

掠入射一维空间分辨光栅谱仪的特性及应用*

范品忠 张正泉 李儒新 王晓方 项惠珠 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 描述了可在 XUV 光谱区获得消像散光谱的掠入射一维空间分辨光栅谱仪的原理, 特别是作为光谱仪前置集光及像散补偿的掠入射反射光学系统的特性, 并给出了成像光谱仪的空间分辨能力的实测方法和测量结果, 实验值与用光线追踪模拟的结果相符. 文中还简述了该一维空间分辨光栅谱仪在激光等离子体诊断和 X 射线激光研究中的具体应用.

关键词 空间分辨, 光栅谱仪, XUV 光谱.

1 引 言

在激光核聚变和 X 射线激光的研究中, 获得聚爆靶丸或线聚焦激光等离子体的时间分辨和空间分辨光谱非常重要, 因为由此可以推出有关等离子体状态的时间演变和空间分布的知识. 因此既具有时间分辨能力又具有空间分辨能力的光谱诊断仪器对于激光等离子体诊断是必不可少的. 例如在以激光等离子体为增益介质的 X 射线激光实验中, 放大的自发辐射 (ASE) 仅仅出现在一定的空间区域和时间间隔中, 而连续谱和非激射谱线的发射可能拓展在较大的空间范围并持续较长的时间. 除非激射谱线有较大的增益, 在空间积分和时间积分光谱中, ASE 讯号可能淹没在强连续谱和无放大的线谱背景中. 为了将 ASE 讯号从很强的背景中提取出来, 时空分辨光谱是极为重要的, 由此可推得激射介质的状态参数以及有关能级集居数和增益系数的时间演变和空间分布.

空间分辨光谱仪是时空分辨测量的前提和基础, 本文描述了在 XUV 光谱区获得消像散光谱的掠入射一维空间分辨光栅谱仪的特性, 特别是光谱仪的前置集光及像散补偿的掠入射反射光学系统, 并给出了成像光谱仪的空间分辨率的实测方法和测量结果, 采用光线追踪程序模拟研究了这种一维成像光学系统的空间分辨率, 还比较了几种获得空间分辨光谱的方法的优缺点. 简述了该一维空间分辨光栅谱仪在激光等离子体诊断和 X 射线激光研究中的具体应用, 包括谱仪参数和谱线波长的精确测定、X 射线激光增益的空间分布以及时空分辨光谱的测量方法.

* 本工作得到国家自然科学基金和国家 863 高科技项目的资助.

收稿日期: 1994 年 1 月 7 日

2 一维空间分辨的光栅光谱仪

实验中采用了两种一维空间分辨光栅光谱仪, 即由前置光学系统加等栅距球面光栅构成的消像散掠入射罗兰圆光栅光谱仪和由前置光学系统加变栅距平场光栅构成的消像散掠入射平场光栅光谱仪。

在 1~30 nm 短波长波段(XUV)通常采用凹面光栅作为色散元件。由于正入射反射率随着波长的变短而急剧下降(未采用多层介质膜情况下), 设计光谱仪时一般采用大入射角结构, 即采用接近临界全反射的掠入射方式来增加光栅的反射率, 从而提高凹面光栅在 XUV 光谱段的衍射效率。然而掠入射光栅谱仪本身存在着严重的像散性, 即光源(或谱仪狭缝)上的一个点对应于衍射像平面上的一条线, 点源的像沿与色散方向相垂直的方向上弥散开来, 这不仅使谱仪的效率下降, 而且使光源上各点的衍射像相互重叠。因此, 与可见光和 UV 光谱段正入射光谱仪不同, 掠入射光栅谱仪本身不能产生光源的单色消像散像, 使掠入射谱仪丧失了空间分辨能力。

光栅理论^[1]指出, 为使光栅的垂直聚焦焦线落在罗兰圆上, 要求光源是一个位于光栅后面的虚点源, 即要求以会聚光束的形式投射到光栅上, 而不是像子午面里那样光源位于罗兰圆上的入射狭缝上并以发散光束的形式投射到光栅上去。这种在光栅子午面内用发散光束, 在弧矢面里用会聚光束照明光栅的要求能用一个超环面镜来实现^[2]。自然, 亦可以用相互正交的两块柱面反射镜(或一块球面反射镜和一块柱面反射镜^[3])组合来实现像散的补偿。当采用两块柱面反射镜组合成的前置光学系统, 它和超环面镜的作用是完全等价的。为加工方便一般采用一块柱面反射镜和一块球面反射镜组合成的前置光学系统时, 它和超环面镜的作用也是完全等价的。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。

