

新型软 X-射线透射光栅光谱仪的研制

邓 健 钟方川 覃 岭 张正泉 张文琦 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放研究实验室, 上海 201800)

摘 要 研制了一种新型的由带前置轮胎镜成像系统、高密度透射光栅和软 X 光 CCD 相机等组成的软 X 射线光谱仪, 摄谱范围为 0.5~ 1.5 nm, 光谱分辨为 0.05 nm。光谱仪没有像散, 实现了点对点成像。由于其高效率, 可探测到低能型高功率激光系统产生的等离子体 X 光谱, 特别适合于超短飞秒强激光脉冲产生的等离子体的实验研究。

关键词 透射光栅光谱仪, 光谱分辨率, 软 X-射线光谱。

1 引 言

激光等离子体 X 射线辐射的光谱诊断是研究激光-物质相互作用的重要方法之一^[1]。从发射光谱中可以获得关于等离子体的诸多信息, 如电子温度和密度、膨胀速度、电离态等等。要完成上述谱分析, 要求光谱仪器不但能以较高的光谱分辨, 而且同时能以较高的接收效率进行准确的测量^[2]。尤其在高功率、低能量的太瓦级飞秒脉冲激光与物质相互作用实验中, 对光谱仪的接收效率提出了更高的要求。现有的光谱仪还未能完全满足以上要求^[3]。以 1000 l/mm 针孔透射光栅谱仪为例, 由于较低的栅线密度和较小的针孔尺度, 使其光谱分辨率和收集效率都较低。

本项工作的目的, 是研制供实验室使用的高效、高分辨率的紧凑型软 X-射线透射光栅光谱仪, 摄谱范围是 0.5~ 15 nm, 光谱分辨率为 0.05 nm。

2 光谱仪的结构

带前置轮胎镜成像光学系统的 XUV 透射光栅光谱仪结构如图 1 所示。透射光栅光谱仪由镀金轮胎镜、无支撑 5000 l/mm 大面积透射光栅和软 X 光 CCD 相机等组成。轮胎镜用作成像系统, 它以较之针孔透射光栅大得多的入射光收集角, 收集等离子体发出的 X 射线, 并经大面积光栅衍射后会聚在软 X 光 CCD 相机的敏感面上。

该谱仪的一个重要特点是实现了对 X 光源的无像散点对点成像, 从而在垂直于色散方向上有空间分辨。由轮胎镜的成像性质可得出, 在 X 光以入射角 α 掠入射轮胎镜时, 当掠入射角满足如下条件时:

$$\alpha = \arccos (R_2/R_1)^{1/2} \quad (1)$$

子午面和弧矢面成像重合并满足如下方程:

$$1/z_1 + 1/z_2 = 2/(R_1 R_2)^{1/2} \quad (2)$$

式中 z_1 为物距, z_2 为像距。轮胎镜的子午面和弧矢面的曲率半径分别为 $R_1 = 5565 \text{ mm}$, $R_2 = 24.43 \text{ mm}$, 因此掠入射角 $\alpha = 86.2^\circ$ 。实验中取 $z_1 = 519 \text{ mm}$, $z_2 = 286 \text{ mm}$, 放大倍率为 0.6, 有利于降低源加宽, 提高光谱分辨率。轮胎镜子午面和弧矢面上的宽度分别为 55 mm 和 30 mm , 但在轮胎镜近光源一端垂直于光轴加一个 $3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的光阑以挡掉像点尾部的杂光, 改善像质, 并挡掉未经轮胎镜反射成像的杂散光, 因此收集立体角为 $7.45 \times 10^{-5} \text{ sr}$ 。该值是同样布局下

