

# 激光等离子体软 X 射线光源的一种诊断方法

尼启良, 陈波, 巩岩, 曹健林

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所  
应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 激光等离子体软 X 射线光源是脉冲式光源, 对这类光源的光谱诊断有几种方法。文章介绍了一种新的、实用的测量激光等离子体软 X 射线光源光谱的方法。此方法以低噪声的通道电子倍增器探测来自光源的 ns 量级的脉冲光信号, 并由低噪声、响应快的电荷灵敏前置放大器进一步将其放大, 前放的输出电荷与输入的脉冲信号的峰值成正比。使用这种方法测量了铜靶激光等离子体光源和氧、氦气体靶激光等离子体软 X 射线源在 8~30nm 波段的光谱。

**关键词:** 激光等离子体; 软 X 射线诊断; 气体靶; 软 X 射线光源

**中图分类号:** O433.4 **文献标识码:** A

## 1 引言

激光等离子体软 X 射线光源是以高功率激光脉冲(功率密度大于  $10^{10} \text{W/cm}^2$ ) 照射物质表面产生高温、高密度激光等离子体, 并由等离子体辐射出一到几十 nm 的软 X 射线的小型高亮度光源。根据靶材(被照射物质)的不同, 它可分为金属靶软 X 射线源和无碎屑软 X 射线光源。前者在等离子体产生的同时也产生碎屑, 并且碎屑会损坏光源附近的光学元件; 后者以非金属(液体<sup>[1-5]</sup>、气体<sup>[6-9]</sup>) 为靶材, 避免了碎屑的产生, 是未来软 X 射线光刻和软 X 射线显微成像的首选光源。激光等离子体软 X 射线光源所用激光器的脉冲宽度可以是 ns、ps 甚至于 fs 量级, 因此, 激光等离子体软 X 射线源产生的光信号是极快的脉冲信号。对于使用脉冲宽度为 ps 甚至于 fs 量级的激光器的激光等离子体软 X 射线光源, 其光谱的探测通常使用价格昂贵的背照射 X 射线 CCD。但是激光等离子体软 X 射线光源最常用的激光器的脉冲宽度约为几个 ns。对于使用脉冲宽度为几个 ns 的激光器的激光等离子体软 X 射线光源, 它产生脉冲宽度是几个 ns 的光脉冲。本文讨论的是这类光脉冲的探测问题。在软 X 射线波段, 通道电子倍增器(CEM) 是最灵敏的探

测器之一。本文使用的探测器是美国 Burle Industrise 公司制造的最新型通道电子倍增器 5900 Magnum。

## 2 脉冲光源的探测方法

由于激光等离子体软 X 射线光源通常是以脉冲宽度为几个 ns 的激光器作为激励源, 产生几个 ns 脉冲宽度的光脉冲, 因此, 它经过响应时间足够短的探测器后将变成几个 ns 脉冲宽度的电脉冲。5900 Magnum 型通道电子倍增器有足够短的响应时间能探测到脉宽为几个 ns 的脉冲信号。此外, 对于 ns 量级的脉冲信号进行光子计数显然是困难的, 测量它的脉冲高度是一种比较好的方法, 也就是说, 这是对光脉冲所产生的电脉冲信号的模拟量的测量。这要求通道电子倍增器亦工作在模拟模式。通道电子倍增器既可以工作在模拟模式又可以工作在脉冲计数模式, 这取决于通道电子倍增器所加高压的大小。对于 5900 Magnum, 工作在模拟模式通常要求其增益小于  $10^6$ ; 而工作在脉冲计数模式则要求其增益大于  $10^6$ 。图 1 是 5900 Magnum 的增益与它两端所加电压的关系。

激光等离子体软 X 射线光源产生的光脉冲经 5900Magnum 的输出则变成电脉冲信号。对

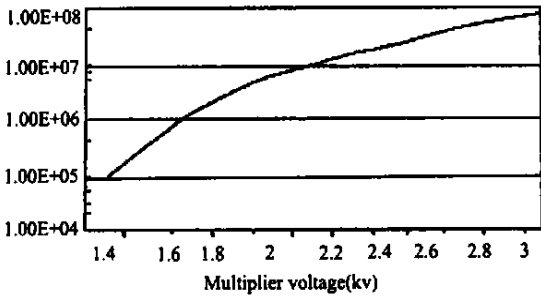


图 1 5900 Magnum 增益与电压的关系

Fig. 1 Gain vs voltage.

