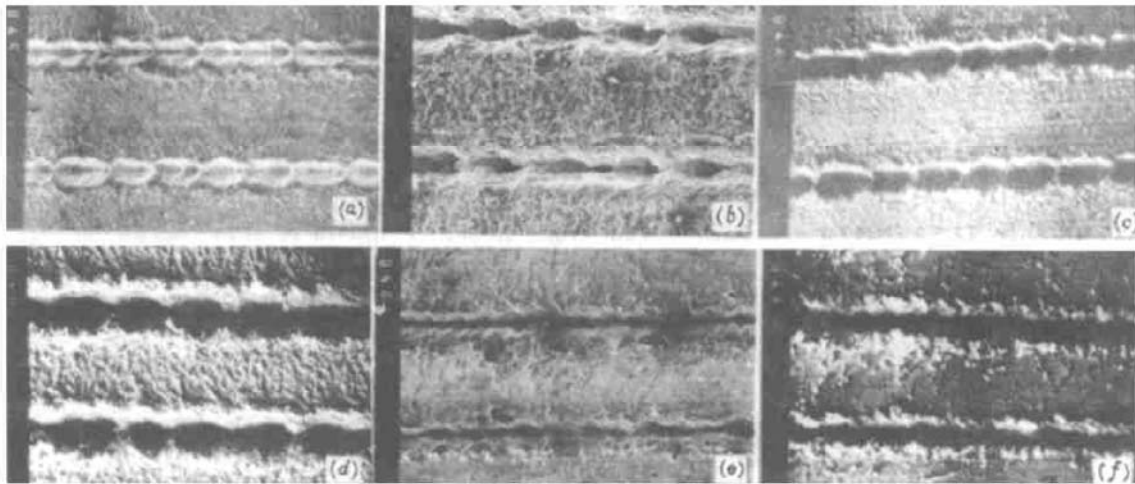


Fig. 6 SEM photos showing damage craters in various targets produced at 1 Hz and 10 Hz pulse repetition rates respectively

(a) Al, 1 Hz; (b) Al, 10 Hz; (c) Fe, 1 Hz; (d) Fe, 10 Hz; (e) Cu, 1 Hz; (f) Cu, 10 Hz

### 3.5 光源的重复性和稳定性

影响高重复频率激光等离子体源重复性、稳定性的因素主要有 (1) 脉冲激光波形、能量的稳定性和重复性; (2) 光电探测系统积分放大电路的稳定性; (3) 靶的旋转精度。为此, 采用下述方法来综合评价该光源的稳定性和重复性。

从波长扫描起点开始, 在每一典型波长处对光源连续 15 次发射的输出光强进行顺次测量, 取其平均值作为一组平均光强。而后反方向对上述波长处的输出光强度进行重复测量。对于每一典型波长, 随机地从连续得到的若干组平均光强中顺序抽取 5 组, 用取样标准偏差除以这 5 组平均光强的平均值, 可得到高重复频率激光等离子体源发射强度的重复性。统计结果表明, 激光等离子体源 X 光发射的重复性优于  $\pm 4.5\%$ , 且不依赖于所选取的波长。这一结果与 Kühn<sup>[11]</sup> 的测试结果一致。

采用相同的方法, 使激光器以 10 Hz 重复频率连续发射 5000 次, 重复前述的测量, 得到光源的稳定性亦优于  $\pm 4.5\%$ 。

**致谢** 感谢中国科学院长春物理所姜锦绣同志在 SEM 测试工作中给予的帮助。

### 参 考 文 献

- 1 H. C. Gerritsen, H. Van Brug, F. Bijkerk *et al.*. Laser-generated plasma as soft X-ray source. *J. Appl. Phys.*, 1986, 59(7): 2337~2344

- 2 Tim. P. Tooman. The Sandia laser plasma extreme ultraviolet and soft X-ray (XUV) light source. *SPIE*, **664** : 186~191
- 3 Michael, Kühne, Hans-christian, Petzold. Soft X-ray radiation from laser-produced plasma; characterization of radiation emission and its use in X-ray lithography. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(18) : 3926~3932
- 4 F. O' Neill, G. M. Gower, I. C. E. Turcu *et al.*. Plasma X-ray sources for lithography generated by a 0.5 J KrF laser. *SPIE*, 1987, **831** : 230~236
- 5 郭玉彬, 李福田, 唐九华 等. 激光等离子体软 X 射线接近式光刻术初步研究. *光学学报*, 1995, **15**(3) : 313~319
- 6 杨津基. 气体放电, 第 1 版. 北京: 科学出版社, 1983. 292
- 7 C. L. M. Ireland. Gas breakdown by single, ~40 ps—50 ns, 1.06  $\mu\text{m}$  laser pulses. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1974, **7**(1) : 168~171
- 8 P. K. Carroll, E. T. Kennedy, G. O. Sullivan. Laser-produced continua for absorption spectroscopy in the VUV and XUV. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(9) : 1454~1462
- 9 David J. Nagel, Charles M. Brown, M. C. Peckerar *et al.*. Repetitively pulsed-plasma soft X-ray source. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(9) : 1428~1433
- 10 P. Gohil, Victor Kanfman, Thomas J. Mellrath. High-resolution spectra of laser plasma light sources in the grazing incidence region. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(13) : 2039~2040
- 11 M. Kühne. Radiometric comparison of a laser-produced plasma and a BRV-source plasma at normal incidence. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(12) : 2124~2128

## Investigation of Soft X-ray Radiation from a Compact-laser-produced Plasma

Guo Yubin Li Futian

(State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Academia Sinica, Changchun 130022)

**Abstract** A compact-laser produced plasma soft X-ray source with pulse repetition rates up to 10 Hz is developed. Its reproducibility and stability are found to be better than  $\pm 4.5\%$ . Using a spectral diagnostic method, the soft X-ray radiation characteristics are investigated.

**Key words** soft X-ray, laser, plasma, radiation