

文章编号: 1001-4322(2002)05-0727-04

## 时空分辨平焦场光栅谱仪\*

王耀梅, 杨家敏, 丁耀南, 张继彦, 张文海

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 利用 2 400 线/mm 或 1 200 线/mm 的平焦场光栅谱仪、门控宽微带 X 光单分幅相机及可见光 CCD 记录系统建立了一套时空分辨平焦场谱仪 X 光谱诊断系统。介绍了该谱仪系统的结构、工作原理和实验调试方法。利用该谱仪在星光激光装置上进行了时间分辨铝等离子体发射谱线的实验测量,获得了清晰的时间分辨铝等离子体谱线。在神光 装置上初步观测到了时空分辨铝样品吸收谱,谱分辨为 0.02 ~ 0.05nm。

**关键词:** X 光吸收谱; 诊断技术; 时空分辨谱

**中图分类号:** TL817.1 **文献标识码:** A

在激光惯性约束聚变(ICF)、X 射线激光(XRL)及原子参数实验研究中,时间、空间分辨的 X 光能谱对了解其中的物理过程提供了大量准确有用的信息,例如在辐射不透明度这一基础课题的实验研究中,由于辐射不透明度强烈依赖于物质状态,而通过辐射加热物质达到的高温物质状态又是随时间变化很快的,同时高温物质状态本身又要通过自发辐射发射 X 光,因此,要进行辐射不透明度的准确定量研究,必须发展具有时间分辨和高能谱分辨的诊断设备。

近年来,国外利用平场光栅谱仪配门控分幅相机系统已经发展了时空能谱分辨的 X 光诊断技术<sup>[1]</sup>,由于门控分幅相机线性动态范围较大,适宜开展 X 光的定量测量。国外利用该诊断技术成功开展了辐射不透明度的实验研究,获得了较好的物理实验结果。在 ICF 实验研究中为了满足辐射不透明度和辐射烧蚀实验诊断要求,从 1996 年开始我们采用门控 MCP 单门控分幅相机发展了时空和高能谱分辨的 X 光诊断技术,近一二年已利用该诊断技术初步开展了部分物理研究工作。

### 1 时空分辨平焦场光栅谱仪系统结构及原理

谱仪系统结构如图 1 所示,该系统由狭缝、平场光栅谱仪、X 光单门控分幅相机及耦合镜头配可见光 CCD 记录系统(或紧贴可见光胶片记录暗盒)组成。其中成像狭缝是 20 $\mu$ m 宽,保证了 X 光的空间分辨;平焦场谱仪实现光谱分辨,谱仪采用 2 400 线/mm 和 1 200 线/mm 两种平场光栅,分别实现了 1 ~ 5nm 和 5 ~ 30nm 波长范围的光谱分辨测量;单门控分幅相机实现时间分辨,MCP 微带宽度为 12mm,长度为 40mm,对应的曝光时间为 100ps;分幅相机输出图象通过耦合镜头耦合到可见光 CCD 灵敏面上,并被记录。

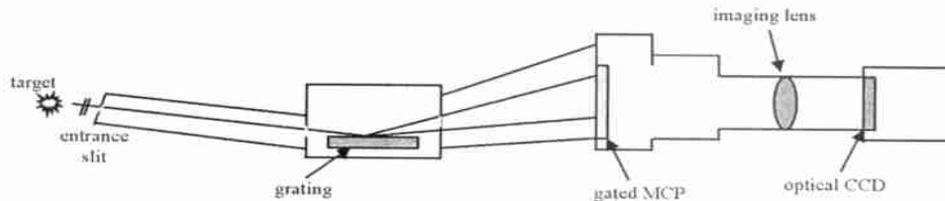


Fig. 1 Schematic structure of time- and space-resolved flat-field grating spectrometer

图 1 时空分辨平焦场光栅谱仪系统结构示意图

#### 1.1 平焦场光栅谱仪测谱原理<sup>[2~7]</sup>

由于等间距反射光栅分辨的光谱是一个罗兰圆面,不利于在 MCP 上记录,因此谱仪采用变栅距光栅将罗兰圆面修正为平面,易于 MCP 记录。谱仪的测谱原理如图 2 所示,入射狭缝至光栅中心 O 距离为 237mm,对标称线数为 2400 线/mm 的平焦场光栅,当入射角  $\theta = 88.65^\circ$  时,在光栅中心另一侧 235mm 并垂直于光栅中