前面提到的第二种一维空间分辨的光栅光谱仪, 即消像散掠入射平场光栅光谱仪较之于消像散掠入射罗兰圆光栅光谱仪有一新特点: 在平场光栅谱仪覆盖的整个光谱范围均能同时获得空间分辨光谱, 而消像散掠入射罗兰圆光栅谱仪仅在设定波长附近一段范围内有较好的空间分辨能力。这是因为, 变栅距光栅的衍射焦距随波长变化不大, 当波长从 5 nm 变到 30 nm 时, 衍射焦距变化不到 3%, 绝对变化仅为 6.5 mm^[3], 因此当借助于前置光学系统时, 可在整个平焦场上同时获得消像散光谱。

3 空间分辨率的光线追踪模拟

如前所述, 几种前置光学系统在像散补偿原理上是等价的, 限于篇幅下面仅介绍关于柱面镜加球面镜组合与平场光栅耦合的模拟研究结果。计算中采用的柱面镜, 球面镜和谱仪狭缝的结构和位置参数如表 1 所示, 其它谱仪参数见文献[3], 坐标系如图 1 所示。取狭缝的上边沿与前置光学系统所成弯月形子午像内凹顶点相切。采

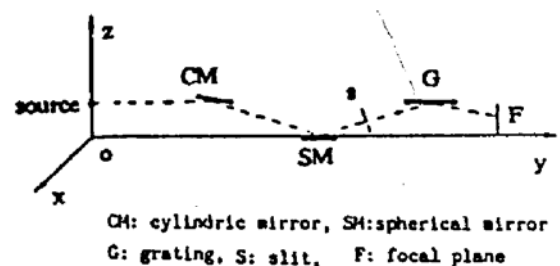


Fig. 1 The coordinate system used in ray-tracing simulation

用的光源模型为各向同性的点源, 入射软 X 射线波长取为 10 nm, 相应的 Au 表面的光学常数为 $n=0.946774$, $k=0.017687^{[4]}$.

Table 1 The parameters of imaging elements of the stigmatic grazing-incidence flat-field grating spectrograph

radius of curvature of cylindric mirror	radius of curvature of spherical mirror	angle of incidence on cylindric mirror	objective distance of cylindric mirror	distance between two mirrors	distance between entrance slit and spherical mirror
20 (mm)	5000 (mm)	$\sim 88^\circ$	415 (mm)	122 (mm)	160 (mm)

该光学系统的空间分辨能力主要由弧矢像特性决定. 作者研究了该系统对一长为 40 mm 高为 150 μm 的柱形光源(中点在成像系统的瞄准点, 长度沿主光轴方向)所成的弧矢像沿宽度方向的分辨率, 由如图 2 所示的像强度分布, 得出的半高全宽为 24 μm ; 当光源偏离子午面达 250 μm 时, 由如图 3 所示的像强度分布, 可见半高宽变为 33 μm , 显然, 当研究宽度为 mm 量级的长圆柱形光源时, 该谱仪能提供足够好的空间分辨能力.

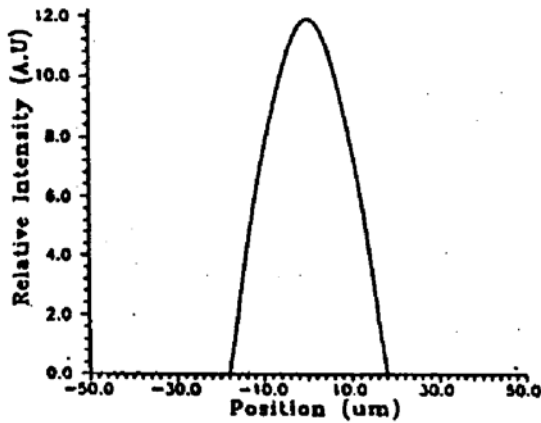


Fig. 2 The intensity distribution along space-resolved direction of the image of a cylindrical source on the meridional plane

