

软 X 射线透射光栅谱仪用于激光等离子体辐射特性研究 II. 实验结果

王晓方 A. Pachtman* 徐至展 陈时胜 李跃林 钱爱娣 项惠珠

(中国科学院上海光机所, 201800)

摘要: 利用铜激光等离子体 L 带特征线(1.15 nm)辐射, 对 PTGS 的衍射效率进行了标定, 确定了 PTG 的基本参数。报道了利用 PTGS 研究激光等离子体软 X 射线辐射特性的系列实验结果。

关键词: 透射光栅, 激光等离子体, 软 X 射线辐射

Laser plasma X-ray emission studies using an imaging transmission grating spectrometer. II. Experimental results

Wang Xiaofang, A. Pachtman, Xu Zhizhan, Chen Shisheng,

Li Yaoling, Qian Aidi, Xiang Huishu

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

Abstract: Diffraction efficiencies and parameters of pinhole transmission gratings are determined using L-band (1.15 nm) characteristic line emission from copper laser-plasmas. Features are reported systematically of experiments with the pinhole transmission grating spectrometer in laser plasma soft X-ray radiation investigation.

Key words: pinhole transmission grating laser plasma, soft X-rays

无支撑型(Free-Standing)软 X 光针孔透射光栅谱仪(PTGS), 由于其结构简单, 光谱分辨适中(约 0.1~0.2 nm), 具有同时记录较宽的软 X 射线波长范围(0.5~25 nm), 在激光等离子体的软 X 射线发射谱和 X 射线激光研究中已得到较广泛的应用^[1~5]。谱仪的参量(色散、分辨率)尤其有关光栅各级谱衍射效率对记录的初始光谱数据分析有重要意义。虽然关于谱仪各级衍射效率已有不少计算结果^[6~7], 但实验上直接给出定标效率尚少。本工作将报道利用激光等离子体的特征 X 射线谱, 例如, Cu 的 L 特征线(1.15 nm)直接定标光栅衍射效率以及利用该谱仪研究激光等离子体软 X 射线发射谱的实验结果。

一、实验装置概述

本实验是在我所 6 路激光等离子体实验装置^[8]上进行的, 激光波长为 1.06 μm , 脉宽

收稿日期: 1989年9月8日。

*中国科学院上海光机所激光等离子体物理研究室博士后研究人员。

(FWHM) 约为 250ps, 能量为 2~8J, 分别采用点聚焦和线聚焦两种方式辐照靶。在点聚焦情况下, 激光束经一个 $f/1.5$ ($f=120\text{ mm}$) 的非球面透镜聚焦成直径为 $\sim 100\ \mu\text{m}$ 的焦斑, 相应的靶面激光功率密度为 $5 \times 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$; 在线聚焦情况下, 激光束经由一个非球面透镜 ($f/1.5$) 和一个负的柱面透镜组成的线聚焦系统聚焦成焦线, 更换具有不同发散度的柱面透镜, 可获得长度分别为 1.58 mm 及 20 mm, 宽度为 $150\ \mu\text{m}$ 的两种不同长度的焦线, 相应的靶面激光功率密度分别为: $6 \times 10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 及 $1.2 \times 10^{13}\ \text{W}/\text{cm}^2$, 图 1 给出了实验的排布。在点聚焦情况下, PTGS 的观测方向与入射激光(或靶的法线方向)成 37° 角; 而在线聚焦情况下, PTGS 是沿线状

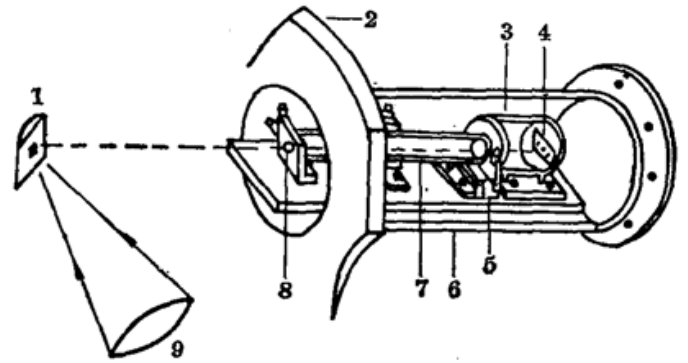


图 1 实验装置示意图

1-靶; 2-靶室壁; 3-底片室; 4-底片; 5-快门; 6-真空法兰; 7-杂散光防护屏; 8-PTG; 9-入射激光

等离子体轴线放置的, 即观测方向与入射激光方向垂直。实验中 PTG 距等离子体源和记录光谱的胶片分别为 48.7 cm 和 31.5 cm。在该条件下, 谱仪基本参量满足:^[9]