\* 收稿日期:2002-02-19; 修订日期:2002-05-23

基金项目:国家 863 惯性约束聚变领域 804-3 专题资助课题;国家自然科学基金(10175056)资助课题  
作者简介:王耀梅(1964-),女,助理工程师,从事惯性约束聚变物理诊断工作;绵阳市 919-986 信箱。

心切线的平面内对 1~5nm 波长范围的 X 光形成焦平面;对标称线数为 1 200 线/mm 的平焦场光栅,当入射角为  $\alpha = 87^\circ$  时,在光栅中心另一侧 235mm 并垂直于光栅中心切线的平面内对 5~30nm 波长范围的 X 光形成焦平面。将门控分幅相机的光阴极准确置于焦平面处,门控分幅相机的输出采用可见光胶片或者可见光 CCD 记录。平焦场光栅谱仪焦平面上记录的 X 光谱线波长  $\lambda$  与谱线位置  $x$  的关系为

$$\lambda = d_0(\sin \alpha - \sin \beta), \quad x = 235 \cot \alpha \quad (1)$$

式中:  $d_0$  为平焦场光栅标称周期;  $\alpha$  为入射角;  $\beta$  为出射角。

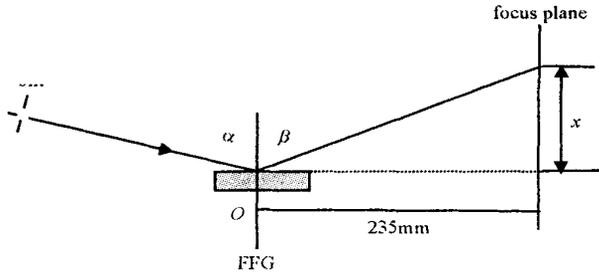


Fig. 2 Principle of the flat-field grating spectrometer

图2 平焦场光栅谱仪测谱原理图

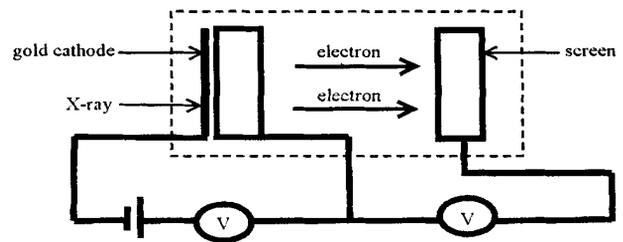


Fig. 3 Schematic structure of the gated-MCP

图3 MCP变像管结构示意图

## 1.2 宽带单门控分幅相机工作原理

X 光经平场光栅色散后到达分幅相机金微带上,单门控分幅相机将 X 光信号转换成光信号输出在荧光屏上。选用宽带的 MCP(宽 12mm,长 40mm),测谱面积大,利于测谱及加空间分辨。宽带单门控分幅相机(gated MCP)是由 MCP 选通管、ps 高压脉冲发生器和图像记录装置三部分组成。如图 3 所示,MCP 选通管是由宽微带的 MCP 和高场强荧光屏组成,Au 微带作为 X 射线光阴极,同时又为 MCP 电极,发生器输出一个高电压窄脉冲,该脉冲沿微带传输,从而产生增益,并有效启动微带特定区域,此时如 MCP 微带光阴极上有 X 光辐照,将通过光电转换将 X 光转换为光电子,这些光电子像通过 MCP 增强,到达荧光屏形成图像输出由 CCD 记录系统记录。一旦选通脉冲通过微带特定区域之后,则该区域处于关闭状态。

## 2 时空分辨平焦场光栅谱仪调整

### 2.1 平场光栅谱仪调整

平焦场光栅的掠入射角非常小,所以谱仪使用前必须在实验室对入射角进行精密的调节。调整布置如图 4 所示。首先在谱仪入射方向将入射狭缝、光栅面及一台激光经纬仪光轴调整在一个平面内;然后利用另一台激光经纬仪输出一束激光照射在平场光栅面中心,调整激光经纬仪光轴方向,使其与光栅面垂直。在距光栅面中心 O 点一定距离  $d$  放置一个带可移动的反射镜的标尺,调整标尺方向使标尺垂直于激光束。然后移开标尺上的反射镜,调整光栅角度使经光栅反射后在标尺上的激光光斑与入射在标尺上的光斑距离为  $L = d \tan 2(90^\circ - \alpha)$ ,其中  $\alpha$  为要调整的光栅入射角。通过上述过程即完成平焦场光栅谱仪的入射角调整。