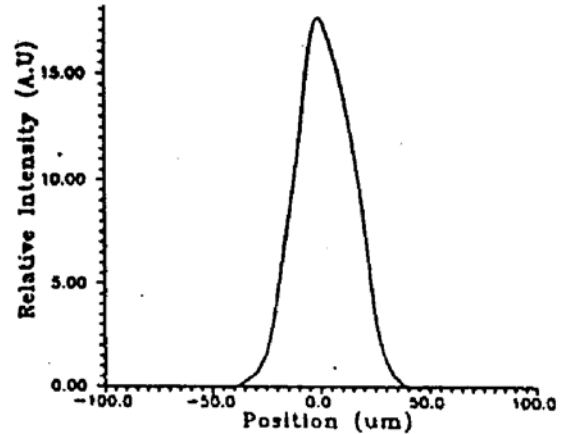


Fig. 3 The intensity distribution along the space-resolved direction of the image of a cylindrical source at 250 μm away from the meridional plane

4 空间分辨率的实验测量

关于超环面镜作为前置光学系统时的有关实验结果已在文献[5]中给出. 该一维成像系统的空间分辨能力优于 50 μm , 下面介绍采用两体结构的实验结果.

实验是在上海光机所激光 12# 装置上进行的. 有关实验布局与以前文献[5]类似, 打靶激光北路运行, 激光波长为 1.053 μm , 入射到靶面的激光能量约为 30~50 J, 激光脉宽约为 110 ps. 实验中消像散掠入射平场光栅谱仪中一维成像光学元件的结构参数如表 1 所示. 为测量系统的空间分辨能力和成像放大率, 可以采用阶梯靶和靶面移动双曝光技术. 其示意图如图 4 所示.

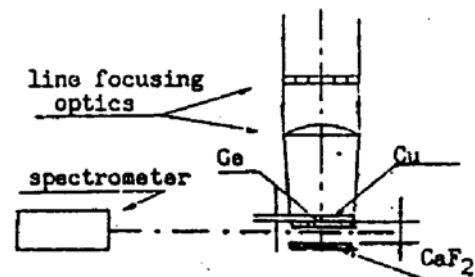


Fig. 4 The schematic set-up for measuring the spatial resolution

采用的靶材分别为氟化钙块状靶和锗铜阶梯靶, 激光两次打靶(两次打靶中靶面前后位置移动一定量), 底片两次曝光. 这样, 在获得的光谱照片中就有三条连续谱边界(代表靶面位置), 由连续谱边界的陡度和三个边界的间距就可估算系统的分辨率和放大率. 典型的光谱照片如图 5 所示, 可见在整个摄谱范围内, 都可以明显地区分氟化钙靶、锗靶和铜靶发射的三条连续谱边界, 即三个靶面位置, 也就是说, 在整个摄谱范围内, 都可以得到良好的空间分辨光谱. 对光谱照片沿垂直于色散方向的黑度扫描径迹如图 6 所示, 可知成像系统的分辨能力和放大率分别为优于 $35 \mu\text{m}$ (在至少 $500 \mu\text{m}$ 的空间范围内)和 2.1 倍. 实验结果与模拟研究结果相符.

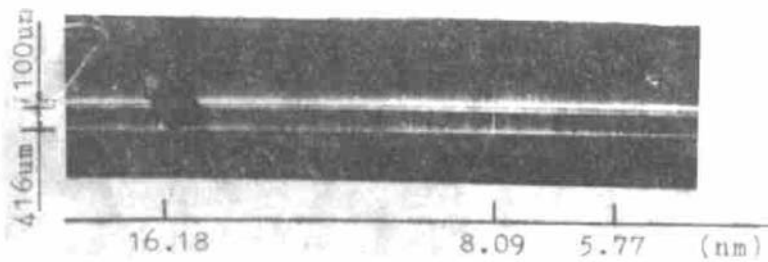


Fig. 5 The typical spectral photo for measuring the spatial resolution

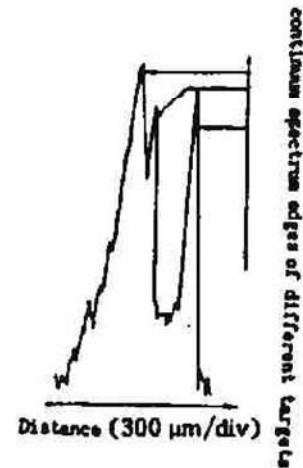


Fig. 6 The microdensitometer trace of the spectrum (scanning along the direction perpendicular to dispersion direction)

5 几种获得空间分辨光谱的方法的比较

在工作于 XUV 光谱区的掠入射光栅光栅谱仪中, 除采用反射镜前置光学系统以外, 还可用交叉狭缝技术^[6]来获得空间分辨光谱, 即在谱仪入射狭缝与光栅之间放置另一个与谱仪入射狭缝相互垂直的辅助狭缝. 比较的结果如下:

1) 用交叉狭缝技术来获得空间分辨光谱类似于小孔成像, 像差小, 能在较大的空间范围内保持相同的分辨率, 适用于扩展光源的成像, 但为了达到一定的分辨率, 狭缝不能太宽且离光源不能太远, 这就导致谱仪的效率较低且很容易被等离子体光源的喷射物损坏.

