

激光等离子体空间分辨 XUV 光谱技术*

范品忠 张正泉 赵世诚 殷光裕 周锦智 金仁山 郭旭

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 本文描述了环面镜-掠入射光栅谱仪系统获得激光等离子体空间分辨 XUV 光谱的原理, 系统结构参数和实验结果, 并讨论了这种环面镜技术和交叉狭缝技术各自的优缺点。

关键词: 激光等离子体, XUV 光谱学, 空间分辨光谱

Spatially resolved XUV spectral technique for laser-produced plasmas

Fan Pinzhong, Zhang Zhengquan, Zhao Shicheng, Yin Guangyu,

Zhou Jinzhi, Jin Renshan, Guo Xu

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

Abstract: The principle, parameters and experimental results of the toroidal mirror-grazing incidence grating spectrograph system used for obtaining spatially resolved XUV spectra of laser plasma are described, and the merits and demerits of this toroidal mirror technique and the crossed-slit technique are discussed.

Key words: laser plasma, XUV spectroscopy, spatially resolved spectra

一、引言

在 1~50 nm 远紫外光谱区 (即 XUV 光谱区), 高功率激光产生的等离子体发射非常丰富的连续谱和靶元素的各种高阶离子的线光谱。在此波段中, 各种材料表面的正入射反射率很低, 一般都采用大角入射结构, 即掠入射光栅谱仪。然而掠入射光栅谱仪本身存在着严重的像散性, 即谱仪入射狭缝上的一个点对应光栅衍射像平面上的一条线。这不仅使谱仪的效率下降, 而且使其丧失了空间分辨能力。

在激光核聚变和软 X 射线激光的研究中往往需要等离子体源的空间分辨光谱数据, 由此推得等离子体温度和密度等状态参数以及有关能级集居数和增益系数的空间分布。本文描述了在掠入射光栅谱仪前放置一块环面反射镜在所希望的波长及其附近获得激光等离子体空间分辨 XUV 光谱的原理、系统结构参数和实验结果, 并讨论了这种环面镜技术和交叉狭缝技术各自的优缺点。

收稿日期: 1989年11月2日。

* 本工作得到中国科学院重大项目基金和国家自然科学基金的资助。

二、掠入射光栅谱仪和环面反射镜系统的结构和参数

掠入射球面光栅谱仪的光路如图 1 所示。半径为 R 的球面光栅 G 的顶点、入射狭缝 S (垂直于纸面) 和波长为 λ 的衍射像 B_λ 都位于直径为 R 的罗兰圆上。熟知的光栅方程

$$m\lambda = d(\sin\alpha - \sin\beta) \quad (1)$$

给出了入射角 α 和衍射角 β 与光栅刻槽间距 d 、波长 λ 和衍射级次 m 之间的关系。如前所述, 在掠入射时, 点源单色衍射像是一条线, 其长度 z 由下式给出^[1]:

$$z = \left[l \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} \right] + L[\sin^2\beta + \sin\alpha \operatorname{tg}\alpha \cos\beta] \quad (2)$$

其中第一项是入射狭缝有限长度 l 的贡献; 第二项来自像散的贡献。 L 是被照明的光栅刻槽长度。由 (2) 式可以看出: 当 $\alpha = \beta = 0$ 时, 即正入射时, 衍射像是完全消像散的; 在接近正入射时 (α 和 β 都很小), 像散比较小; 而当 α 和 β 都很大即掠入射时, 像散很严重, 而且 α 和 β 越大像散越严重。

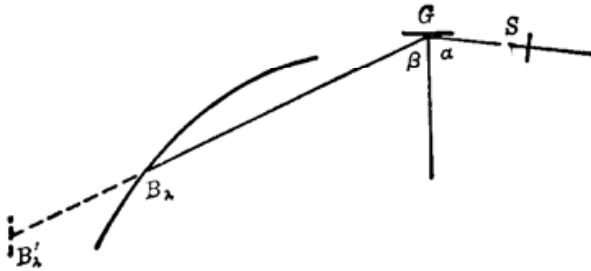


图 1 掠入射球面光栅谱仪光路图

实际上, 球面光栅成像性质与一般球面反射镜成像性质相同。如图 1 所示, 垂直子午面放置的入射狭缝被球面光栅形成了两个相互正交的像散像: 罗兰圆上的垂直焦线 B_λ 和位于罗兰圆外的水平焦线 B'_λ 。光栅理论指出, 为使水平焦线也落在罗兰圆上, 要求光源是一个位于光栅后面的虚点源。它与光栅顶点间的距离由下式决定^[2, 3]:

$$r_o = \frac{R}{\cos\alpha - \sin\beta \operatorname{tg}\beta} \quad (3)$$

该式表明, 在掠入射时, r_o 为负值, 即虚点源位于光栅后边。所以在弧矢面里, 光栅要用会聚光束来照明, 相应的虚点源的位置满足 (3) 式, 这样才能在罗兰圆上获得消像散的单色像。

