

文章编号: 1001- 4322(2000)05- 0582- 03

一台入射距离为155mm 的 XUV 平场光谱仪

李英俊¹, 张保汉², 杨建伦², 张 杰¹

(1. 中国科学院物理研究所, 北京603-04信箱, 100080; 2 中物院核物理与化学研究所, 绵阳919-216信箱, 621900)

摘 要: 利用光路追踪程序对不同入射距离的变栅距平场光栅的成像进行了研究和设计。在此基础上研制了一台与传统平场光栅谱仪不同的入射狭缝到光栅中心距离为155mm 的掠入射平场光谱仪。该谱仪的波段范围为4~ 40nm, 光谱分辨率为0.01nm。利用该谱仪成功地获得了 Ti 元素的激光等离子体光谱。

关键词: 掠入射平场谱仪; 软 X 射线

中图分类号: TH744.15 **文献标识码:** A

掠入射平场光栅谱仪是软 X 射线波段光谱测量中非常重要的仪器。在惯性约束聚变(ICF)研究和 X 射线激光研究等对激光等离子体的诊断中,人们不仅需要测量等离子体发射的积分光谱,以获得关于等离子体内部的状态参量,而且需要知道等离子体发射的微分光谱,即时间分辨光谱,以便得知等离子体状态随时间的变化行为^[1~ 3]。平场光栅谱仪由于具有的平直的光谱聚焦面,因此更适用于用光电探测器对光谱做时间分辨或空间分辨的测量,因而,在激光等离子体的研究中被广泛地采用。但是,在目前使用的掠入射平场光栅谱仪中,普遍采用从入射狭缝到光栅中心的入射距离为一个固定值的设计方案。以曲率半径为5649mm,刻线标称栅距为1/1200mm 的凹面光栅为例,其入射狭缝到光栅中心的距离须为237mm,入射角须为87°;而光栅中心到平焦面的距离须为235mm。这极大地限制了摄谱仪使用的灵活性和光栅性能的充分发挥。为此,李英俊、张杰等人^[4,5]已提出了可变入射距离的概念,并从理论上论证了其可行性。

本文主要报道最近研制成功的入射距离为155mm 的掠入射软 X 射线平场光栅谱仪。这台谱仪不仅具有较高的光谱分辨率,而且大大缩小了谱仪的尺寸,提高了谱仪使用的灵活性。该谱仪缩短了入射狭缝到光栅中心的入射距离,并在保证平场聚焦的前提下,使得谱仪能够更为方便地用于各种等离子体实验的测量。文中,我们首先从理论上用光路追踪程序计算了不同条件下的聚焦曲线,找出了适合我们实验要求的入射距离之内的最佳平场聚焦条件,并在此基础上对谱仪进行了设计。其次,从实验上对其性能进行了测试。

1 理论计算和谱仪设计

为了先从理论上找出我们感兴趣波段中入射距离小于237mm 的平焦场的最佳状态。我们利用 T. Harada 等人^[6]的光路函数公式导出了与光谱方向的聚焦条件有关的方程

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

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

式中, α 为入射角; β 为衍射角; λ 为波长; m 为衍射级数; σ 为光栅标称间距; r 为入射距离; r' 为衍射距离; R 是光栅曲率半径; M_{20} 是与光栅刻线条件有关的参数。考虑到我们感兴趣的主要是光谱方向的聚焦条件和入射距离小于 200mm 时所形成的平场。因此,为了对我们光谱仪的设计有所指导,针对曲率半径 R 为 5649mm, 标称栅距 σ 为 1/1200mm, 光栅刻线参数 M_{20} 为 $-20/R$ 的凹面光栅,我们计算了光谱方

收稿日期: 1999-10-16; 修订日期: 2000-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(19974074); 国家863惯性约束聚变和高温高密度等离子体物理重点实验室基金(99JS77. 21ZK3301)资助课题