2) 采用反射镜前置光学系统来获得空间分辨光谱, 由于反射镜的集光作用可以在实现空间分辨的同时提高谱仪的效率. 此外, 变栅距平场光栅的出现, 使采用反射镜前置光学系统的方法与交叉狭缝技术一样, 可以在整个摄谱范围内同时得到良好的空间分辨光谱, 克服了消像散掠入射罗兰圆光栅光栅谱仪在这一方面的不足.

3) 不同的反射镜前置光学系统(超环面镜与柱面镜加球面镜两体结构)在实验中也应区别使用. 两体结构易于制造, 面形精度高, 易于接近理论分辨能力. 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, 并且在结构上有较大灵活性, 可以实现多种几何布局; 但由于两次反射带来更多的反射和散射损耗. 而超环面镜单体结构体积小, 单次反射, 反射和散射损耗均小, 适用于短波区.

6 应用举例

6.1 谱仪参数和谱线波长的精确测定

前面提到的靶面移动双曝光技术可以用于谱仪参数和谱线波长的精确测定, 即把发射光谱已经辨认的某种靶的等离子体辐射和待研究的另一种靶的等离子体辐射记录在同一底片上, 由于谱仪具有空间分辨能力, 可以使两套谱不重叠, 然后用已知的谱线波长去推谱仪系统的结构参数, 再用精确的结构参数去求待测的谱线波长. 以图 5 的光谱照片为例, 其中在波长轴上标明的 5.77 nm, 8.09 nm 和 16.18 nm 位置分别对应 Ca^{17+} 离子 4f-3d 跃迁谱线和 F^{8+} 离子 H α 跃迁谱线的一级和二级谱, 由这些波长值就可以推算氟化钙靶、锆靶和铜靶的其它发射谱线波长. 当谱仪采用更高谱分辨率的光栅时, 这种方法可用来研究光泵机制 X 射激光的线对匹配情况. 显然这种谱仪参数和谱线波长的精确测定的方法比采用掺杂手段来设置波长标尺更为优越.

6.2 X 射线激光增益的空间分布的测量

作者利用一维空间分辨的光栅光谱仪在 X 射线激光增益的空间分布的测量方面已经获得一系列重要结果, 在此仅给出一些新结果, 详细的实验安排参见文献[7], 在此不再赘述. 作者比较了长脉冲(约 900 ps)和短脉冲(约 110 ps)激光驱动的类型锂离子复合 X 射线激光增益的空间特性, 结果如图 7 所示, 显然短脉冲驱动下增益的峰值位置更靠近靶面且增益更大, 而增益的空间范围更窄.

6.3 时空分辨光谱的测量方法

在消像散掠入射平场光栅光谱仪的光谱焦面上放上 X 光条纹相机的光阴极并使阴极狭缝的长度方向平行于光栅的色散方向. 这样由条纹相机扫描得出的光谱就是阴极狭缝位置所对应的等离子体某一区域的发射的时间分辨光谱. 若消像散掠入射平场光栅光谱仪的空间分辨方向是沿靶面法向, 则通过前后移动靶面和打靶激光聚焦光学系统, 即等效于在谱仪焦面上移动阴极狭缝, 可以获得沿靶面法向不同区域的发射的时间分辨光谱(示意图见图 8), 归纳一系列测量的结果则可得出整个等离子体区域的时空分辨光谱. 这对于研究激光等离子体发射的动力学过程意义很大.

