

文章编号 : 0253-2239(2001)09-1099-04

小型平焦场光栅光谱仪的研制*

张继彦 杨国洪 张保汉 周裕清 李 军

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心 , 绵阳 621900)

摘要 : 采用名义栅距为 1/1200 mm、凹面曲率半径为 5649 mm 的变栅距凹面光栅 , 研制了一种小型平焦场光栅光谱仪。谱仪入射角为 87.45° , 物距为 155 mm。使用“星光 II”激光装置对该谱仪进行了测谱实验 , 得到用胶片作时间积分光谱记录时谱分辨率不低于 0.015 nm。

关键词 : 平场光栅光谱仪 ; 变栅距凹面光栅 ; 激光等离子体

中图分类号 : TH744.1 文献标识码 : A

1 引 言

近年来 , 平焦场光栅谱仪^[1]在等离子体光谱学、X 射线激光等研究领域开始得到广泛应用^[2~4]。这种谱仪一般采用变栅距凹面光栅作分光成像元件 , 在入射角恒定的情况下 , 依靠光栅间距的变化来调整衍射角的变化 , 从而使不同波长的衍射光均落在一平焦面上。与通常的罗兰圆结构光栅谱仪相比 , 平焦场光栅谱仪具有光谱成像面平直、像散小等优点。

在当前的实验研究中常用一种由日立公司提供的名义栅距为 1/1200 mm , 凹面曲率半径为 5649 mm 的变栅距凹面光栅。该光栅使用的通用光路结构参数为 : 入射角 $\alpha = 87^\circ$, 物距(从狭缝到光栅中心的距离) $r = 237$ mm。这时 , 谱仪能将 5.0 nm ~ 30.0 nm 波长范围的入射光聚焦于一近似的平面上 , 且光栅中心与该平面距离 L 为 235 mm。最近 , 有人就采用这种光栅构建具有不同于上述通用入射角和物距的新光谱仪这一问题进行了有意义的探索 , 初步证明了这种设想的可行性^[5]。

在本工作中 , 针对目前采用通用光路结构参数的平场光栅谱仪在“星光 II”激光装置的现有靶室中存在体积过大及调整定位不方便等问题 , 通过数值计算对谱仪的入射角和物距进行调整 , 研制了一种体积较小的平场光栅谱仪并成功地应用于实验测量。

2 原理和结构

2.1 平焦场光栅

如图 1 建立直角坐标系。取光栅凹球面顶点为原点 , 过 O 点与光栅顶点切面垂直的直线为 x 轴 , 过 O 点且分别与过该点的光栅栅线相垂直和平行的直线为 y 轴和 z 轴。现考虑一平面安装系统 , 即点光源及其衍射像点均位于 $x-y$ 坐标面这一情形(下文如未做特殊说明 , 均表示基于该系统)。设 $A(x, y, 0)$ 为点光源坐标 , $B(x', y', 0)$ 是波长为 λ 的光的第 m 级衍射像点坐标 , 并令 $P(u, w, l)$ 是从 O 点起第 n 条栅线上的一点。假设在 P 点被衍射的光通过 B 点 , 则光路函数可如下表示 :

$$F = AP + PB + nm\lambda, \quad (1)$$

将(1)式中距离 AP 和 PB 表成极坐标中的形式并代入光栅栅距 δ 的表达式 , 则

$$\delta = \delta_0 \left[\sum_{i=1}^{\infty} R^{i(i-1)} w_{\theta}^{i-1} \right]^{-1} \quad i = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