作者简介: 李英俊, 男, 1961年1月出生, 博士, 教授, 从事 X 射线激光和激光等离子体研究。

向的聚焦条件。并通过分析得到了条件较为优化的入射角为 87.5° ；入射距离为155mm，光栅中心到平场垂直距离为234mm，波长范围为5~ 40nm。计算结果如图1(a)所示。其中，图1(a)为入射狭缝到光栅中心的距离为155mm 时的平场聚焦条件；而图1(b)是通常的入射狭缝到光栅中心的距离为237mm 时的平场聚焦条件。由图1中(a)和(b)的比较可见，对于入射狭缝到光栅中心的距离为155mm 的情况，聚焦曲线近似为平场的最佳条件为入射角是 87.5° ；光栅中心到平焦面的垂直距离为234mm，所测量波长范围4~ 40nm；而对于入射狭缝到光栅中心的距离为237mm 的情况，聚焦曲线近似为平场的最佳条件为入射角是 87° ；光栅中心到平场垂直距离为235mm，所测量波长范围是5~ 40nm；对于155情况，在4~ 40nm 的范围内，X 方向焦线宽度的最大值为0.069mm，光栅中心到象点的最大垂直距离为234.7mm，最小垂直距离为232.85mm，差值为1.85mm，平均距离为233.961mm，可取为234mm；而对于237情况，在5nm ~ 40nm 的范围内，X 方向焦线最大宽度为0.056mm，光栅中心到象点的最大垂直距离为236.33mm，最小垂直距离为233.35mm，差值为2.98mm，平均距离为235.195mm，取为235mm。

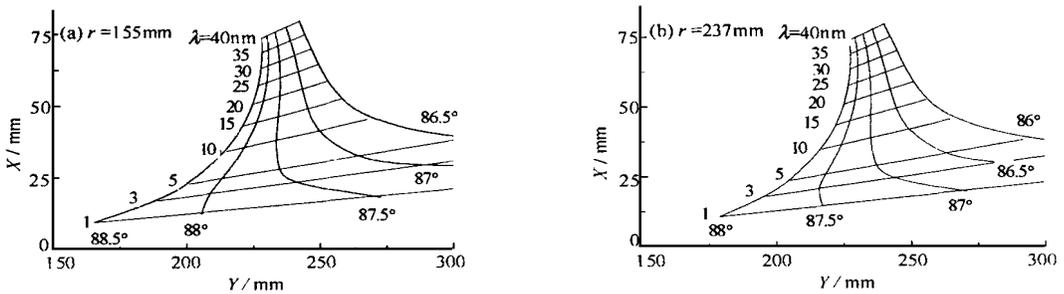


Fig 1 Focal curves with different incidence angle for (a) 155mm and (b) 237mm incidence distance using a mechanically ruled aberration-corrected concave grating: 1200grooves/mm, $R = 5649\text{mm}$.

图1 对于 $\sigma = 1/1200\text{mm}$, $R = 5649\text{mm}$ 的光栅,

其入射距为 (a) $r = 155\text{mm}$ 和 (b) $r = 237\text{mm}$ 时对应不同入射角的光谱方向聚焦曲线

谱仪设计的示意图见图2中从入射狭缝到探测平面的部分。考虑到以上计算结果，其主要设计参数为：狭缝到光栅的距离为155mm，光栅到平焦场面的垂直距离为234mm。为了得到最佳的平场聚焦条件，光栅平面与 X 轴成 87.5° 角安放。计算表明：狭缝到光栅距离的微小变化引起的成象在平焦场面上的改变并不大；但光栅平面与 X 轴夹角的微小变化都会导致平焦场面的很大变化。

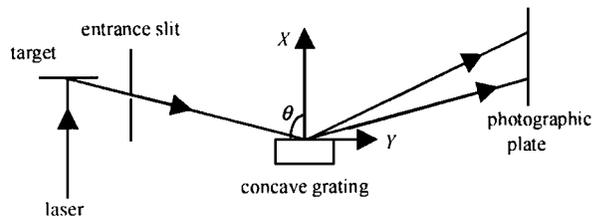


Fig 2 Schematic of experiment

图2 实验原理图

2 实验和结果

图2表明了用155mm 光谱仪测量激光等离子体软 X 射线光谱的基本实验设计。谱仪被放置在靶室内，入射狭缝宽度为 $50\mu\text{m}$ ，且被置于离靶面22mm 处，实验是在“星光”高功率激光装置上进行的。打靶激光的有关参数为：波长 $1.053\mu\text{m}$ ，聚焦后的靶面功率密度 $6 \times 10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ ，靶材料为 Ti，而靶形状为平面靶。探测平面使用了上海感光材料厂的 S10FM -5FW 无屏光谱胶片。

由这个谱仪得到的典型的 Ti 激光等离子体光谱照片见图3，由于当波长短于5nm 时像散增加的很快，在这附近的第一级成像和零级成像是没有聚焦的。由实验结果可以看到，该155mm 像差校正掠入射平场光栅谱仪能在4~ 35nm 的波长范围内将光谱清晰地聚焦在一个平面上，并可延伸至40nm，其光谱分辨约为0.01nm。