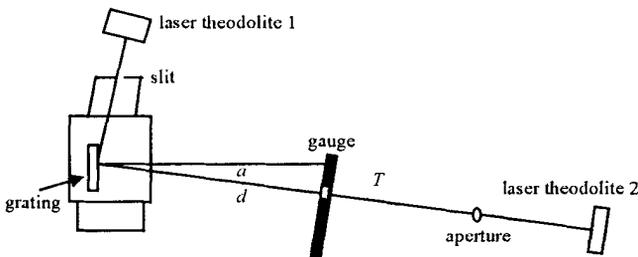


Fig. 4 Arrangement for adjustment of the flat-field grating spectrometer

图4 平场光栅谱仪入射角调整布置

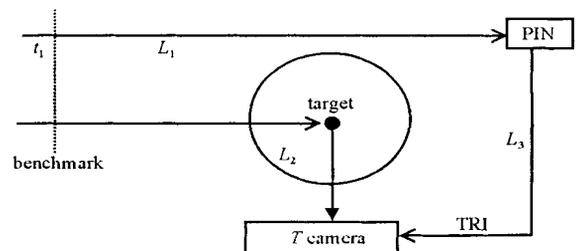


Fig. 5 Adjustment for synchronization of the gated-MCP with the X-ray emission from the target

图5 相机同步延迟时间的调整

### 2.2 门控 MCP 触发同步调节

单门控 MCP 实验测量布置如图 5 所示,PIN 输出的触发信号经过电缆接到电控箱触发输入端,其中  $t_1$  为基准点处触发光超前主激光的时间, $L_1$  为从基准点到 PIN 光电二极管接收面的距离, $L_2$  为从基准点至靶室中心再到分幅管阴极中心的距离之和, $L_3$  为 PIN 至电控箱的电缆长度, $T$  为相机的固有延迟时间(电控箱选

通脉冲输出至分幅管电缆长度 0.5m,约 26ns),  $t$  为延时器的延迟时间。则有表达式  $10L_1/3 + 5L_3 + T + t - t_1 = 10L_2/3$ ; 由此可计算得到需要在门控 MCP 电控箱上再加上的延时器延迟时间为  $t = t_1 + 10(L_2 - L_1)/3 - T - 5L_3$ 。

### 3 平焦场光栅谱仪应用

在星光激光装置上,利用 2 400 线/mm 平场光栅测量了 Al 等离子体时间分辨的发射谱线,典型的记录谱图像如图 6 所示,对图 6 在谱线宽度方向积分获得谱线相对强度和位置曲线,并进行耦合镜头放大倍数修正(耦合镜头放大倍数为 0.496 8),得到 Al 等离子体辐射光谱强度分布,根据式(1)和(2)将谱线位置转换为谱线波长。转换的典型结果如图 7 所示。

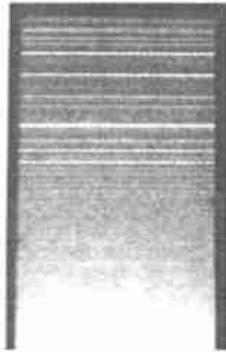


Fig. 6 Typical image of Al X-ray emission measured with 2 400 lp/mm flat-field grating spectrometer  
图 6 2 400 线每毫米的平场光栅谱仪测量的时间分辨铝等离子体发射谱线典型图像

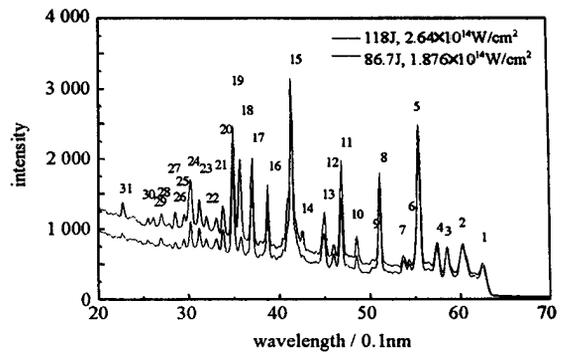


Fig. 7 X-ray emission spectrum from Al plasma  
图 7 2 400 线每毫米的平场光栅谱仪测量的时间分辨铝等离子体发射相对强度线谱

在神光 激光装置上,采用 1 200 线/mm 时间分辨的平场光栅谱仪测量得到的腔源谱和 500nm 厚铝样品的透过谱记录图像典型结果见图 8,9,通过数据处理得到该样品的吸收谱结果如图 10 所示。