其中 , δ_0 为光栅的名义栅距 , $w_{\theta} = w - u \tan \theta$ 为用于光栅刻槽定位的参数 , θ 为与光栅刻槽形状有关

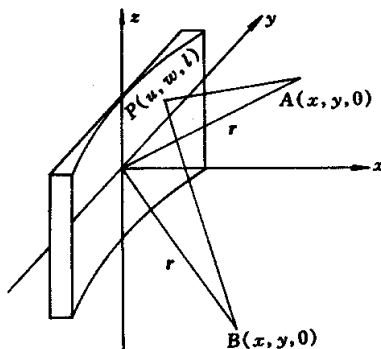


Fig.1 Schematic diagram of optical system

* 国家自然科学基金(19674042)和中国工程物理研究院预研基金(20000216)资助课题。

的倾角^[2]。然后,通过多项式展开得到展成 w 和 l 级数形式的光路函数^[1]:

$$F = r + r' + wF_{10} + w^2F_{20} + l^2F_{02} + w^3F_{30} + w^2l^2F_{12} + w^2l^2F_{22} + w^4F_{40} + l^4F_{04} + O(w^5), \quad (3)$$

上式中每一项 F_{ij} 可表示成如下形式

$$F_{ij} = C_{ij} + \frac{m\lambda}{\delta_0} M_{ij}, \quad (4)$$

这里 C_{ij} 为通常的等栅距光栅的像差项, M_{ij} 为变栅距光栅的球差校正项。 C_{ij} 和 M_{ij} 分别是 α 、 β 、 θ 、 r 、 r' 、 R 、 b_i 等的函数。其中 α 表示入射角, β 表示衍射角, r 和 r' 分别表示物距和像距, R 表示光栅凹面曲率半径。这里列出 C_{ij} 和 M_{ij} 的前几项表达式:

$$C_{10} = -\sin\alpha - \sin\beta, \quad (5)$$

$$M_{10} = 1, \quad (6)$$

$$C_{20} = \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2\alpha}{r} - \frac{\cos\alpha}{R} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2\beta}{r'} - \frac{\cos\beta}{R} \right), \quad (7)$$

$$M_{20} = \frac{1}{R} \left(b_2 - \frac{\tan\theta}{2} \right). \quad (8)$$

在由色差校正变栅距凹面光栅构成的谱仪系统中为了获得完全点像聚焦,光路函数必须满足费马(Fermat)光学原理,即 $\partial F/\partial w = 0$ 且 $\partial F/\partial l = 0$, 也即 $F_{ij} = 0$ 。然而实际上不可能使光栅对任意波长的光都完全满足这一条件,能做到的是通过对光栅的合理设计使各项 F_{ij} 最小。在由(3)式给出的光路函数中, F_{10} 是与光栅色散有关的项, F_{20} 是与水平聚焦条件有关的项, F_{02} 是与像散有关的项, F_{30} 是与彗形像差有关的项,其它 F_{ij} 与高阶像差有关。

2.2 谱仪结构计算

对名义栅距 $\delta_0 = 1/1200$ mm, $R = 5649$ mm 的变栅距凹面光栅,当入射角为 87° , 物距 $r = 237$ mm 时,对 5.0 nm ~ 30.0 nm 波长范围的光谱,从文献[1]中可知,当 $M_{20} = -20.0/R$ 时,水平聚焦条件 $F_{20} = 0$ 得以满足。而且当 $m\lambda = 10.0$ nm, $M_{30} = 455.8/R^2$, $M_{40} = -11840/R^3$ 时,条件 $F_{30} = 0$, $F_{40} = 0$ 也分别得以满足。于是,由色散条件 $F_{10} = 0$ 及水平聚焦条件 $F_{20} = 0$ 可得焦点坐标

$$r' = \frac{\frac{\cos^2\beta}{2}}{\frac{m\lambda}{\delta_0} \frac{20}{R} - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2\alpha}{r} - \frac{\cos\alpha}{R} \right) + \frac{1}{2} \frac{\cos\beta}{R}}. \quad (9)$$

这样,只要给出了 α 、 r 的值,就可以计算出焦面位

置。在图2中给出了 $\alpha = 87^\circ$, $r = 237$ mm 时计算得到的焦面位置。从图中可以看出,光栅对 5.0 nm ~ 30.0 nm 波长范围的光谱形成平焦场,且平焦面与光栅中心距离约 235 mm。这正是该型光栅所使用的通用光路结构参数。