针孔透射光栅(直径 $50 \mu\text{m}$)收集角的 10^4 倍, 可见该谱仪的效率是很高的。谱仪的轮胎镜反射面镀金, 金对波长为 1.456 nm 的 X 射线的折射率为 $0.99759^{[4]}$, 对应的全反射角为 86.02° , 因此该谱仪的截止波长为 1.4 nm 。实验中 X 光对轮胎镜表面的入射角往往大于该值, 所以保证了波长大于 1.4 nm 的 X 光都可被全反射而成像。但在实验中发现, 更短波长谱线 ($\sim 0.5 \text{ nm}$) 在经轮胎镜有衰减地反射后, 仍可被谱仪观测到, 这从另一个侧面表明了谱仪的高效率。实验中采用两种无支撑大面积透射光栅—— 5000 l/mm (尺寸 $4 \text{ mm} \times 10.1 \text{ mm}$, 栅线间距 $d = 200 \text{ nm}$) 和 1000 l/mm (尺寸 $1 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, $d = 1000 \text{ nm}$)——作色散元件, 光栅尽量靠近轮胎镜以在像面上获得较大的线色散和光谱分辨。光栅放在软 X 光 CCD 相机敏感面前 250 mm 处。在拍摄短波长光谱区时, 使用 5000 l/mm 透射光栅以获得更大的线色散和更高的光谱分辨率。实验中主要使用 5000 l/mm 光栅, 因此接收面上线色散为 0.8 nm/mm ; 光栅被 X 光照亮的面积为 $3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 即照亮栅线数目 $M \sim 25000$ 条。

用减薄型背向照明软 X 光 CCD 相机作为谱仪的接收系统, 探测软 X 光发射的时间积分行为。它性能稳定, 使用方便, 响应灵敏度高, 为实验带来了极大的灵活性。该 CCD 相机是 1024×1024 二维接收器件, 每个像素大小为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 实验中光谱的零级总是调节到 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的 CCD 相机敏感面的中央部位以得到左右对称的记录光谱, 因此最大可探测波长约为 15 nm 。进而将敏感面沿色散方向平移, 最大可探测波长可以延伸到 50 nm 。

3 实验结果及讨论

为确定谱仪在等离子体诊断中的适用性、光谱分辨和摄谱范围, 在两种小型 10 Hz 重复频率的激光等离子体 X 光源上对该谱仪进行了实验验证。实验装置由激光等离子体软 X 射线源、XUV 光谱仪以及探测系统等组成。以上装置都处于真空室中, 并在整个实验过程中由分子泵将真空度保持在 $3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 以下, 以保证软 X 光辐射能从靶点传输到探测系统中而无显著的能量损失。使用的靶材是经抛光的纯铝靶, 和组份复杂、含有多种高 Z 元素的磁带靶, 以获得分离谱线较多的 X 光发射谱。激光等离子体由采用啁啾脉冲放大技术的桌面型太瓦级钛宝石激光系统产生^[5]。该啁啾脉冲放大技术不但为产生超短($\sim 45 \text{ fs}$)、强激光(功率 2 TW)脉冲提供了可能, 而且也实现了激光系统的紧凑化(所占用的光学平台不足 10 m^2)。用三阶自相关仪测得在 785 nm 处峰值功率密度与本底的反差比为 $10^5 \cdot 1$ 。

经抛光的铝平面靶装置在靶室内的三维电动平移台上, 在连续发次打靶的同时沿平行于

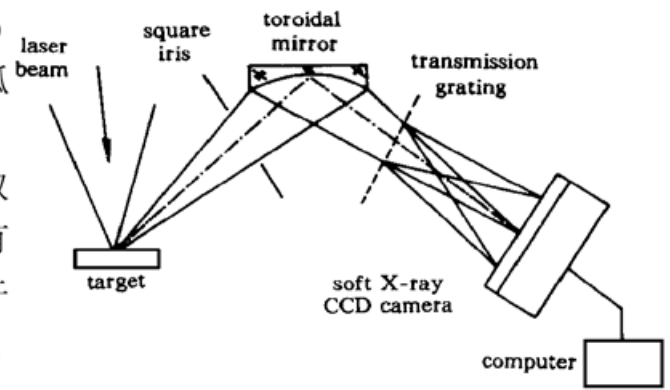


Fig. 1 Schematic of the transmission grating spectrograph (TGS) with toroidal mirror imaging optics

靶面方向平动, 为每一发激光都提供新的靶面。打靶激光脉冲由 $f = 100 \text{ mm}$ 的非球面镜会聚后, 打到靶材上的焦斑大小经监测系统测量, 约为 $50 \mu\text{m}$ 。激光正入射打靶, 而谱仪在相对于靶面法线成 90° 角方向上进行观测。以下实验结果都是在使用 5000 l/m 光栅情况下得到的。

