

消像散掠入射平场光栅谱仪及其在等 离子体 XUV 光谱诊断中的应用

范品忠 张正泉 周锦智 金仁山 徐至展 郭 旭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

研制成一台由柱面反射镜和球面反射镜组成的掠入射前置光学系统和变间距球面光栅组成的掠入射平场光栅谱仪, 它不仅具有较高的效率和光谱分辨, 调整方便, 而且还具有在 4.4 nm~30 nm 波长范围里同时获得一维空间分辨光谱的能力。用该谱仪成功地获得了线聚焦激光产生的 Si, Cu 及其它元素的等离子体柱的轴向空间分辨光谱。该谱仪很适合与具有平直接收表面的光电探测器, 如软 X 射线条纹相机等联用以获得时间分辨光谱。

关键词: 消像散掠入射平场光栅谱仪; 空间分辨光谱; 线聚焦激光等离子体。

一、引 言

一般掠入射光栅谱仪中, 光栅、入射狭缝和探测器均须沿罗兰圆安放。具有平直接收表面的探测器诸如光电两极管阵列, 微通道板、电荷耦合器件以及条纹相机光阴极等却很难与罗兰圆吻合, 因此很难用这些光电探测器获得时间分辨谱。此外, 由于掠入射时严重的像散性, 使其丧失了空间分辨能力。通常采用前置光学系统补偿掠入射时的象散^[1~5], 在一定的波长上或小的波长范围里 (± 1 nm) 获得一维空间分辨能力。80年代初出现了变间距光栅^[5, 6], 它能在一个平直的焦面上形成所谓平场光谱, 介决了与前述光电接收器的耦合问题, 但尚缺少空间分辨能力^[7~9]。

然而在激光等离子体诊断, X 射线激光研究等应用中, 不仅需要等离子体发射的光谱, 以获得关于等离子体内部状态, 如温度、密度和离子丰度等讯息, 而且还迫切需要知道这些光源发射的时间分辨和空间分辨光谱, 以便推得等离子体状态的时间行为和空间分布。因此要求光谱诊断仪器不仅有时间分辨能力, 而且还要具有空间分辨能力。

本文报道最近研制成功的消像散掠入射平场光栅谱仪。这种谱仪不仅具有平直的光谱焦面, 适合于用光电探测器做时间分辨光谱研究, 而且还具有在整个光谱中同时获得一维空间分辨能力。另外, 还给出了利用该谱仪获得的线聚焦激光等离子体轴向光谱的实验结果。

二、谱仪的结构和参数

由光栅方程

收稿日期: 1991年1月22日

* 本工作得到国家高技术计划和中国科学院重大项目的资助。

$$m\lambda = \sigma(\sin \alpha - \sin \beta),$$

式中 m 为光谱衍射级次, σ 为光栅刻槽间距, α 和 β 分别为入射角和衍射角, 显然, 衍射角 β 不仅与波长 λ 和入射角 α 有关, 而且还与光栅的刻槽间距 σ 有关。所以对变间距光栅来说, 衍射角不仅是波长的函数, 而且也随光栅表面上的位置而变化, 因此变间距光栅的成像特性就不同于普通等间距光栅的成像特性: 在一定的条件下变间距光栅形成的光谱聚焦面不象普通光栅那样落在罗兰圆柱面上, 而是落在与入射光线几乎成直角的平面上, 如图 1 上所示的普通光栅(等间距)和平场光栅(变间距)形成的光谱焦平面分别为 P' 圆柱面和 P 平面。由图 1 可见不同波长经变间距光栅衍射后被成象在平直的焦平面 P 上, 而且光栅至衍射像, 即聚焦谱线的距离随波长的变化要比普通光栅小得多。