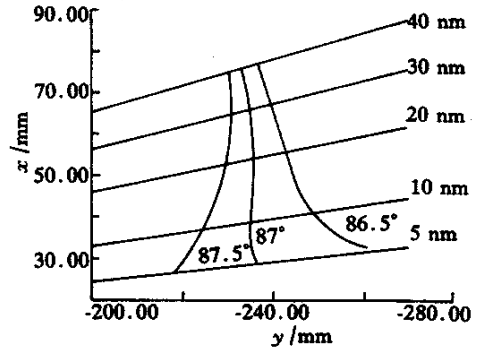


Fig.2 Calculated focal curves at different incident angle for a varied spacing concave grating with the object distance of 237 mm

现在,当改变 α 、 r 后,谱仪系统是否仍能在 5.0 nm ~ 30.0 nm 波长范围内形成平焦场呢?根据(9)式进行数值计算,不难找出这样的一组 α 、 r 值。显然,由(9)式的导出过程可知条件 $F_{10} = 0$, $F_{20} = 0$ 成立,但这时 $F_{02} = 0$, $F_{30} = 0$ 等像差校正条件则未必成立。因此,按这种方法确定的 α 、 r 值有可能造成严重的球差和彗形像差。为此,本文基于光栅栅距方程(2)给出另一种计算方法。

如图3,取坐标原点位于光栅凹面顶点 O ,过 O 点的光栅凹面法线为 x 轴,过 O 点与光栅栅线垂直且与光栅凹面相切的直线为 y 轴。

设由光源 S 发出的波长为 λ 的光分别在光栅表面的 C 点(CO' 为光栅表面在 C 点的法线, CC' 与 x 轴平行)和 O 点被衍射,则过这两点的衍射线必相交于一点 F 。这样,经光栅上任意两点的衍射光线的交点 F 的集合构成了光源 S 的像场区。根据上述各

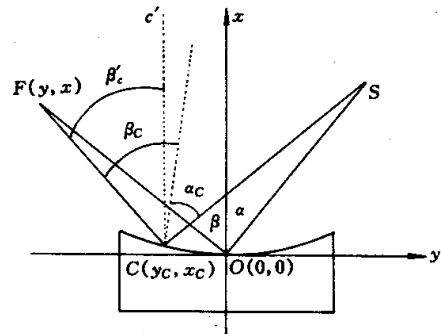


Fig.3 Schematic of optical system in the meridional plane of a varied spacing concave grating

点的几何位置关系可得 (10) 式和 (11) 式

$$\cot\beta = -x/y, \quad (10)$$

$$\cot\beta_c = (x_c - x)/(y_c - y), \quad (11)$$

再由点 O 和点 C 处的光栅方程 (12) 和 (13) 便可确定交点的坐标 $F(y, x)$

$$d_0(\sin\alpha - \sin\beta) = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, \dots (12)$$

$$d_c(\sin\alpha_c - \sin\beta_c) = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, \dots (13)$$

其中 d_c 为光栅上点 C 处的栅距。当然, 由于各级像差的存在, 对于确定的 α, r 值, 当 C 点在光栅表面移动时, 交点坐标 $F(y, x)$ 也会有微小的变化。

