

软 X 射线狭缝透射光栅谱仪的研制

陈志伟, 王占山, 牛惠辉

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

摘要:介绍了软 X 射线狭缝透射光栅谱仪的基本原理, 得出光谱分辨率的理论计算公式, 同时给出狭缝光栅的几何结构和相应的各种参数。在真空系统的实验条件下, 对不同物质进行了激光累积打靶实验, 得到其相应的软 X 射线光谱图, 由这些光谱图可以回推光谱线, 进行激光等离子体的诊断。从所做的实验结果中选出效果较好的光谱图, 用显微密度计对其进行扫描, 得到光强随距离的变化关系, 可以用于标定实验和元素的定量分析。

关键词:软 X 射线; 狭缝光栅; 光谱分辨率

中图分类号:TH744.15 **文献标识码:**A

1 引言

激光等离子体(LPPS)是一种强软 X 射线脉冲辐射源^[1]。它们被公认为是产生 0.1nm~30nm 波长软 X 射线的有效光源。这种软 X 射线源能够用于光谱测量、等离子体诊断、X 射线光刻技术等。有多种方案去测软 X 射线, 包括晶体谱仪、无像差的掠入射光栅谱仪、透射光栅谱仪。通常, 晶体谱仪在记录 0.1nm~2nm 波长范围内的 X 射线方面应用较广泛; 反射无像差的掠入射光栅谱仪能够用来获得一维空间分辨的软 X 射线光谱, 波长范围为 2nm~30nm, 但是, 无像差的掠入射光栅谱仪非常昂贵, 并且很难调整。这里, 设计一种狭缝透射光栅谱仪来测量 0.3nm~30nm 软 X 射线光谱, 并诊断软 X 射线辐射, 实验都是在真空度为 2×10^{-2} Pa 的真空系统中进行。为了能够与诊断目的匹配, 选择最佳的色散元件和光谱仪方案。

2 狭缝透射光栅的工作原理

软 X 射线狭缝透射光栅谱仪的工作原理如图 1。从光源 $s(\lambda)$ 发出的光线经狭缝透射光栅衍射后成像在底片上。根据衍射定律, 衍射光在焦平

面上的分布是:

$$Y = c'a \frac{\sin u}{u} \cdot \frac{\sin Nv}{\sin v} \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_0}{\lambda} - \frac{(N-1)d \sin \theta}{2\lambda} \right) \quad (1)$$

式中: $u = (\pi \cdot a \cdot \theta) / \lambda$, $v = (\pi \cdot d \cdot \sin \theta) / \lambda$, a 是两条刻线间的宽度, d 是光栅常数, N 是光栅刻线数。

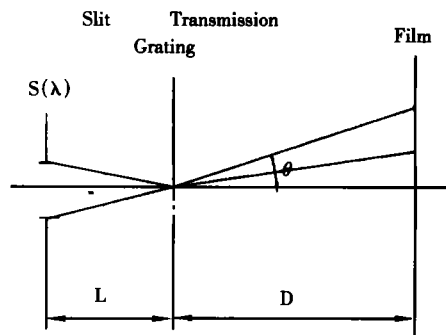


Fig. 1 The basic principle of soft X-ray slit transmission grating spectrograph

光波振动的振幅和强度表示为:

$$A = c'a \frac{\sin u}{u} \cdot \frac{\sin Nv}{\sin v} \quad (2)$$

$$I = c'^2 a^2 \left(\frac{\sin u}{u} \cdot \frac{\sin Nv}{\sin v} \right)^2 \quad (3)$$

式(3)包含两个因子^[3]:单缝衍射因子 $(\frac{\sin u}{u})^2$ 和多光束干涉因子 $(\frac{\sin Nv}{v})^2$ 。从多光束干涉因子可知,当

$$d \sin \theta = m \lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

时,它有极大值,其数值为 N^2 ,当

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{m'}{N} \right) \lambda, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \\ m' = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (5)$$

时,它有极小值,其数值为零。式(4)就是光正入射时的光栅方程,对(4)两边取微分整理后可得到角色散公式:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta} \quad (6)$$

