

平焦场光栅光谱仪的新用法

刘亚青 范品忠 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学实验室, 上海 201800)

摘 要 计算发现, 当平焦场光栅光谱仪的光源位置任意变化时, 总能通过改变光栅的入射角, 保持光谱焦平面到光栅的距离基本不变。以此为依据提出了平焦场光栅光谱仪的新用法, 使得该谱仪使用灵活, 适应性强, 在极紫外和软 X 射线光谱学的有关实验中发挥更大的作用。谱仪的摄谱范围在5~ 40 nm 之间。

关键词 变间距光栅, 平场谱仪, 极紫外和软 X 射线。

1 引 言

X 射线光谱仪是诊断高温等离子体(如放电等离子体, 天体等离子体和激光等离子体等)的温度、密度、以及原子、离子种类和丰度的重要工具之一。同时也是测量 X 射线激光增益系数, 以及气体或固体靶高次谐波级次和效率的主要仪器。对于工作在软 X 射线波段的光栅光谱仪, 用掠入射的方式可以提高光栅的反射率^[1]。传统的掠入射罗兰圆光栅光谱仪由于其光栅、狭缝以及色散光谱的焦平面都必须在罗兰圆上, 为了获得大波段范围内的光谱, 探测器必须与罗兰圆完全重合。对于可弯曲的底片和薄感光干板这是可以做到的, 但对于只有平直感光面的光电探测器如光电二极管阵列、微通道板(MCP)和 X 射线电荷耦合器件(CCD)来说难以满足。于是在80年代初, 一种变间距平焦场光栅光谱仪应运而生^[2-5]。它的色散元件是变间距反射光栅^[6], 其特点是在很大的光谱范围内, 谱线成像在同一平面上, 解决了谱仪和光电探测器之间的耦合问题。但在普通的平焦场光栅光谱仪中, 光源和光谱焦平面到光栅顶点的位置, 即物距和像距, 是固定不变的, 如对 Hitachi 公司的1200 l/mm 变间距球面光栅而言, 物距是237 mm, 像距是235 mm。这大大限制了谱仪的灵活应用。

本文对普通平焦场光栅光谱仪进行了详细计算, 找到了当光源位置变化时, 5~ 40 nm 波段范围内谱线聚焦的特点, 即当光源到光栅顶点的距离在50 mm~ ∞ 的范围内, 总能找到一个合适的入射角, 使得波长在5~ 40 nm 范围内的软 X 射线光谱都成像在一个平面上, 且这个平面和普通平焦场光栅光谱仪一样基本垂直于入射光束, 光谱像平面到光栅顶点的距离保持235 mm 不变。在此基础上本文提出了新的使用该谱仪的方案。

2 普通平焦场光栅光谱仪

普通的平焦场光栅光谱仪一般采用 Hitachi 1200 l/mm 光栅, 对应的入射角是87°, 其光

栅顶点到光源和光谱焦平面的距离分别为237 mm和235 mm。但是,由于要求光源相对于谱仪的位置固定,使得平焦场谱仪的使用受到了限制。比如在有些实验中,光源到光栅的距离本身就小于237 mm,在这种情况下,这种平焦场光栅谱仪的使用受到了限制。在不同的实验室有不同的激光装置和不同的靶室,因此有的谱仪要放在靶室里面,有的谱仪要放在靶室外面。为了不同的实验需要,每个靶室就要安装专用的平焦场谱仪,这使得平焦场谱仪的运用灵活性受到了限制。最近, Neely 等人已经考虑这个问题,并设计了物距为620 mm 的平焦场光栅光谱仪用于他们自己的实验^[7],但该工作仅限于特定的620 mm 物距。

3 不同物距时光谱聚焦的计算结果

采用 Hitachi 公司1200 l/mm 的光栅,其曲率半径为5649 mm,闪耀角为3.2°,表面镀金,面积为50 mm×30 mm,在整个50 mm 的长度范围内刻槽间距从0.690 μm 增加到0.985 μm。光栅顶点处的刻槽数为1200 l/mm。光栅的标准安装入射角为87°,波长在5~20 nm 的光谱可以聚焦在同一平面上^[2,6]。