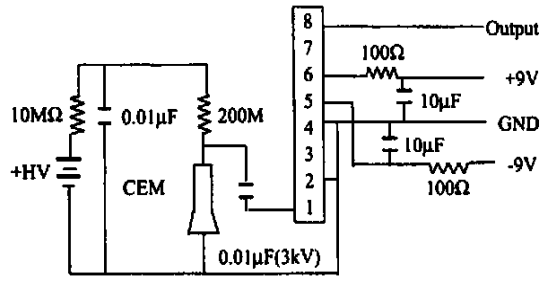


图 3 交流耦合电路

Fig. 3 AC- coupled circuit.

于脉冲信号的放大, 电荷灵敏前置放大器是最合适的前放之一, 它的输出与探测器输入的电荷成正比, 并且它经常被用作响应时间比其上升时间更快的探测器的前置放大器。基于上述原因, Cremat 公司的 CR- 101D 型模拟电荷灵敏前置放大器是最符合条件的前放之一。不仅在于它有较快的上升时间(13ns) 而且噪声很小价格也很低。CR- 101D 有八脚, 1 脚是输入端, 2 脚和 4 脚为地, 3 脚测试输入端, 5、6 脚为电源输入端, 7 脚不用, 8 脚输出端。5900 Magnum 有三个接线端: 一个接地, 一个接高压, 另一个是阳极, 阳极与高压是绝缘的。如果探测器的前一端接负高压, 则后一端必须接地。因此, 它可以和 CR- 101D 直接耦合, 如图 2 所示。由于 5900 Magnum 在加 3000V 高压时它产生的暗电流仅是  $3.8 \times 10^{-13}$  A, 且随其两端所加电压的降低暗电流减小, 所以直接耦合电路的噪声很小只有 1mV。如果使用有两接线端的通道电子倍增器就只能采取交流耦合方式, 如图 3 所示。一个 200MΩ 的负载电阻被用于减小噪声。实验表明这种耦合方式的电路的噪声主要取决于探测器的电容、暗电流及上面提到的负载电阻。

图 4 是使用直接耦合电路测得的铜靶激光等离子体软 X 射线光源在 13nm 处产生的光脉冲。所用的是 100MHz 存储数字示波器。

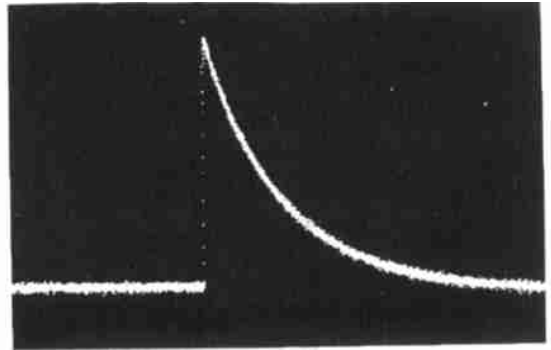


图 4 13nm 波长铜等离子体产生的脉冲信号

Fig. 4 Pulsed signal from Cu plasma at 13nm.

### 3 光谱测量装置

图 5 是喷气靶激光等离子体软 X 射线光源光谱测量装置。一个调 Q 的 Nd: YAG 激光器 (Continuum 9000) 被用于产生等离子体, 它的最大工作频率是 10Hz, 工作波长 1.06μm, 脉冲宽度是 8ns, 每个脉冲能量是 1J。用一个电压信号发生器来同步触发 Nd: YAG 激光器和喷气阀使激光束聚焦在喷出的脉冲气体上, 适当地调节电压信号发生器上触发激光器调 Q 的信号及触发喷气阀的信号之间的延迟能使激光束聚焦在脉冲气体的峰值处。聚焦镜是一焦距为 100mm 的非球面透镜, 焦点位于喷嘴下 1mm 处。焦点处功率密度约为  $5 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$ 。由于 Nd: YAG 激光器的最大工作频率是 10Hz, 电压信号发生器的最大工作频率也只能是 10Hz。除此之外, 电压信号发生器也能单次手动控制同步触发激光器和喷气阀。

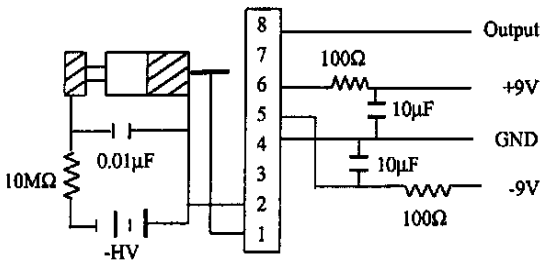


图 2 直流耦合电路

Fig. 2 DC- coupled circuit.