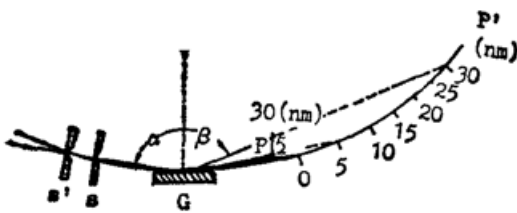


Fig. 1 Schematic diagram of grazing incidence spectrographs

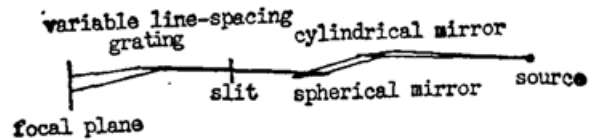


Fig. 2 Schematic diagram of the stigmatic grazing incidence flat-field grating spectrograph

实验所用的光栅是日立公司机械刻制的变间距光栅复制光栅, 表面涂金: $R=5649$ mm, $\sigma_0=1/1200$ mm(标称值), 闪耀角为 3.2° , 在约 50 mm 光栅刻槽表面上刻槽间距 σ 从 $0.690 \mu\text{m}$ 变为 $0.954 \mu\text{m}$ 。光栅装在一个能作二维平动调节和三维转动调节的光栅架上。精细调节入射角 ($\alpha=87^\circ$) 能在整个光谱区获得尖锐的 X 射线谱。不同波长谱线在光谱平面的位置 L , 由 $L=235 \cot \beta$ 决定。

为了获得一维空间分辨, 采用由柱面反射镜和球面反射镜组成的前置光学系统替代以前用的环面反射镜^[3~4]来补偿掠入射光栅的像散。反射镜的参数如下: 柱面反射镜半径 $P=20$ mm, 表面镀金; 球面反射镜半径 $R=3000$ mm, 表面镀金。由于反射镜工作在 30 nm 以下的短波长区, 表面加工精度要求很高。谱仪整体的示意图如图 2。在子午面内, 球面反射镜将光源成像在谱仪的狭缝上, 并照亮光栅以获得较好的光谱分辨和效率; 在弧矢面内, 柱面镜将光源成像在光谱的衍射焦面上, 以获得一维空间分辨。由于子午面和弧矢面里的成像分别由两块反射镜承担, 所以调整较为方便。如前所述由于变间距光栅的衍射焦距随波长变化不大, 当波长从 5 nm 变至 30 nm 时, 衍射焦距变化不到 3%, 绝对变化量仅为 6.5 mm, 因此借助于这种前置光学系统, 可以在整个平焦场上同时获得消像散光谱。

三、实验和结果

实验在中国科学院上海光机所高功率激光实验室的 LF12* 高功率激光装置上进行。实验装置如图 3 所示。 $10.5 \mu\text{m}$ 激光抵达靶面的能量为 50~200 J, 激光脉宽约为 800 ps。光束经六单元柱面透镜列阵和 $F/1.7$ 非球面透镜聚焦在平面靶上, 产生非常均匀的线状等离子

体。焦线长度为 20 mm，宽度为 130 μm，靶面功率密度约为 2·10¹³ W/cm²，实验中所用的

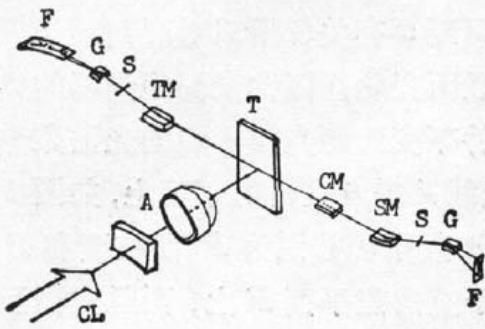


Fig. 3 Experimental arrangement
 CL: Cylindrical lens A: Aspherical lens
 T: Target, TM: Toroidal mirror,
 CM: Cylindrical mirror, SM: Spherical
 mirror, S: Slit, G: Grating, F: Film

靶全是表面经过抛光的平面靶。靶至底片平面的距离约为 1200 mm，光谱的空间放大率约为 2。谱仪的入射狭缝宽度为 10 μm。实验中除少数几发以外全都用无保护层上海医用 X 光底片接收记录。实验中拍摄了 Si、Cu 及其它几种元素的平面靶光谱。图 4 是拍得的 Si 和 Cu 的线聚焦激光等离子体光谱照片。图 5 是 Si 和 Cu 线聚焦激光等离子体光谱的测微密度计扫描曲线。图 6 给出了在 13 nm 附近 Si 等离子体光谱照片，显示谱仪的光谱分辨约为 0.01 nm。