这种在光栅子午面里用发散光束, 在弧矢面里用会聚光束照明光栅的要求能用一块环面镜来实现^[2, 3]。图 2 给出了环面镜和掠入射光栅谱仪的光路布局图, 其中 A 为激光等离子体源, M 为环面反射镜, S 为入射缝, G 为光栅。顶点和曲率中心在光栅子午面里的环面镜, 在子午面里的曲率半径为 r_m , 在弧矢面里的曲率半径为 r_o , 形成了一个点源的两个像散像: 一个落在谱仪的入射缝上; 另一个落在光栅后面的虚点源 P_λ 处。这样就达到了在子午面里以发散光束照明光栅; 在弧矢面里以会聚光束照明光栅的要求, 满足了在罗兰圆上产生消像散像的条件。

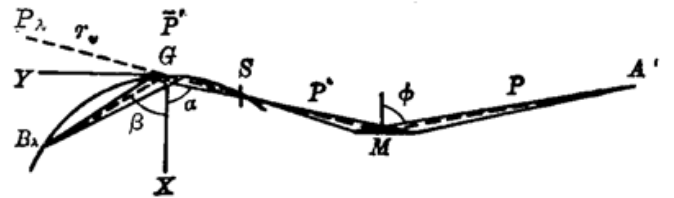


图 2 环面镜掠入射光栅谱仪系统光路图

环面镜上的入射角为 ϕ , 它至光源的距离 P , 至入射缝的距离 P' , 至虚点源的距离 \bar{P}' ($\bar{P}' = r_o + R\cos\alpha + P'$), 它们之间的关系由下列两式给出:

$$1/P + 1/P' = 2/r_m \cos\phi \quad (4)$$

$$1/P + 1/\bar{P}' = 2\cos\phi/r_s \quad (5)$$

在 XUV 区, ϕ 一般为 $80\sim 89^\circ$, 而 r_m 相当大(几米量级), r_s 相当小(几厘米量级)。由于 r_s 与衍射角 β 有关, 所以上述条件仅对一个波长满足。

然而这种环面镜-球面光栅谱仪系统仍然存在一定的像差限制^[3], 它影响系统的空间分辨能力, 尤其是远离子午面处的空间分辨能力。

我们所用的谱仪是一台自制的掠入射光栅谱仪^[4], 环面镜由本所工厂加工, 表面镀金, 系统的有关参数见表 1。

表 1 掠入射光栅谱仪和环面反射镜参数

掠入射光栅谱仪	环面镜 (30 mm × 55 mm)
光栅: Baush & Lomb 光栅 (25 mm × 25 mm) 半径 R : 9988 mm 刻槽间距 d : 1/2400 mm 闪耀角: $2^\circ C$	入射角 ϕ 85.39° r_m 3315 mm r_s 30.5 mm P 380 mm P' 205 mm \bar{P}' 379 mm
入射角: 87.7° 缝宽: $5\sim 40 \mu\text{m}$	放大率 I 1 消像散波长 32.5 nm

三、实验和结果

实验在上海光机所千兆瓦高功率钕玻璃激光装置上进行, 该装置输出 $1.06 \mu\text{m}$ 激光脉冲能量约为 10 J, 脉宽约为 7 ns。水平方向输出的光束经柱面透镜(半径为 200 mm)和 $F/1$ 非球面透镜(焦距为 60 mm)系统被聚焦在平面靶上, 形成了宽度约为 $100 \mu\text{m}$ 、长度约 4 mm 的线状等离子体(在水平面里)。为获得靶面法线方向的空间分辨光谱, 我们采用了水平入射狭缝。激光等离子体被环面镜形成两个像散像, 水平像散像位于谱仪水平入射缝上, 其形状近似抛物线, 抛物线的顶点位于水平入射缝的中央; 垂直像散像经光栅反射后落在波长为 λ 的衍射像上。由于环面镜的作用, 结果在波长 λ 处沿靶面法线方向形成了一个消像散的单色像, 获得了该波长及其附近的空間分辨光谱。改变环面镜与谱仪和光源间的距离, 同时调节环面镜上的入射角 ϕ , 可以改变 P 、 P' 和 \bar{P}' 的数值, 从而获得其他波长上的消像散像。环面镜上入射角 ϕ 的选择主要考虑在所拍摄的最短波长处仍有较高的反射率, 一般都在 85° 以上。在系统的调整过程中采用 He-Ne 激光作为模拟光源。这样对一定的波长, 系统的空间分辨和效率都可以调到较好的状态。