图1是以变间距反射光栅为色散元件的谱仪结构图。其中S为光源或狭缝,G为变间距

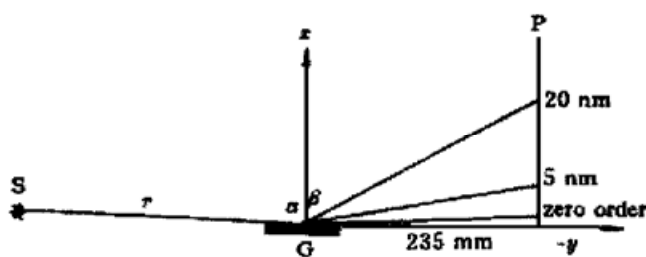


Fig. 1 The schematic diagram of the spectrograph with the variable line-spacing grating as dispersion element

光栅, α 和 β 分别为入射角和衍射角,P为光谱焦平面。在计算中用直角坐标系,坐标原点O位于光栅顶点,x轴沿着光栅的法线方向,y轴垂直于光栅刻槽。在图中,r代表物距,r'代表谱线成像距离。根据色散公式和球面光栅水平面成像公式^[6],可以得到:

$$m\lambda = \sigma_0(\sin\alpha + \sin\beta), \quad (1)$$

$$\frac{\cos^2\alpha}{r} - \frac{\cos\alpha}{R} + \frac{\cos^2\beta}{r'} - \frac{\cos\beta}{R} = \frac{40m\lambda}{\sigma_0R}, \quad (2)$$

(1)式和(2)式描述了色散波长 λ 、入射角 α 、衍射角 β 、物距 r 、像距 r' 、光谱级次 m 、光栅刻槽间距 σ_0 和光栅曲率半径 R 之间的关系。与等间距反射光栅比较,(1)式相同,但(2)式有所不同。对于等间距反射光栅,(2)式右边为0,对于变间距反射光栅等式右边为 $40m\lambda/\sigma_0R$ 。由于这一项的存在,使得一定范围内各波长光谱聚焦在同一平面上。在给定波长、入射角、物距和像距的情况下,光谱成像位置对应的坐标为:

$$y = r' \sin \beta, \quad x = r' \cos \beta. \quad (3)$$

对普通平焦场谱仪, $r = 237$ mm, $\alpha = 87^\circ$,于是5~40 nm 范围内的光谱基本上都成像在 $y = y_0 = -235$ mm 的平面上,而且这个焦平面是垂直于y轴的。这是平焦场谱仪不同于罗兰圆谱仪的地方。

通过(1)式和(2)式,计算了物距从50 mm 到无穷远时谱仪焦平面的位置。图2(a)、图2(b)、图2(c)分别是 r 为100 mm、237 mm 和10000 mm,波长为5~40 nm 时的光谱焦平面随入射角 α 的变化图。从图中可以发现,对一定的物距,总能找到合适的入射角,使得波长在5~40 nm 内的光谱都聚焦在 $y_0 = -235$ mm 平面上。对于不同的波长,其聚焦平面的y值与 y_0 的相对差值不超过1%,在波长靠近5 nm 和40 nm 的地方,其聚焦位置的y值相对于 y_0 的绝对差值也不超过1 mm。