$$\text{线色散 } \frac{dy}{d\lambda} = 0.315\ \text{mm}/\text{nm} \quad (1)$$

$$\text{光谱分辨}(\phi 50) \quad \Delta\lambda_s \geq 0.2\ \text{nm}$$

$$\text{空间分辨}(\phi 25) \quad \Delta s = 60\ \mu\text{m} \quad (2)$$

这里, 光源的大小对光谱分辨率起主要限制作用, 因此, 我们只考虑这一因素的影响。

实验中, 采用国产无保护膜软 X 光胶片或 Kodak101 胶片记录。国产软 X 光胶片的结构参数类同于 SB-392 胶片, 于是在数据处理中, 采用文献[10]的标定结果。而对于 Kodak101 胶片, 则以文献[11]的标定结果进行数据处理。

二、实验结果

2.1 衍射效率的确定

根据前文^[9]第 2 节的模型, 我们利用铜激光等离子体的特征谱线来对光栅的衍射效率进行了标定。实验中, 在胶片前加上 500 nm 厚的铝膜滤去 Cu-M 带(中心波长 5.1 nm)发射, 从而在胶片上只记录得到 Cu-L(1.15 nm) 线准单色衍射光谱, 图 2 是实验结果。从图可见两只 PTG 的衍射效应不尽相同。 $\phi 25\ \mu\text{m}$ PTG 的二级衍射很好地被抑制, 而 $\phi 50\ \mu\text{m}$ PTG 的一级效率非常高, 超过零级。由胶片标定曲线和前文^[9]2.3 节结果, 我们求得光栅参数如表 1。利用表 1 和前文^9 式, 则可求得相移因子 T 随波长的变化特性曲线。有关金的光学常数取自文献[12]。图 3 是我们得到的能量在 40~1000 eV(波长 1~30 nm)的 T 曲线, 这一结果同文献[11]的很相近。从图可见 T 随波长变化很小, 这正反映了 PTG 的衍射效率随波长变化极平坦的响应特性, 这正是所期望的。我们利用铜激光等离子体的 L 线(1.15 nm)的准单色 X 光, 对光栅的衍射效率做了标定, 得到光栅的一级谱衍射效率为 10%, 这与理论分析^[9]是一致的。