从式(5)不难看出,在两个相邻主极大之间有 $N - 1$ 个零值,相邻两个零值之间($\Delta m' = 1$)的角距离为:

$$\Delta \theta = \frac{\lambda}{N d \cos \theta} \quad (7)$$

由(6)和(7)可知与角距离 $\Delta \theta$ 对应的波长差为:

$$\Delta \lambda = \left(\frac{d\lambda}{d\theta} \right) \Delta \theta = \frac{\lambda}{mN} \quad (8)$$

因此,我们得到光栅谱仪的理论分辨率^[4]为:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = mN \quad (9)$$

许多实际因素将使 R 值比理论值低很多。要获得高分辨率光谱,可以提高 m 和 N 值,但在做大数目刻线光栅时有一些技术上的问题。而且,提高 m 值将导致光谱线交迭。例如,当:

$$m_1 \lambda_1 = m_2 \lambda_2 \quad (10)$$

λ_1 和 λ_2 光谱线将在接收面上叠加。实际上只有开始的几级能较容易地分辨出来。

3 狭缝透射光栅的几何结构和参数配置

狭缝透射光栅谱仪的关键部件自支撑金光栅是由放在厚度为 $400 \mu\text{m}$ 的Si框架上的金薄膜上加工制成的,其厚度为 $0.6 \mu\text{m}$,宽度为 $70 \mu\text{m}$,总长度为 $1714 \mu\text{m}$ 。整块光栅被宽 $16 \mu\text{m}$ 的支撑条分为五部分,在每一部分又由间距 $15 \mu\text{m}$ 、宽 $2.5 \mu\text{m}$ 的小支撑条所支撑。其几何结构如图2。

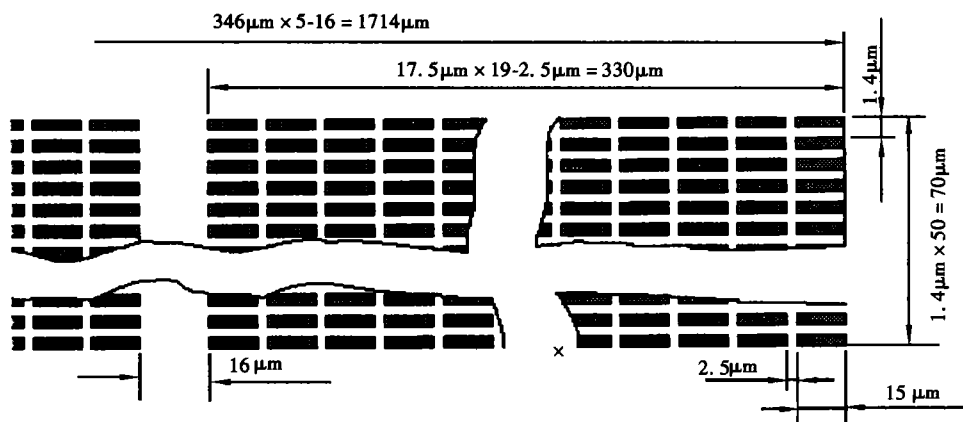


Fig. 2 The geometry structure of the slit transmission grating

相应的参数由下表给出:

Table 1 The basic parameters of the slit transmission grating

Grating Constant	$d = 1/N_0$	$1.4 \times 10^{-3} \text{mm}$
Wavelength scope	$\lambda_{\min} \sim \lambda_{\max}$	$0.3 \sim 30 \text{nm}$
Incident Angle	B_{in}	0°
Dispersion Angle(to 1.3nm)	$\theta = \arcsin(\lambda/d)$	$3'11''$
Grating aperture	W	$70 \mu\text{m}$
Number of grating grooves	N_0	50
Resolution($K = 1$)	$R_t = KN_{tot}$	50
Spectra width	$\Delta \lambda_t = \lambda/R_t$	0.026nm
Distance between slit grating and source	L	500mm
Distance between slit grating and film	D	750mm

4 实 验

激光等离子体是用会聚透镜将自制的调 Q YAG 发出 $1.06\mu\text{m}$ 激光会聚到一个平面靶面上,产生高温高密度等离子体,它发出高强度软 X 射线。激光的重复频率为 1Hz ,脉宽为 3ns ,每发激光能量为 600mJ ,激光会聚的直径约为 $600\mu\text{m}$,靶面的功率密度为 $3.5 \times 10^{11}\text{W}/\text{cm}^2$,为了提高光谱分辨率,在靶点附近加上宽度为 $100\mu\text{m}$ 的刀口。由于空气对软 X 射线有很强的吸收,所以除了激光器和激光会聚透镜放在空气中外,其它元件都放在真空中。激光等离子体靶放在一个小真空腔中,狭缝光栅和胶片都放在另一个大真空腔中,两个真空腔是用波纹管连接的,真空腔使用机械泵和涡轮分子泵抽气,实验时真空度为 $2 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 。