由上述方法计算得到的聚焦曲线如图 4 所示。从图可看出, 当 $r = 237 \text{ mm}$, $\alpha = 87^\circ$ 时, 在 $5.0 \text{ nm} \sim 30.0 \text{ nm}$ 波长范围内形成平焦场, 而当 $r = 155 \text{ mm}$, $\alpha = 87.45^\circ$ 时, 在 $5.0 \text{ nm} \sim 30.0 \text{ nm}$ 波长范围内也形成平焦场 (这里平焦场意指相对平直, 并非绝对平面)。在设计谱仪时, 根据 $5.0 \text{ nm} \sim 30.0 \text{ nm}$ 波长范围内光源像点在如图 4 所示的 y 轴方向的最大变化量作为平焦场性质的判据来选取适当的 α, r 值。对本文中的谱仪, 通过计算得到 $5.0 \text{ nm} \sim 30.0 \text{ nm}$ 波长范围内光源像点在 y 轴方向的最大变化量为 1.58 mm , 而通用型谱仪这一变化量为 1.44 mm 。这表明, 对波长范围 $5.0 \text{ nm} \sim 30.0 \text{ nm}$ 新谱仪的平场特性与通用型谱仪较为接近。

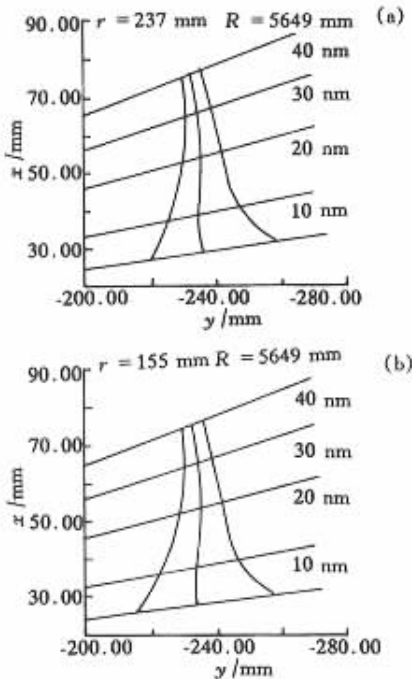


Fig.4 Calculated focal curves at different incidence angle and object distance. (a) Object distance is 237 mm; (b) Object distance is 155 mm

3 新光谱仪的结构及主要特性

如图 4(b) 所示, 当 $r = 155 \text{ mm}$, $\alpha = 87.45^\circ$ 时, 光栅对 $5.0 \text{ nm} \sim 30.0 \text{ nm}$ 波长范围内的光谱形成平焦场。这时, 光栅顶点 O 与平焦面距离为 233.5 mm 。

3.1 色散率

由光栅方程及光谱波长位置关系

$$d_0(\sin\alpha - \sin\beta) = \lambda, \quad (14)$$

$$x = 233.5 \cot\beta, \quad (15)$$

可得线色散率

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{233.5}{d_0 \sin^2 \beta \cos \beta} \text{ (mm/nm)}. \quad (16)$$

从 (16) 式可以看出, 新谱仪与通用谱仪线色散率^[4]相比仅有微小变化。

3.2 分辨率

在理论上, 分辨率可由瑞利判据给出。然而影响光谱仪器的实际分辨率的因素很复杂, 一般情况下很难从理论上准确给出谱仪的真实分辨率。通常, 可采用实验摄谱法给出一谱仪系统的实际光谱分辨能力。

摄谱实验在“星光 II”强激光装置上进行。在一真空靶室中, 聚焦 $1.06 \mu\text{m}$ Nd 玻璃激光于一厚 Al 靶产生激光等离子体。等离子体发射的 XUV 区在经谱仪分光成像后被记录于软 X 光胶片上。谱仪置于靶侧向观测, 入射狭缝宽度为 $20 \mu\text{m}$, 距靶心约 35 mm 。实验中激光输出能量为 22.5 J , 激光脉宽 $600 \text{ ps} \sim 800 \text{ ps}$ 。

实验光谱如图 5(a) 所示。另外为了便于比较, 在图 5(b) 中给出了 Toshiaki Kita 等人使用通用型谱仪 (即使用同型光栅, 入射角为 87° , 物距为 237 mm 的谱仪) 测得的 Al 激光等离子体 XUV 区发射谱^[2]。

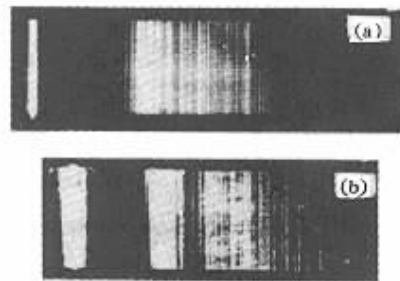


Fig.5 Experimental spectra emitted from laser-produced aluminum plasmas. (a) Measured by using the present spectrograph; (b) Measured by T. Kita et al.