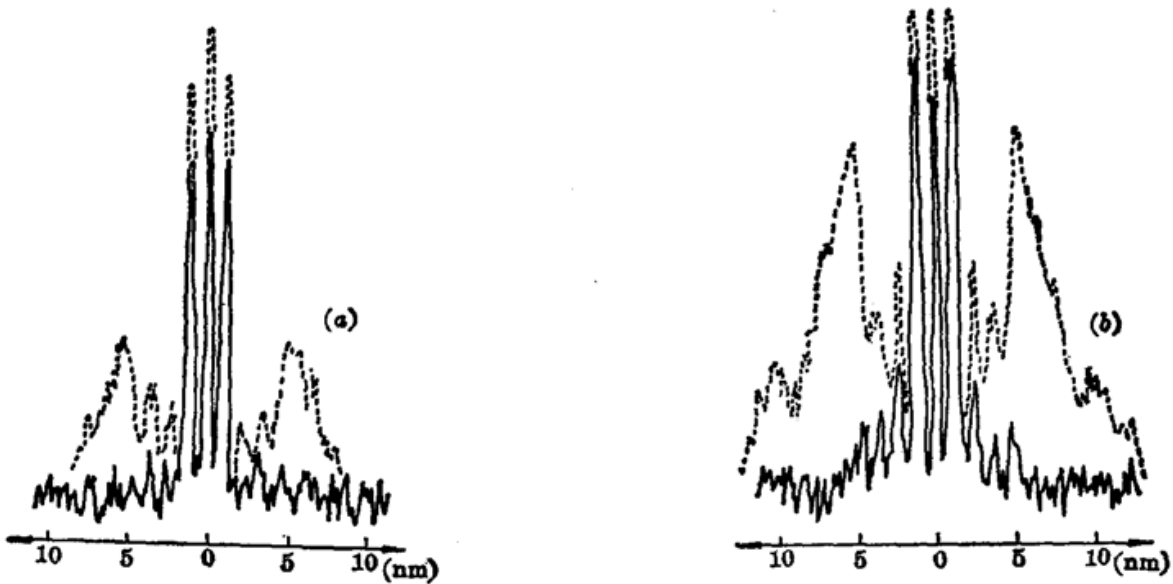


图 2 铜等离子体 L 带发射(峰值 11.5 nm)光谱
以 0.5 μm 铝箔滤光,并分别以 φ25 PTG(a)与 φ50PTG(b)测量。激光能量 $E_J=16J$ 。图中的
虚线为无铝箔时的光谱,相应激光能量为 10J

表 1 从图 2 测得的不同的衍射级比,及根据文献[9]的比例计算出的 PTG 参数

直 径 $\phi(\mu m)$	衍 射 级 比			$N^{(n)}/N^{(n)}$		参 数	
	$\frac{N^{(1)}}{N^{(0)}}$	$\frac{N^{(2)}}{N^{(1)}}$	$\frac{N^{(3)}}{N^{(2)}}$	$\frac{N^{(3)}}{N^{(2)}}$	$\frac{N^{(1)}}{N^{(2)}}$	a/d	$Z(\mu m)$
25	0.71	0.02	0.06	(弱)	(弱)	0.44	0.39
50	1.57	0.08	0.04	0.53	0.85	0.40	0.33

2.2 利用 PTGS 研究激光等离子体软 X 射线发射

利用点聚焦激光打靶,可以对不同原子序数激光等离子体 X 射线辐射特性、激光等离子体

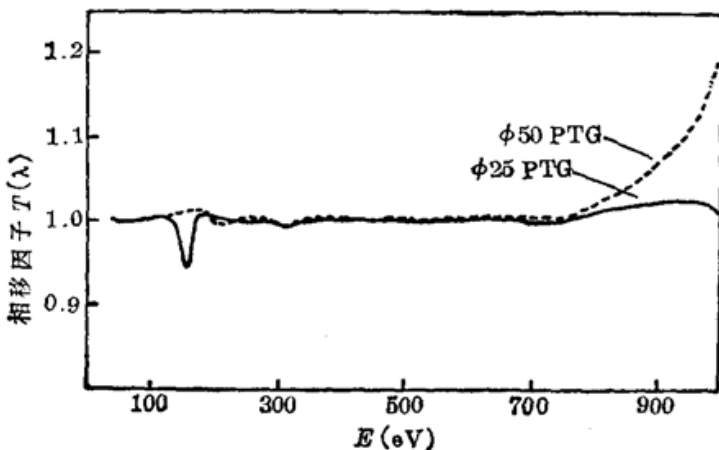


图 3 相移因子 $T(\lambda)$ 与 X 射线波长
 $\lambda(\lambda=1.24 \times 10^4/E(eV)\text{\AA})$

能量输运特性、等离子体对激光的共振吸收等物理问题进行研究,也可考核 PTGS 的摄谱能力。图 4 是在点聚焦打靶条件下 PTGS 获得的 ^{34}Se 等离子体 X 光发射谱。光谱结果记录了从 0.8 nm [在 SiO_2 等离子体发射谱中我们用 PTGS 观察到 0.68 nm ($^{28}\text{Si-K}$ 线)的光谱]到 25nm 范围内的软 X 线谱,从实验上证实了 PTGS 的宽带摄谱能力(0.5~25nm)。空间分辨方向扫描结果则反映了不同波长 X 光发射的空间特性。沿色散方向和空间方向零级成像宽度分析表明

这两个方向的零级像宽不同,它们之间满足前文^[9]对成像的分析。

利用线聚焦激光打靶可以更有效地利用 PTG 的空间分辨能力。图 5 是在这种打靶条件下凹槽靶的实验结果。零级成像显示出源的几何形状,并且在凹槽区发射增强。一级 L 带