摄谱所用的底片是上海感光胶片厂提供的无保护层 P-5F 医用 X 光软片。这种底片对 3 nm 以上的 XUV 辐射响应比普通的 P-5F 医用 X 光软片有很大的提高。但底片的灵敏度还是不够高, 而且单发激光能量也较低, 因此在实验中采用了较宽的入射狭缝并作多发积分记录。

在上述实验条件下我们获得了碳、镁、铝、硅和钼的激光等离子体空间分辨 XUV 光谱。图 3 给出了碳激光等离子体的光谱照片及其测微光度计扫描径迹。由光谱图可以清晰看到类氢

和类氦碳离子的主要线系及其复合连续谱。光谱在 3.25 nm 为中心的 $\pm 1 \text{ nm}$ 波长范围里有很好的空间分辨能力。等离子体羽相当长, 最远可达 10 mm 左右; 不同谱线有长短不同的空间发射区域, 而连续谱主要由靠近靶面的高温和高密度区所发射。

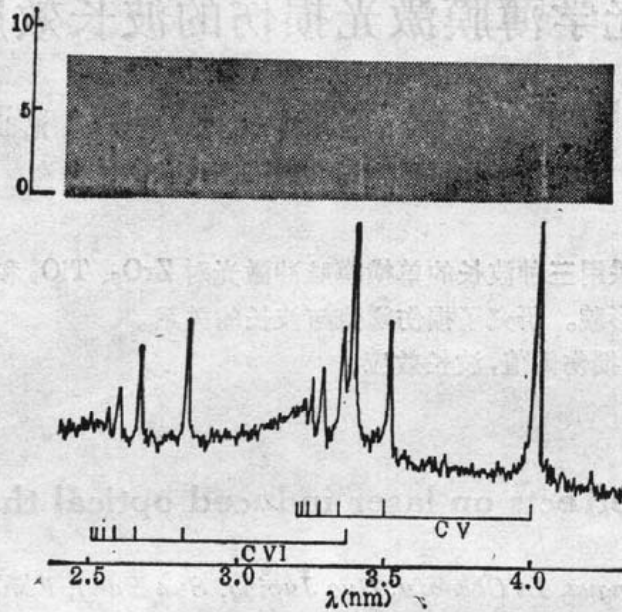


图 3 碳激光等离子体空间分辨 XUV 光谱照片(上)及其显微密度计的扫描径迹(下)

图 4 给出了用 $5 \mu\text{m}$ 入射缝时拍摄的钼激光等离子体的 XUV 光谱, 表明谱仪的光谱分辨约为 0.005 nm 。

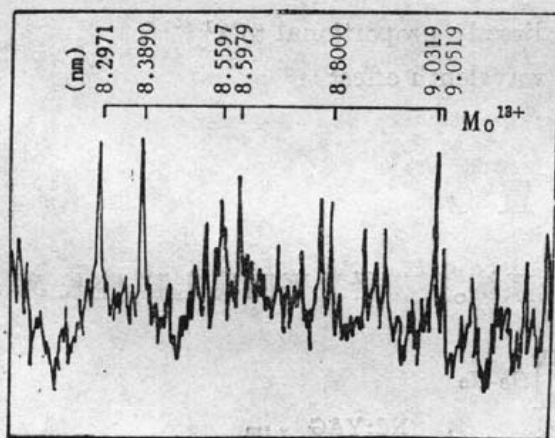


图 4 钼激光等离子体 XUV 光谱
(谱仪的入射狭缝为 $5 \mu\text{m}$)