图 6 给出了对上述实验谱的黑密度扫描结果。

在表 1 中给出了实验中测得的几组强度相近的谱线,从谱线对 1 中两条波长差为 0.0128 nm 的谱线明显分开(见图 6)来判断,该谱仪的光谱分辨率不低于 0.015 nm。

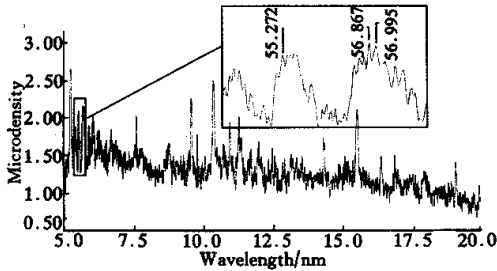


Fig.6 The microdensitometer trace of X-ray spectra emitted from laser-produced aluminum plasmas

Table 1. X-ray spectra emitted by laser-produced aluminum plasmas

line pairs of spectra	wavelength /nm	microdensity	line spacings /nm
1	5.6867	2.162	0.0128
	5.6995	2.171	
2	5.8933	1.900	0.0195
	5.9128	1.893	
3	10.4058	2.496	0.0194
	10.4252	2.459	

总结 通过对名义栅距 $d_0 = 1/1200$ mm,凹面曲率半径 $R = 5649$ mm 的变栅距凹面光栅结构原理的分析,在数值计算的基础上找出了对 5.0 nm ~

30.0 nm 波长范围光谱形成平焦场的一组新光路结构参数,即 $r = 155$ mm, $\alpha = 87.45^\circ$,并且从光栅中心到该平焦面的距离为 233.5 mm。基于这组参数研制了一种新平场光栅光谱仪。新谱仪具有如下一些特点:

- 1) 总光路长度较通用型谱仪缩短约 20%,谱仪体积大为减小,增加了谱仪使用的方便性和灵活性。
- 2) 采用实验摄谱法得到当用胶片做时间积分光谱测量时,新谱仪光谱分辨率不低于 0.015 nm。

作者对本所设计室的王致久等同志在谱仪的设计中给予的帮助表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Harada T, Kita T. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(23):3987 ~ 3993
- [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] Kiehn G P, Willi O, Damerell A R *et al.*. Novel time-resolved VUV spectrograph for X-ray laser research. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3):425 ~ 426
- [4] 倪元龙,毛楚生,吴江等.平焦场光栅光谱仪. *强激光与粒子束*, 1991, **3**(2):242 ~ 248
- [5] 李英骏. Ne-like 离子 X 射线激光的自相似解及 X 射线谱仪的概念设计(博士论文). 绵阳:中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 1998

Design of A Small-Sized Flat Field Grating Spectrograph

Zhang Jiyan Yang Guohong Zhang Baohan Zhou Yuqing Li Jun

(Laser Fusion Research Centre of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

(Received 3 April 2000; revised 10 July 2000)

Abstract: A small-sized flat field grating spectrograph was developed by using a varied spacing concave grating with a nominal groove spacing of 1/1200mm and a radius of curvature of 5649 mm. The incidence angle and the object distance of the spectrograph are 87.45° and 155 mm respectively. The spectrograph was used for test in "XINGGUANG-II" laser system, and the experimental results showed that the spectral resolution of this spectrograph was better than 0.015 nm for time integrating detection with film.

Key words: flat field grating spectrograph; varied spacing concave grating; laser-produced plasmas