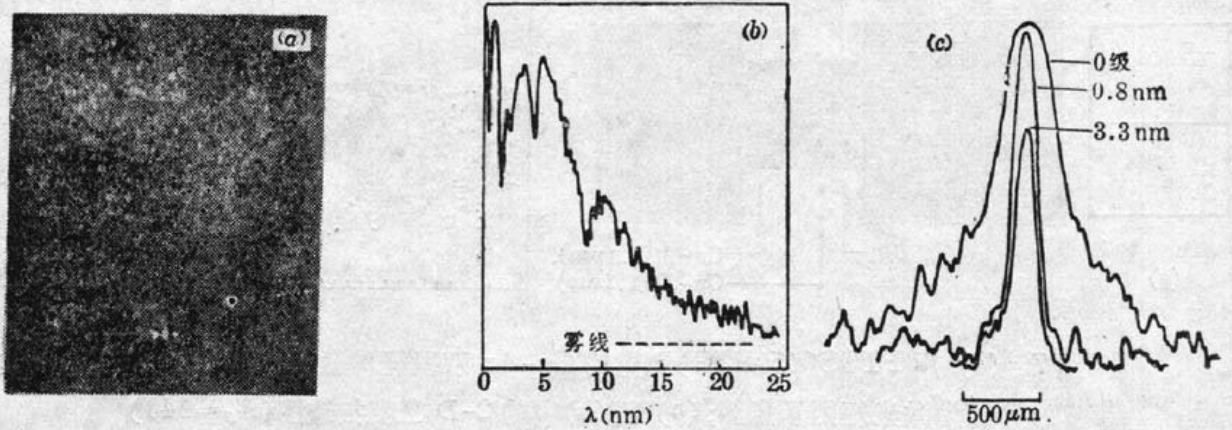


图 4 (a) 用 PTGS 测得的硒等离子体 X 射线谱, 上: $\phi 25\text{PTGS}$; 下: $\phi 50\text{PTGS}$, $E_G=10.4\text{J}$;
 (b) (a) 中 $\phi 50\text{PTGS}$ 光谱的微密度计扫迹; (c) 以 (a) 中的 $\phi 25\text{PTGS}$ 测量的不同波长的 X 射线空间分布图

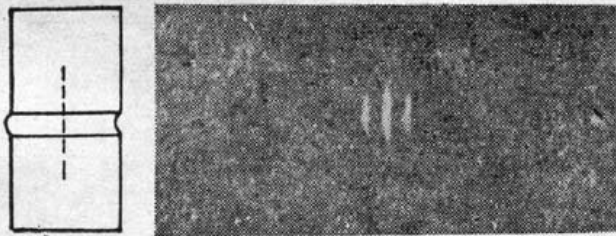


图 5 半圆柱铜靶的激光等离子体 X 射线谱, 左边为激光辐照示意图(虚线为焦点), $E_J=20\text{J}$



图 6 以 PTGS($\phi 50\text{PTGS}$)测得的 Al-Au 分段靶的激光等离子体 X 射线谱($E_J=28\text{J}$)

(Cu-L, 1.15 nm) 发射也具有类似的特点, 这是由于源的尺度比较大, 光源的几何成像宽度 (见前文^[9]) 大于 L 带衍射对应的宽度 $\Delta y = \Delta \lambda_L \cdot \frac{dy}{d\lambda}$, 从而造成沿衍射方向成像的结果。图 6

是在线聚焦激光打靶条件下另一种靶——分段靶的实验结果。分段区明显的间隔充分显示了 PTGS 的空间分辨能力。利用这样的实验条件(一定的靶结构或激光打靶方式)可研究激光等离子体不同区域的物理特性。对凹槽靶的详细研究结果表明, 激光等离子体在槽区将流体动能转化为热能和辐射能, 导致槽区发射增强; 利用分段靶我们观察到全同激光辐照条件下不同材料的等离子体 X 光发射以及等离子体在分段区相互作用的种种特点。