超短脉冲激光辐照下, 由软 X 光 CCD 相机记录的铝靶 X-射线发射谱如图 2(a)、(b) 所示。为获得较好的信噪比, 以上光谱记录的都是单脉冲能量为 35 mJ 的 50 个激光脉冲打靶的结果。观察铝靶光谱可以看出, 在摄得的 $1.4 \sim 11 \text{ nm}$ 范围内的光谱中, 较强的线谱发射占统治地位。可辨认出在这些线谱发射中又以 $2 \sim 4 \text{ nm}$ 范围内的, 来自于类-H Al^{I} 和类-Li Al^{II} 的亚 Kev 的 L 壳层发射为主; 也可以辨认出较弱的 Kev 范围内的 K 壳层共振线(主要来自于类-He Al^{I} 的发射)。解谱结果发现两条类-Li Al^{II} 的谱线^[6], $1s^2 4d - 1s^2 2p$ (3.909 nm) 和 $1s^2 4s - 1s^2 2p$ (3.953 nm) 被谱仪分辨开, 该谱仪的光谱分辨 $\Delta\lambda \leq 0.05 \text{ nm}$ 。

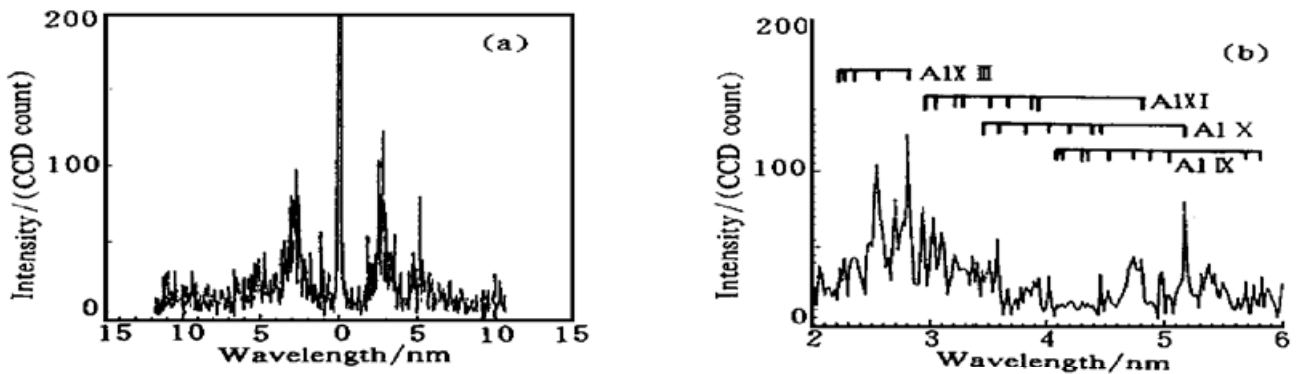


Fig. 2 X-ray emission spectrum from an Al plasma produced with a 45 fs pulse Ti:sapphire laser, measured by using the TGS with toroidal mirror, and recorded with a soft X-ray CCD camera. (a) The overall spectrum, (b) The spectrum in the range of $2 \text{ nm} \sim 6 \text{ nm}$

对磁带靶等离子体软 X 射线源的发射也进行了测量, 该光源由 YAG 激光脉冲(10 Hz , 532 nm , 800 mJ) 产生, 摄得的光谱如图 3 所示。此外, 换用不同的激光器、靶材和接收系统, 还进行了 YAG 激光辐照铝靶和铜靶的对比实验, 此时接收系统采用 KODAK T-PAN 干板^[7]和上海 5F 无保护膜软 X 光底片, 实验结果如图 4、图 5 所示。不同的实验条件下该谱仪都能给出不低于 0.05 nm 的光谱分辨。

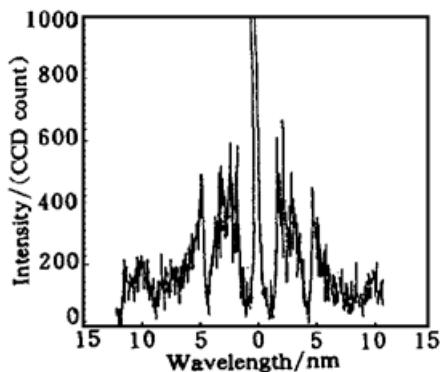


Fig. 3 X-ray emission spectrum from a cassette tape target irradiated with a 5 ns pulse YAG laser, measured by using the TGS with toroidal mirror, and recorded with a soft X-ray CCD camera