从上述实验结果可以得到：

(1) 消像散掠入射平场光栅谱仪在从 4.4 nm ~ 30 nm 波长范围里能在一平直的焦面上获得清晰的光谱，波长范围可望向短波延伸至 2.5 nm 向长波延伸至 40 nm^[9]；光谱分辨约为 0.01 nm。

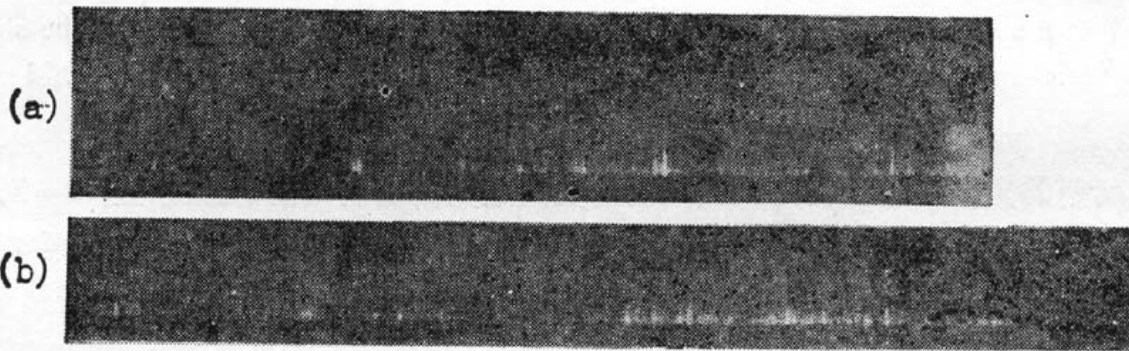


Fig. 4 On-axis spectrograms of Si (a) and Cu (b) plasmas

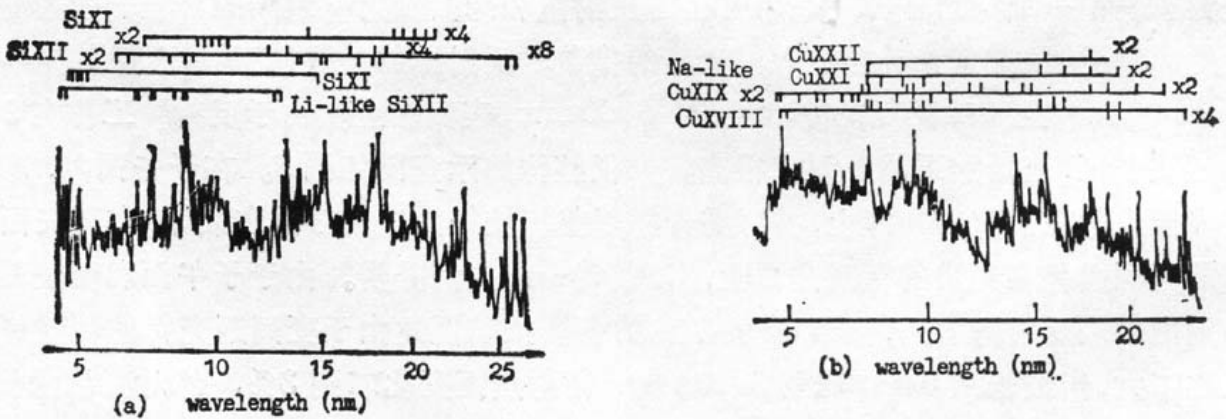


Fig. 5 Densitometer traces for on-axis spectrum of silicon (a) and copper (b)

(2) 在 4.4 nm ~ 30 nm 的整个波长范围里能同时获得很好的空间分辨光谱；光谱清楚显示出等离子体从靶面向外喷射所形成的等离子体羽，不同电离阶离子谱线的等离子体羽长短不一，最远处可达 5 mm 以上。