正如上面结果可见, PTGS 能同时给出激光等离子体 X 光辐射的光谱和空间信息。为了更直接、有效地分析实验结果, 可以对胶片记录结果进行二维处理。图 7 是在线聚焦激光打靶条件下用 PTGS 获得的铜-金双段靶激光等离子体 X 光发射结果与这一结果的二维黑度扫描。根据二维扫描结果可对仪器摄谱范围内 X 光反射的光谱和空间特性进行全面的调查。从图 7(b)、(c) 还可注意到, 沿色散方向 $^{20}\text{Cu-M}$ 带峰(5.1 nm)和 $^{79}\text{Au-O}$ 带峰(4.7 nm)处在不同的位置, 表明了 PTGS 的光谱分辨能力。

2.3 真实光谱

根据胶片响应特性和前文 2.3 节提供的方法可对 PTGS 接收的结果进行绝对计算, 获得 X 光发射的真实光谱。这里, 我们以硅为例给出了线聚焦激光照射下 PTGS 沿线状等离子体

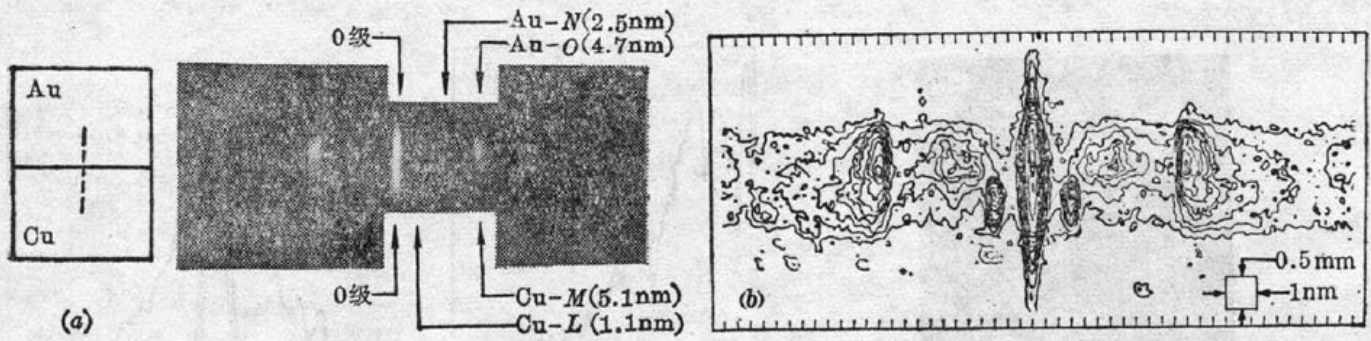


图 7 (a) 用 PTGS($\phi 50$ PTG)测得的 Cu-Au 双段靶的激光等离子体发射谱, 左边为激光辐照示意图; (b) 图(a)中的 2-D 密度扫描图($E_J=14\text{J}$)

轴向接收的发射谱和由此计算得到的真实光谱, 如图 8 所示。从图可见, 真实光谱中 X 光发射主要集中在波长小于 10 nm 的范围, 这和胶片黑度扫描结果一致, 但二者的光谱形状不同。因为胶片上某一点的黑度是由各种波长的不同衍射级次在此叠加的总效果(见前文^[9](11)式), 而通过叠代计算(前文^[9](13)式), 我们消去了这一叠级效应。