图3是在入射角保持87°不变的情况下,波长范围在5~40 nm 内的计算光谱的焦平面位置

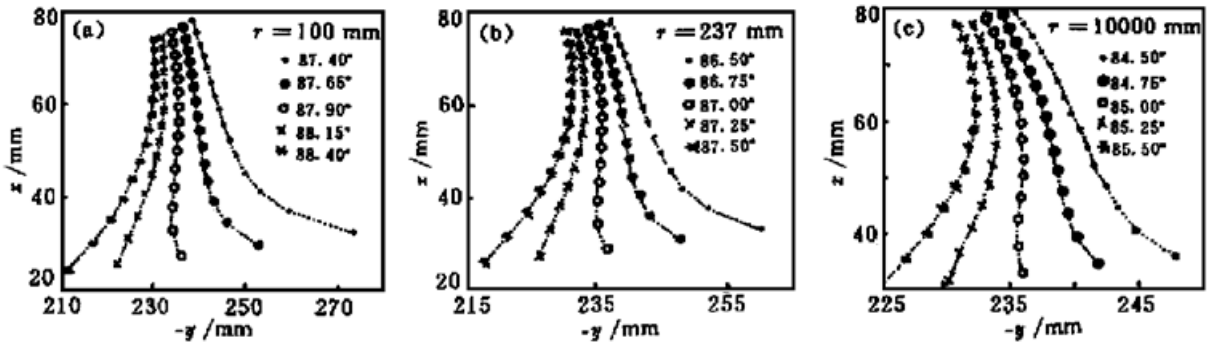


Fig. 2 The focal curves with different incident angle, for (a) $r = 100 \text{ mm}$, (b) $r = 237 \text{ mm}$, (c) $r = 10000 \text{ mm}$, in the wavelength range from 5 nm to 40 nm

随物距的变化。从这种图中也能找到对一个特定的入射角使得该波长范围内的光谱都聚焦在 $y_0 = -235 \text{ mm}$ 的焦平面上的最佳物距。图4是 $5 \sim 40 \text{ nm}$ 波长范围内的光谱成像于 $y_0 = -235 \text{ mm}$ 平面时, 所对应的最佳入射角随物距的变化。从图4可见随着物距的增加, 其最佳入射角将变小, 物距在 50 mm 到无穷远变化时, 对应的最佳入射角在 $88.5^\circ \sim 85.0^\circ$ 内变化。

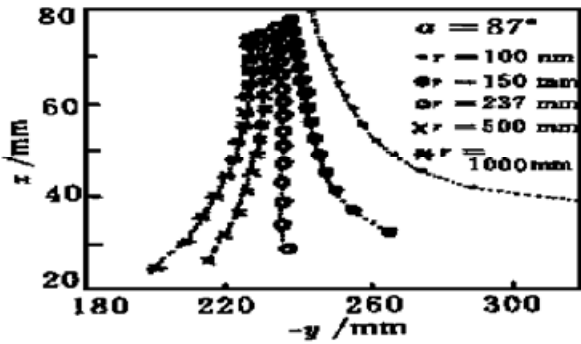


Fig. 3 The focal curves for the incidence angle of 87° with $r = 100 \text{ mm}$, 150 mm , 237 mm , 500 mm and 1000 mm

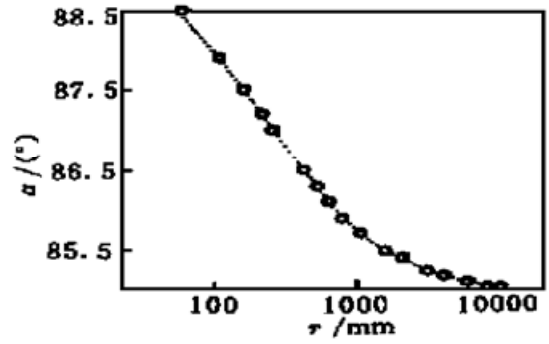


Fig. 4 The optimum incidence angles versus the object distance when the optimum flat focal planes at $y_0 = -235 \text{ mm}$ in the wavelength range from $5 \sim 40 \text{ nm}$ are obtained

结 论 计算结果表明, 当光源至光栅顶点的距离从 50 mm 到无穷远变化时, 入射光束的掠入射角从 1° 变化到 5° , 使得 $5 \sim 40 \text{ nm}$ 波段范围内的光谱仍然成像在 $y_0 = -235 \text{ mm}$ 的焦平面上, 消除了普通平焦场光栅光谱仪对物距的限制, 大大提高了平焦场谱仪使用的灵活性和适应性。因此在不同的实验室使用平场谱仪的时候, 可以根据靶点和谱仪的具体位置, 通过调节光栅入射角, 使得光谱仍然成像在距光栅顶点 235 mm 且基本垂直于入射光束的焦平面上。另外, 这种使用方法使得平场谱仪还能用于研究远距离恒星光谱以及同步辐射光源的软 X 射线波段光谱。