使用一掠入射单色仪测量气体靶光谱, 单色仪由两块球面聚焦镜和一 600l/mm 球面掠入射光栅组成。为了消除可见光, 用一厚度约 200nm 的铝滤光片放置在 5900 Magnum 前面。如果用金属靶代替喷气靶则可以测量金属靶激光等离子体软 X 射线光源的光谱。

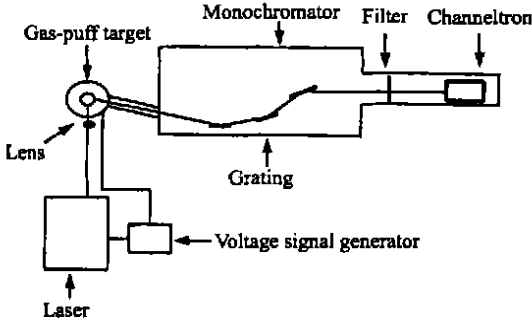


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental arrangement.

### 4 实验结果

图 6 是铜靶的光谱, 为连续光谱。激光器单次脉冲的能量 0.1J, 焦斑直径 100 $\mu$ m, 脉冲宽度 8ns, 靶面功率密度为  $1.6 \times 10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>。对于每一波长测量五次相对强度并取其平均值作为这一波长的相对强度。图 7 和图 8 是在相同的条件下

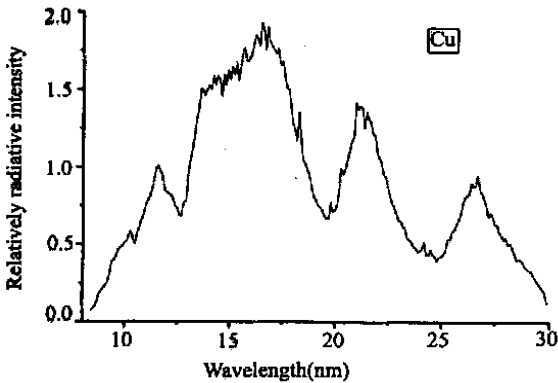


图 6 铜等离子体辐射光谱(脉冲能量 0.1J)

Fig. 6 Emission spectrum from Cu plasma produced by 0.1J.

测量到的 O<sub>2</sub> 和 Kr 气体靶的光谱。测量时使用电压信号发生器单次同步触发激光器和喷气阀, 对于每一波长也是测量五次相对强度并取其平均值作为这一波长的相对强度。喷气阀内背景气压为 10 个大气压。O<sub>2</sub> 气体靶光谱包括类锂氧离子跃迁形成的线谱。类锂氧离子跃迁形成的线谱是 OVI2p-5d(11.661nm)、OVI2p-4d(13.014nm)、OVI2s-3p(15.024nm) 和 OVI2p-3d(17.346nm)。Kr 气体靶光谱包括类铜离子、类镍离子、类钴离子和类铁离子跃迁形成的线谱和连续谱, 在 10nm 附近可以观察到强烈的软 X 射线辐射。

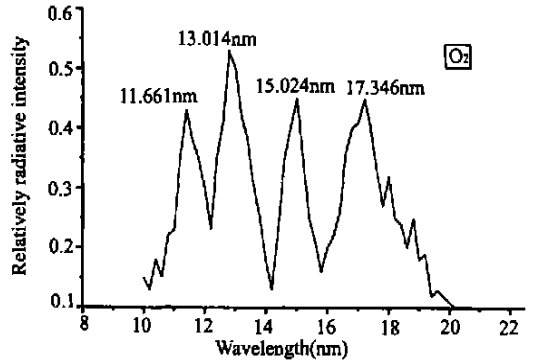


图 7 氧等离子体辐射光谱(脉冲能量 1J)

Fig. 7 Emission spectrum from O<sub>2</sub> plasma produced by 1J.