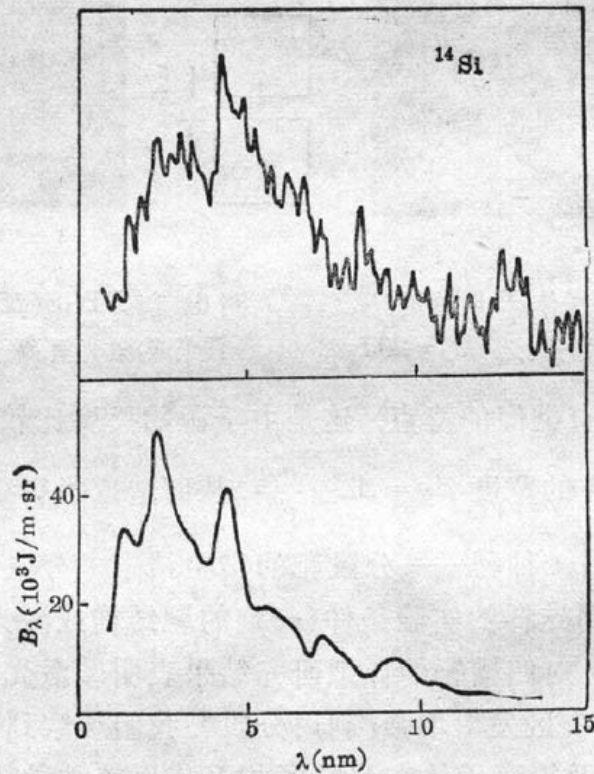


图 8 用 PTGS($\phi 50$ PTG)沿 20mm 长线形 Si 等离子体测得的 X 射线发射谱(上)与计算出的实际光谱(下)($E_J=100\text{J}$)

三、结 论

我们已研制成功一台 PTGS, 并将它成功地应用于激光等离子体实验研究, 已取得了有关等离子体软 X 射线发射的丰富信息。实验结果表明: PTGS 具有大的摄谱范围(0.5~25 nm)良好的光谱分辨($\sim 0.2\text{nm}$)和空间分辨($\sim 60\ \mu\text{m}$)能力, 衍射效率高(一级可达 10% 以上)且随波长变化小。并且, 由于 PTGS 在实验中容易操作、调试等特点, 使它已经成为激光等

离子体辐射特性研究中最有效的工具之一。

我们正着手将 PTGS 与 X 光条纹相机配接, 针对性地就某一谱带或波长范围的 X 光辐射动力学过程进行研究。同时将采用刻线数更多 (或周期更短) 的 PTG 或使用 Wolter 显微镜^[7]代替针孔以获得更高的光谱和空间分辨能力。

参 考 文 献

- 1 K. Eidmann *et al.*, *Laser & Particle Beams*, **4**(Pt. 3-4), 521(1986)
- 2 T. Mochizuki *et al.*, *Phys. Rev. A*, **33**(1), 525(1986)
- 3 G. D. Tsakiris *et al.*, *Europhys. Lett.*, **2**(3), 213(1986)
- 4 N. M. Ceglio *et al.*, *Appl. Opt.*, **22**(2), 318(1983)
- 5 D. L. Matthews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(2), 110(1985)
- 6 H. W. Schnopper *et al.*, *Appl. Opt.*, **16**(4), 1088(1977)
- 7 N. M. Ceglio *et al.*, *Appl. Opt.*, **21**(2), 3953(1982).
- 8 Xu Zhizhan, Li Anming, Chen Shisheng *et al.*, *Chin. Phys.*, 1981, **1**(3), 548(1981)
- 9 王晓方 A. Pachtman *et al.*, *中国激光*, **17**(7), 407(1990)
- 10 A. Pachtman, Xu Zhizhan, *et al.*, in "Proc. of the Second Symposium on Plasma-Wave and Plasma-Matter Interactions", Association for Plasma Studies of China Report, No. APS-88-006(1988), p. D-1
- 11 T. Kishimoto, *MPQ Report*, **MPQ 108**, 111(1985)
- 12 R. Tatchyn, L. Lindau, *Low Energy X-ray Diagnostics*, AIP Conf. Proc., No. 75(American Institute of Physics, 1981), ed. by D. T. Attwood, and B. L. Henk, p. 323; E. B. Saloman, and J. H. Hubbell, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **38**, 22(1988)

1.5ps、105 mW 超短脉冲染料激光器通过鉴定

国家科委“七五”重点科技攻关项目——氩激光泵浦的超短脉冲染料激光器, 经过近 4 年的努力已研制成功。1990 年 10 月 13 日由国家教委主持鉴定会。经鉴定会测试, 该激光器输出激光脉冲宽度小于 1.5 ps, 平均输出功率大于 105 mW, 脉冲重复频率~82 MHz, 峰值功率 0.85 kW。稳定性: 连续运转 8 小时以上, 运转情况良好。脉冲宽度和平均输出功率等重要的综合指标都优于目前美国 Spectra-Physics 公司和 Coherent 公司的同类产品的指标。

该激光器系统已用于超高速光电导采样测量的研究, 对几个国内外的超高速光电探测器响应时间进行测量鉴别, 效果良好。

(南开大学现代光学研究所袁树忠
1990 年 11 月 7 日收稿)