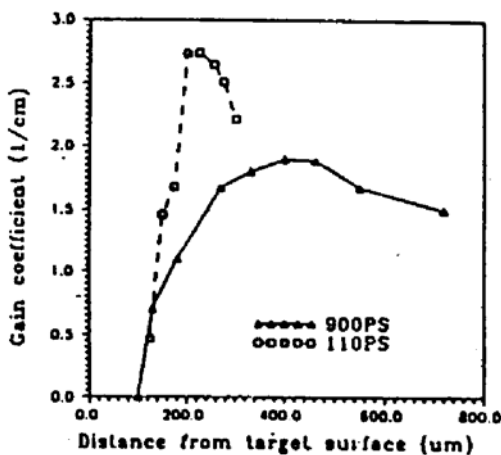


Fig. 7 The schematic set-up for time-resolving and space-resolving spectrum measurement

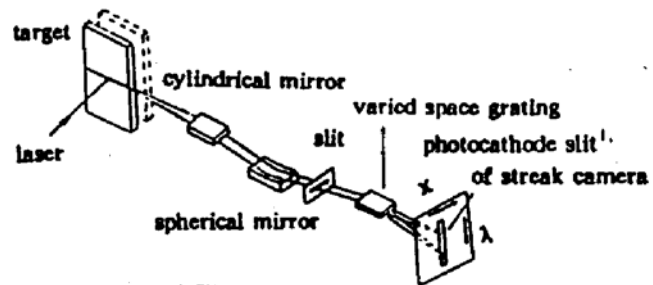


Fig. 8 The spatial distribution of the gain coefficients of Li-like Si ion 5f-3d transition driven by long-pulse and short-pulse laser. Solid curve; for the case of long-pulse, Dash curve; for the case of short-pulse

结 论 1) 描述了可在 XUV 光谱区获得消像散光谱的一维空间分辨光栅谱仪的原理, 特别是光谱仪的前置集光及像散补偿的掠入射反射光学系统的特性.

2) 用阶梯靶和靶面移动双曝光技术测量了一维成像光谱仪的空间分辨率和放大倍数, 测量结果表明空间分辨率优于 $35 \mu\text{m}$, 实验值与用光线追踪模拟的结果相符.

3) 比较了采用反射镜前置光学系统和采用交叉狭缝技术来获得空间分辨光谱的优缺点, 表明前一种方法更具优越性.

4) 简述了该一维空间分辨光栅谱仪在谱仪参数和谱线波长的精确测定、X 射线激光增益的空间分布以及时空分辨光谱的测量中的具体应用.

本文作者衷心感谢 LF12# 运行组的密切配合, 以及陆培祥副研和韩中生研究员的有益讨论与技术协助.

参 考 文 献

- [1] J. A. R. Samson, *Technique of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy*, New York, J. Wiley & Sons, 1967, 14
- [2] G. Tondello, The use of a toroidal mirror as a focusing element for a stigmatic grazing incidence spectrometer. *Optica Acta*, 1979, 26(3): 357
- [3] Pinzhong Fan, Zhengquan Zhang, Jinzhi Zhou, Stigmatic grazing-incidence flat field grating spectrograph. *Appl. Opt.*, 1992, 31(31): 2720
- [4] D. L. Windt, W. C. Cash Jr., M. Scott *et al.*, Optical constants for thin films of C, diamond, Al, Si and CVD SiC from 2.4 nm to 121.6 nm. *Appl. Opt.*, 1988, 27(2): 279
- [5] Zhizhan Xu, Zhengquan Zhang, Pinzhong Fan *et al.*, Soft X-ray amplification by Li-like Al^{11+} and Si ions in recombination plasma. *Appl. Phys. (B)*, 1990, 50(4): 147
- [6] G. Tondello, E. Jannitti, A. M. Malvezzi, Line broadening and self-absorption of Be IV in laser-produced plasma. *Phys. Rev. (A)*, 1977, A16(4): 1705
- [7] Zhizhan Xu, Zhengquan Zhang, Pinzhong Fan *et al.*, Investigation of Li-like Si ion recombination laser and plasma nonuniformity. *Appl. Phys. (B)*, 1993, 57(6): 319

Characteristics and Applications of Space-Resolving Grating Spectrographs

Fan Pinzhong Zhang Zhengquan Li Ruxin Wang Xiaofang
Xiang Huizhu Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 7 January 1994)

Abstract The principle and characteristics of the space-resolving grating spectrograph are described in this paper, emphasis on the pre-optics for collecting radiation and compensating for astigmatism. The method for measuring the spatial resolution and the results obtained are presented and the well agreement is found between the experimental results and the ray-tracing simulation results. Applications of the spectrograph in laser-produced plasma spectroscopy and X-ray laser study are discussed briefly.

Key words space-resolution, grating spectrographs, XUV spectra.