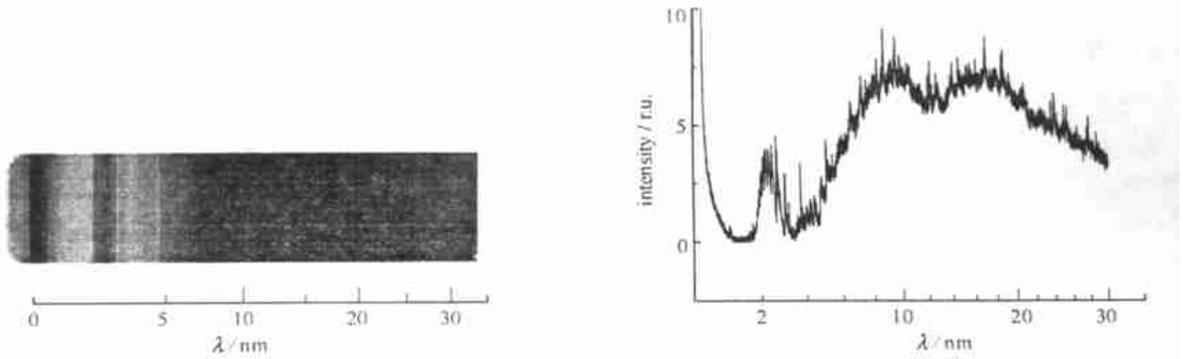


Fig 3 XUV spectrum of a Ti laser-plasma from the 155mm spectrograph

图3 由掠入射光栅谱仪得到的Ti靶激光等离子体软X射线谱

3 结 论

实验测量已证明, 155mm 平场谱仪的设计方案是可行的。该设计在保证光谱分辨率不低于传统平场谱仪的基础上, 大大提高了谱仪的适用范围。由实验结果和分析可得结论: 该入射距离为155mm的掠入射平焦场谱仪在4~ 40nm 的波长范围内, 能在一平焦面上获得清晰的光谱成象, 且光谱分辨为0.01nm。在4~ 40nm 的波长范围内所观察到的每条线都是聚焦的。但当波长短于4nm 时, 散焦的很快。由于谱仪的尺寸较传统平场谱仪的尺寸缩短了83mm, 使其无论是在实验靶室中安放位置的灵活性方面, 还是在谱仪与靶面瞄准的方便性方面都有了很大的提高。

致 谢 该工作中得到了“星光”高功率激光装置运行组的大量帮助, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Kuroda H, Nakano N, Kita T, et al Extreme UV measurements of a varied line-space Hitachi reflection grating: efficiency and scattering[J]. *Appl Opt*, 1984, **23**: 2386
- [2] 范品忠, 张正泉, 周锦智, 等 消像散掠入射平场光栅谱仪及其在等离子体XUV 光谱诊断中的应用[J]. *光学学报*, 1992, **12**: 169
- [3] Zhang J, Macphie A G, Lin J, et al A saturated X-ray laser beams at 7nm [J]. *Science*, 1997, **276**: 1097.
- [4] 李英骏, 张杰, 彭翰生, 等 可变入射距离平焦场谱仪的概念设计[J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**: 410
- [5] 李英骏, 杨建伦, 张杰 非点光源情况下平场光栅的成像研究[J]. *物理学报*, 2000, **49**: 863
- [6] Harada T, Kita T. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings[J]. *Appl Opt*, 1980, **19**: 3987.

A Flat-field XUV Spectrometer with 155mm Incidence Distance

LI Yingjun¹, ZHANG Baohan², YANG Jianlun², ZHANG Jie¹

(1. Institute of Physics, Chinese Academy of Science, P. O. Box 603-04, Beijing, 100080, China;

2. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, P. O. Box 919-216, Mianyang, 621900, China)

ABSTRACT: Using a ray-tracing code, A flat-field grazing-incidence spectrometer with 155mm incident distance was designed. This is different from the conventional design for a flat-field grazing-incidence spectrometer. This spectrometer has good spectral resolution as well as smaller size and improved flexibility. The spectrum covers wavelength ranges of 4~40nm and the spectral resolution is 0.01nm.

KEY WORDS: a flat-field grazing-incidence spectrograph; soft X-ray