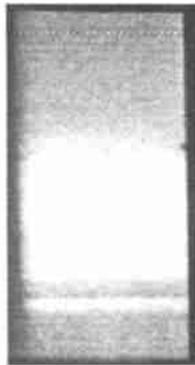


Fig. 8 X-ray source image  
图 8 源谱记录图像



Fig. 9 Transmission spectrum of Al sample  
图 9 铝样品透过谱

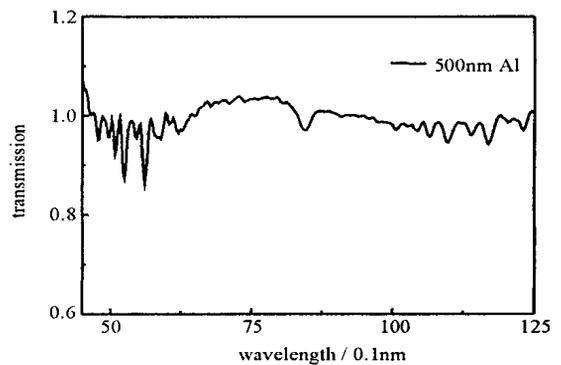


Fig. 10 X-ray absorption spectrum of 500nm-thick Al sample  
图 10 时间分辨平场光栅谱仪测量得到的 500nm 厚铝样品吸收谱结果

利用平焦场光栅谱仪、宽微带单门控 X 光分幅相机及可见光 CCD 记录系统建立了时空高谱分辨的 X 光诊断系统。通过对谱仪系统的调整,利用该谱仪系统测量获得了激光辐照铝产生的时间分辨的清晰的等离子体发射谱线,并对谱线波长进行了辨认。该谱仪谱分辨 0.02 ~ 0.03nm,空间不均匀性 10%,耦合镜头放大倍数 0.496 8, MCP 线性动态范围大于 100,单门控分幅相机曝光时间 100ps。打靶实验测量表明,该谱仪具有系统调整方便,测量时间范围灵活可调,成像无空间畸变,搞干扰能力强等特点。适用于开展 ICF 研究中时空分辨的 X 光谱线测量。

### 参考文献:

[1] Springer P T, Fields D J, Wilson B G, et al. Spectroscopic absorption measurements of an iron plasma[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **69**(26): 3735.  
[2] Harada T, Kita T. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings[J]. *Applied Optics*, 1980, **19**(23): 3987.

- [3] Nakano N, Kuroda H, Harada T. Development of a flat-field grazing-incidence XUV spectrometer and its application in picosecond XUV spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(14):2386.
- [4] Kiehn G P, Willi O, Damerell A R, et al. Novel time-resolved VUV spectrograph for X-ray laser research[J]. *Applied Optics*, 1987, **26**(3):425.
- [5] Kita T, Harada T, Nakano N, et al. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings for a flat-field grazing-incidence spectrograph[J]. *Applied Optics*, 1983, **22**(4):512.
- [6] 倪元龙, 毛楚生, 吴江, 等. 平焦场光栅光谱仪[J]. *强激光与粒子束*, 1991, **3**(2):242. (Ni Y L, Mao C S, Wu J, et al. Flat field grating spectrometer. *High Power Laser and Particle Beams*, 1991, **3**(2):242)
- [7] 范品忠, 张正全. X射线平晶谱仪色散曲线和波长的确定[J]. *中国激光*, 1991, **18**(2):351. (Fan P Z, Zhang Z Q. Determination of wavelength and dispersive curve of the X-ray crystal spectrometer. *Chinese Journal of Lasers*, 1991, **18**(2):351)

## Time-and space-resolved flat-field grating spectrometer

WANG Yao-mei, YANG Jia-min, DING Yao-nan, ZHANG Ji-yan, ZHANG Wen-hai  
(*Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China*)

**Abstract:** A time- and space-resolved flat-grating spectrometer is developed. It is composed of a varied line-space grating with 2 400 lp/mm or 1 200 lp/mm, a gated MCP framing camera and an optical CCD system. The principle, the construction and adjustment method of the spectrometer are presented. With this spectrometer the time-resolved emission spectrum of Al plasma are measured in "Xing-guang" laser facility and the time- and space-resolved absorption spectrum of Al plasma is observed in "Shen-guang" laser facility respectively. The spectrum resolution is about 0.02~0.05nm.

**Key words:** X-ray absorption spectrum; diagnostic technique; time- and space-resolved spectrum