(3) 谱仪具有较大的接收立体角 (~10⁻⁵ 球面度)，在距光源 1.2 m 远处的光谱焦面上，用无保护层上海医用 X 光底片在约 40 J 的激光能量下，一发激光足以获得很好曝光的

光谱,说明谱仪具有相当高的效率。

(4) 在光谱中明显呈现出作为接收器的无保护层上海医用 X 光底片乳剂中碳的吸收边,在 4.368 nm 处的一级谱尤为明显,而在用 Kodak101-01 底片拍得的光谱中不存在这种吸收,显示了这种特殊底片的单颗粒层特性。

(5) 在光谱中存在较强的高级衍射光谱。高级谱的存在使光谱显得拥挤,干扰了谱线波长的测定和辨认;但高级谱能提供较高的光谱分辨。必要时准备采用掠入射反射短波切断的滤波方法来抑制短波长的高级衍射谱。

作者对 LF12* 高功率激光装置运行组的帮助和合作,对上海感光胶片厂宋建时和张良梅同志提供无保护层 X 光底片表示衷心感谢,冯贤平同志参加了部分实验工作。

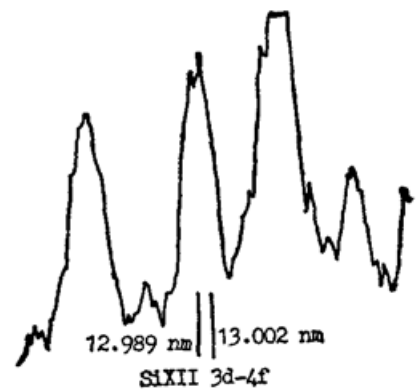


Fig. 6 On-axis spectrum of Si plasma column near 13 nm, showing 0.01 nm spectral resolution of the spectrograph

参 考 文 献

- [1] W. A. Rense, T. Violett; *J. O. S. A.*, 1959, **49**, No. 2 (Feb), 139~141.
- [2] G. Tondello; *Optica Acta*, 1979, **26** No. 3 (Mar), 357~371.
- [3] 张正泉等;《光学学报》,1988, **8**, No. 8 (Aug), 762~763.
- [4] 范品忠等;《中国激光》1991, **18**, No. 1 (Jan), 27~29.
- [5] M. E. Bruner; *Proc. SPIE*, 1988, **982**, 299~310.
- [6] T. Harada *et al.*; *Applied Optics.*, 1980, **19**, No. 23 (Nov), 3987~3993.
- [7] T. Kita *et al.*; *Applied Optics.*, 1983, **22**, No. 4 (Feb), 512~513.
- [8] N. Nakano *et al.*; *Applied Optics.*, 1984, **23**, No. 14 (Jul), 2386~2392.
- [9] G. P. Kiehn *et al.*; *Applied Optics.*, 1987, **26**, No. 3 (Feb), 425~426.

A stigmatic grazing incidence flat-field grating spectrograph and its application in XUV spectroscopic diagnostics of plasmas

FAN PINZHONG, ZHANG ZHENGQUAN, ZHOU JINZHI, JIN RENSHAN, XU ZHIZHAN AND GUO XU
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 22 January 1991)

Abstract

A flat-field grating spectrograph with one demension spatial resolution was developed. The spectrograph, consisted of a grazing incidence collecting optics combined with a cylindrical mirror and a spherical mirror, and a variable line-spacing concave grating, has not only the advantages of easy adjustment, higher efficiency and higher spectral resolution, but also the capability to provide one demensional spatially resolved spectrum simutaneously over 4.4~30 nm wavelength range. The spatially resolved on-axis spectra of Si, Cu and other element plasmas produced by line-focused laser were successfully obtained. Such a spectrograph is suitable for coupling with the detectors having flat receiving surface, such as soft X-ray streak camera, to achieve the time-resolved XUV spectra.

Key words: stigmatic grazing incidence flat-field grating spectrograph; spatially resolved spectra; line-focused laser-plasmas.