在掠入射光栅谱仪中, 如果波长给定, 光栅表面的反射率随掠入射角的增大而减小。计算表明, 在光源距光栅顶点远穷远处, 最佳掠入射角为 5° , 从光栅表面反射的最短波长为 $\lambda = 15.4 \sin \theta = 1.3 \text{ (nm)}^{[1]}$, 因此, 当掠入射角在 $1^\circ \sim 5^\circ$ 之间变化时, 在 $5 \sim 40 \text{ nm}$ 波长范围内, 光栅表面仍有较高的反射效率。

由于不同物距所对应的最佳光栅入射角是不同的, 所以光栅必须安装在调整精度好于 0.1° 的精密角度调整系统上。在实验中, 必须根据实际物距精确调整光栅入射角, 直到可以

拍摄到波长在5~ 40 nm 范围内的清晰光谱为止。

对于给定光源位置的情况下, 光谱零级的成像距离 r' 可以通过(2)式来计算, 也可用球面反射镜子午面成像公式:

$$(1/r) + (1/r') = 2/(R\cos\alpha), \quad (4)$$

来计算。在这里 r 、 r' 和 α 三者之间是一一对应关系。因此可以用测量 r' 的变化来判断入射角 α 的变化, 因为入射角的变化比较难测量, 且不如 r' 变化来得敏感。例如当 α 为 87° 时, 当入射角变化 0.01° ($36''$) 时, 引起的 r' 的变化为 3.5 mm。从(4)式可以得到更一般的表示这两个量变化敏感度之间的关系:

$$(\Delta r'/r')/(\Delta\alpha/\alpha) = \alpha \tan \alpha / (1 - R \cos \alpha / 2r), \quad (5)$$

对于 $\alpha = 87^\circ$, $r = 237$ mm 和 $R = 5649$ mm, $(\Delta r'/r')/(\Delta\alpha/\alpha) = 77$ 。从上式可以看出, 入射角的微小变化就能引起光谱零级位置的较大变化。在调试谱仪的过程中, 可利用这个特点, 通过用平行光管监测光谱零级像的位置和清晰度来判断光栅的入射角是否符合要求, 从而达到精确调节谱仪的目的。

参 考 文 献

- [1] Samson J A R. Techniques of vacuum ultraviolet spectroscopy. New York, London, Sydney: John Wiley & Sons, Inc., 1967
- [2] Kita T, Harada T, Nakano N *et al.*. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings for a flat-field grazing-incidence spectrograph. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(4) ·512~ 513
- [3] Nakano N, Kwroda H, Kita T *et al.*. Development of a flat-field grazing-incidence XUV spectrometer and its application in picosecond XUV spectroscopy. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(14) ·2386~ 2392
- [4] Kiehn G P, Willi O, Damerell A *et al.*. Novel time-resolved VUV spectrograph for X-ray laser research. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3) ·425~ 426
- [5] Fan Pinzhong, Zhang Zhengquan, Zhou Jinzhi. Stigmatic grazing-incidence flat-field grating spectrograph. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(31) ·6720~ 6723
- [6] Harada T, Kita T. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(23) ·3987~ 3993
- [7] Neely D, Damerell A, Parker R *et al.*. A high sensitivity imaging flat-field spectrometer design. *Central Laser Facility Annual Report, Rutherford Appleton Laboratory Technical Report*, No. RAL-TR-95-025, 113~ 114

Novel Usage of a Flat-Field Grating Spectrograph

Liu Yaqing Fan Pinzhong Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 4 March 1999; revised 13 April 1999)

Abstract A novel usage of the flat-field spectrograph with a variable line-spacing grating in 5 to 40 nm spectral range is presented. The spectrograph can be used for any source-grating distances but with a constant distance from the grating to the flat focal plane and is highly flexible and adaptable for XUV and soft X-ray spectroscopy experiments with different laser plasma target chambers.

Key words variable line-spacing grating, flat-field spectrograph, XUV and soft X-ray.