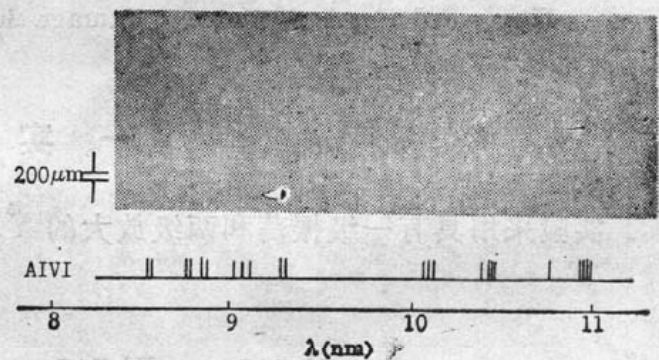


图 5 $200 \mu\text{m}$ 厚铝箔靶激光等离子体 XUV 光谱照片

图 5 是用此系统拍摄的铝箔靶 XUV 光谱照片。铝箔厚度为 $200 \mu\text{m}$, 打靶时铝箔被烧穿, 在箔靶上留下长条状的孔。有趣的是在光谱图上在铝箔前后表面发射区之间有一条宽度相当于铝箔厚度 ($200 \mu\text{m}$) 的未曝光区, 这是由于铝箔前后表面之间的发射被铝箔边缘未烧穿部份遮挡的结果, 表明该系统的近轴空间分辨可达 $50 \mu\text{m}$ 左右。

四、讨 论

在 XUV 光谱区, 除采用环面镜以外, 还可用交叉狭缝技术来获得空间分辨光谱^[5], 即在谱仪入射缝和光栅之间放置另一与谱仪入射缝相互垂直的辅助狭缝。这两种技术各有优缺点。

(下转第 67 页)

输入模式 0110 去读出参考光点时, 得到图 6(a) 的照像结果; 用查表输入模式 0111 去读出参考光点时, 得到图 6(b) 的照像结果; 用查表输入模式 1111 去读出参考光点时, 得到图 6(c) 的照像结果; 用查表输入模式 1011 去读出参考光点时, 得到图 6(d) 的照像结果; 最后用完全匹配的查表输入模式 1001 去读出参考光点时, 得到图 6(e) 的照像结果。完全匹配的图 6(e) 和仅有一位不匹配的图 6(d) 的结果有很大差异, 从照片上可以分辨得十分清楚; 当用光电探测器探测时, 也可以清楚地分辨, 证明这一互补编码的系统是可行的。

参 考 文 献

- 1 A. Huang, Proc. of the 1980 Int. Opt. Comput. Conf, SPIE 232(1980)
- 2 K. Brenner, A. Huang *et al.*, *Appl. Opt.*, **25**(18), 3054(1986)
- 3 C. C. Guest, T. K. Gaylord, *Appl. Opt.*, **19**(7), 1201(1980)
- 4 J. J. Hopfield, Proc. Natl. Acad. Sci. USA79, pp.2554(1982)
- 5 N. H. Farhat *et al.*, *Appl. Opt.*, **24**(10), 1469(1985)
- 6 T. K. Gaylord *et al.*, *Opt. Eng.*, **24**(1), 48(1985)
- 7 M. M. Mirsalehi, T. K. Gaylord, *Appl. Opt.*, **25**(14), 2377(1986)

~~~~~  
(上接第 29 页)

环面镜除补偿掠入射谱仪的像散以外还具有集光作用, 因此系统的接收立体角比较大, 一般可达  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  球面度。对于交叉狭缝系统, 为要达到一定的空间分辨, 狭缝不能太宽, 而光源不能紧靠狭缝, 故接收立体角较小, 一般为  $10^{-6}$  球面度或更小, 系统效率也就较低。此外环面镜还充当光路的中继元件, 使谱仪能远离光源, 这不仅能避免光源中的喷射物对谱仪的损坏, 而且在实际工作中, 当辐射源不能接近时, 带来很多方便。交叉狭缝系统则不然, 谱仪和辐射源要求尽可能靠近, 以达到适当的接收立体角。

然而环面镜系统仅对某一波长及其附近区域, 而不是对所有波长能同时达到消像散的目的。为要在另一波长上达到消像散, 必须重新安置和调整环面镜。此外由于其空间分辨能力随离子午面距离的增加而下降, 它不适用于广光源; 在这方面交叉狭缝系统显示出它的优越性。这种类似小孔成像系统的像差很小, 所以不仅适用于广光源, 在较大的空间范围里保持相同的空间分辨能力, 而且在整个光谱范围里同时在各个波长上获得相同的空间分辨能力。

作者对上海感光胶片厂宋建时和张良梅等提供的无保护层 X 光底片表示深切的感谢。

### 参 考 文 献

- 1 J. A. R. Samson, *Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy*, New York, J. Wiley & Sons, 1967, p.14
- 2 W. A. Rense, T. Violet, *JOSA*, **49**, 139(1959)
- 3 G. Tondello, *Opt. Acta*, **26**, 357(1979)
- 4 张正泉 *et al.*, *光学学报*, **8**, 762(1988)
- 5 G. Tondello, E. Jannitti *et al.*, *Phys. Rev.*, **A16**, 1705(1977)