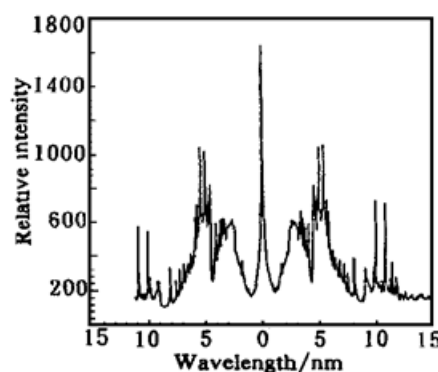


Fig. 4 X-ray emission spectrum from an Al plasma produced with a 5 ns pulse YAG laser, measured by using the TGS with toroidal mirror, and recorded with KODAK T-PAN plate

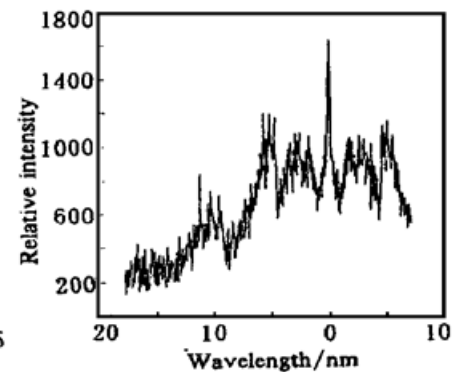


Fig. 5 X-ray emission spectrum from a Cu plasma produced with a 5 ns pulse YAG laser, measured by using the TGS with toroidal mirror, and recorded with Shanghai 5F film without protective coating

结 论 本工作研制了带前置轮胎镜成像光学系统的高效大面积透射光栅光谱仪, 实验表明该谱仪的光谱分辨已达到 0.05 nm。该谱仪的优点是结构简单, 调节方便, 造价低, 效率高; 没有像散, 实现了点对点成像。由于它的成像面是平的, 还可方便地与软 X 光 CCD 相机和条纹相机对接, 尤其适合于参与超短飞秒强激光脉冲产生的等离子体的实验研究。

参 考 文 献

- [1] Murnane M M, Kapteyn H C, Falcone R R. High-density plasmas produced by ultrafast pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**(2) : 155~ 158
- [2] Jasny J, Teubner U, Theobald W *et al.*. A single-shot spectrograph for the soft X-ray region. *Rev. Sci. Instrum.*, 1994, **65**(5) : 1631~ 1635
- [3] 邓 健, 王晓方, 张正泉. 用部分相干光衍射理论研究光栅成像系统. *光学学报*, 1997, **17**(4) : 465~ 471
- [4] Palik E D. *Handbook of Optical Constants of Solid*. Orlando: Academic, 1985. 286~ 297
- [5] 徐至展, Vigroux L, Saviot F 等. 输出 2 TW/45 fs 的掺钛宝石超短脉冲强激光系统. *中国科学*, 1997, **A27**(7) : 640~ 645
- [6] Kelly R L. *Atomic and Ionic Spectrum Lines Below 2000 Angstroms: Hydrogen Through Krypton Part I (H — Cr)*. New York: the American Chemical Society and the American Institute of Physics for the National Bureau of Standards, 1987. 218~ 250
- [7] Hoover R B, Walker A B C, DeForest C E *et al.*. Ultrahigh resolution photographic films for X-Ray/EUV/FUV astronomy. *Proc. SPIE*, 1992, **1742** : 549~ 561

Development of Soft X-Ray Spectrograph for Ultrashort Pulse Laser Produced Plasma Diagnosis

Deng Jian Zhong Fangchuan Qing Ling

Zhang Wenqi Zhang Zhengquan Xu Zhizhan

(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 10 July 1998; revised 17 August 1998)

Abstract A novel soft X-ray spectrograph comprised of a toroidal mirror image optics, a high-density transmission grating and a soft X-ray CCD camera has been developed. The detecting range is in the wavelength region from 0.5 nm to 15 nm with a resolution of about 0.05 nm. The spectrograph has no astigmatism. A point object is imaged to a point. Owing to its high efficiency, even an X-ray spectrum of low-energy laser produced plasma can be measured. It is especially suitable for experiments of ultrashort femtosecond pulse laser produced plasmas.

Key words transmission grating spectrograph (TGS), spectral resolution, soft X-ray spectrum.