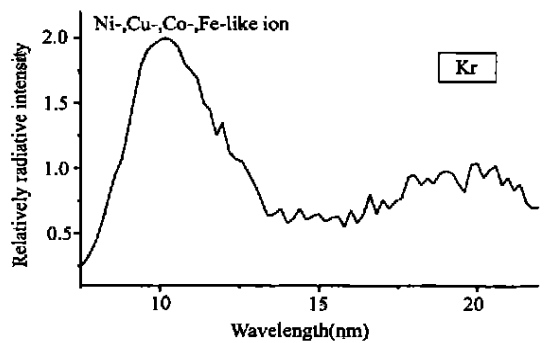


图 8 氪等离子体辐射光谱(脉冲能量 1J)

Fig. 8 Emission spectrum from Kr plasma produced by 1J.

## 参考文献:

- [ 1] Malmqvist L, Rymell L, Berglund M, *et al* . Liquid- jet target for laser- plasma soft x- ray generation[ J]. *Rev. Sci. Instrum* , 1996, 67( 12) : 4150- 4153.
- [ 2] Herts H M, Rymell L, Berglund M, *et al* . Debris- free soft x- ray generation using a liquid droplet laser- plasma target [ J]. *SPIE* , 1996, 2523: 88- 93.
- [ 3] Rymell L, Herts H M. Droplet target for low- debris laser- plasma soft X- ray generation[ J]. *Optics Communication* , 1993, 103: 105- 110.
- [ 4] Berglund M, Rymell L, Herts H M. Ultraviolet prepulse for enhanced x- ray emission and brightness from droplet- target laser plasma[ J]. *Appl. Phys. Lett*, 1996, 69( 12). 1683- 1685.
- [ 5] Rymell L, Herts H M. Debris elimination in a droplet- target laser- plasma soft x- ray source[ J]. *Rev. Sci. Instrum*, 1995, 66( 10): 4916- 4920.
- [ 6] Miura E, Honda H, Katsura K. *et al* . X- ray emission clusters excited by ultrashort laser pulses[ J]. *SPIE* , 2000, 3886: 320- 330.
- [ 7] Bartnik A, Dyakin M V, Anatoly Y F, *et al* . High- resolution x- ray spectroscopy of multicharged argon and krypton ion using a laser- produced x- ray source with a gas puff target[ J]. *SPIE* , 1997, 3157: 184- 193.
- [ 8] Henryk F, Andrzej B, Jersy K, *et al* . Debrisless laser- produced x- ray source with a gas puff target[ J]. *SPIE* , 1996, 2723: 310- 316.
- [ 9] 金春水, 王占山, 曹建林. 软 X 射线投影光刻原理装置的设计[ J]. 光学 精密工程, 2000, 8( 1): 66- 70.
- [ 10] 陈志伟, 王占山, 中惠辉. 软 X 射线狭缝光栅谱仪的研制[ J]. 光学 精密工程, 2000, 8( 3): 254- 257.

## Diagnostic method for laser plasma soft X- ray source

NI Qi- liang, CHEN Bo, GONG Yan, CAO Jian- lin

( State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Laser plasma soft X-ray source is a kind of pulsed light source. There are several diagnostic methods for this kind of light source. This paper discusses a new and practical way to measure the spectrum of the laser plasma soft X-ray source. A low noise channel electron multiplier (CEM) is used for detecting nanosecond pulsed light signals generated by the laser plasma source, CEM's output signal is fed to a low-noise and fast responsive charge-sensitive preamplifier for further amplification. Output charges from the preamplifier are proportional to the peak of its input pulse. And the spectra from the laser plasma soft X-ray source with copper target and O<sub>2</sub>, Kr gas target are measured in 8~ 30nm region, respectively by means of the above-mentioned way.

**Key words:** laser plasma; soft X-ray diagnosis; gas target; soft X-ray source

作者简介: 尼启良(1967), 男, 辽宁省辽阳人, 1990年毕业于长沙电力学院物理系, 1998年在中国科学院长春光机所获理学硕士学位, 现在长春光机所应用光学国家重点实验室攻读博士学位。