Fig. 3 The laser plasma soft X-ray spectrum of target Mo

整个光谱仪的调整是用模拟光源进行的,狭缝光栅和接收面位置都在同一个导轨上,导轨放到较大的真空腔中。用模拟光源调整好以后,固定元件的位置,放好胶片,就可以抽真空了,当系统

参考文献:

- [1] Feng X, Liu M H, Lee S. A transmission grating spectrograph and its application in both laser plasma and plasma focus[J]. Rev. Sci. Instrum. 1997, 68(8): 3068-3073.
- [2] 王晓方, Pachtmann A, 许志展等. X 射线透射光栅谱仪用于激光等离子体辐射特性的研究 I. 实验基础[J]. 中国激光, 1990, 17(7): 407-411.
- [3] 梁铨廷编. 物理光学(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980: 192-197.
- [4] 玻恩 M, 沃耳夫 E 著. 光学原理(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 530.
- [5] 王占山, 等. X 射线正入射显微镜及其在 ICF 中的应用[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(1): 1-9.
- [6] 郭玉斌, 等. 光纤 Bragg 光栅的研究[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(1): 31-38.
- [7] 王占山. 用透射光栅谱仪测量多层膜的反射特性[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(4): 22-27.

真空度达到要求时,开启激光器进行实验。

对不同靶材进行了实验,得出相应的光谱图,图3、图4给出了钼(Mo)的光谱图和对应的显微密度计扫描谱。累积打靶1000发,实验中启动步进电机来移动靶位。

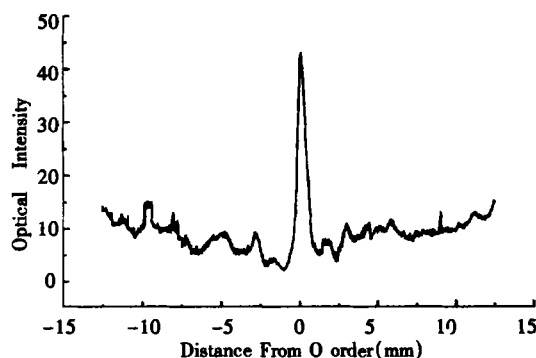


Fig. 4 The corresponding spectrum pattern of Fig. 3 scanned by micro densimeter

图中光谱线较清晰,各谱线除零级外都连到一起,这说明钼靶的等离子 X 射线谱主要是连续的。根据前面计算分辨率的公式可以得到实际的分辨率约为 1.3nm ,与理论值很接近,实验非常成功。

5 结 论

从实验结果可以看出,狭缝透射光栅谱仪的集光本领很弱,要想提高光谱分辨率则应以减小集光效率为代价,为了弥补这个缺陷,下一步将采用单块超环面镜作前置光学系统来提高谱仪的集光能力,与狭缝透射光栅谱仪进行对比实验。

Soft X-ray slit transmission grating spectrograph

CHEN Zhi-Wei, WANG Zhan-Shan, NIU Hui-Hui

*(The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)*

Abstract: The principle of soft x-ray slit transmission grating spectrograph is introduced in this paper and the resolution calculation formula can be obtained. Simultaneously, the geometry structure and corresponding parameters are given. On the condition of vacuum, some experiments on target shooting for different materials are carried out. The soft x-ray spectrograms of different materials are gained and from these spectrograms, we can conclude the spectroscopy and do some plasma diagnoses. Some good spectrograms are chosen from the result and are scanned by microdensimeter. From it, the relationship between the light intensity and the distance can be gained. It can be used in demarcation experiment and some quantitative analysis on elements.

Key words: soft x-ray; slit grating; spectrum resolution

作者简介: 陈志伟(1971—),女,黑龙江海伦市人。工学硕士,现阶段主要从事软 X 射线光栅谱仪的研究工作。