

文章编号: 0253-2239(2001)05-0574-04

一种准确聚焦掠入射球面光栅单色仪的光学设计

孔 岩 陈 波

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130021)

摘要: 提出了一种用于低碎屑激光等离子体软 X 射线光谱测试的球面光栅单色仪的光学设计方案。其设计思想是通过改变衍射光栅的偏向角使入射狭缝在所要求的波段范围内都能准确聚焦在出缝处。分析了系统的重要参数对单色仪技术指标的影响, 优化了设计方案, 使系统在 13 nm 处的分辨率 $\lambda/\Delta\lambda \geq 2000$ (狭缝开启 50 μm)。

关键词: 掠入射; 球面光栅; 单色仪; 光学设计
中图分类号: TH744.1 文献标识码: A

1 引 言

在激光等离子体软 X 射线源的探测系统中, 单色仪是很关键的部分。而在软 X 射线光谱范围内, 典型的掠入射单色仪系统有球面光栅单色仪 Dragon 型^[1] 和平面光栅单色仪 SX-700 型^[2]。Dragon 型单色仪用一块光栅同时起分光 and 聚焦的作用, 波长扫描是光栅绕中心轴转动并同时移动出缝来完成的。其优点是结构简单, 容易实现高分辨率; 缺点是每块光栅调谐范围窄、出缝的移动对后置聚焦系统不利。SX-700 单色仪是平面光栅单色仪, 它的波长扫描是由光栅绕中心轴转动和平面镜绕一镜面外的轴转动来完成的。它的优点是工作波长范

围宽, 不足之处是仪器的结构复杂、造价昂贵。所以人们一直努力发展新的单色仪^[3-5] 以弥补它们的不足。下面给出一种单色仪的设计, 它结合了 SX-700 的前置镜设计的灵活性和 Dragon 的易实现高分辨率的优点, 技术上较容易实现。

2 消离焦的球面光栅单色仪的原理

单色仪的工作原理如图 1 所示。由光源发出的光束先由前置非球面镜聚焦在入缝, 经平面镜反射, 打在球面光栅上, 光栅将光束散并聚焦在单色仪的出缝处, 再由后置聚焦系统将其聚焦到探测器的光敏面上。

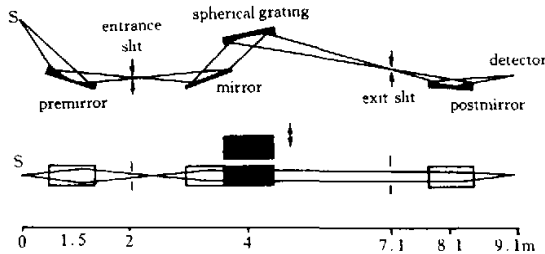


Fig. 1 The layout of the monochromator

已知球面光栅的聚焦方程^[6]为

$$\left(\frac{\cos^2\theta}{r} - \frac{\cos\alpha}{R}\right) + \left(\frac{\cos^2\beta}{r'} - \frac{\cos\beta}{R}\right) = 0, \quad (1)$$

式中 r, r' 分别为光栅的物距和像距, α, β 分别为入射角和出射角, R 为光栅的曲率半径。

设沿入射光线方向光栅到入缝的投影距离为 r_0 , 光栅到入射光线的垂直距离为 D_0 , 光束打在前

置镜上的掠射角为 φ , 则前置镜的物距为

$$r_m = r_0 - D_0/\tan 2\varphi. \quad (2)$$

由光学原理知, 平面前置镜成镜像, 其像距相当于 $r'_m = -r_m$, 所以, 对于球面光栅其物距为

$$r = -r'_m + D_0/\sin 2\varphi. \quad (3)$$

设入射主光束取水平方向, 若出射光束相对于入射光束沿顺时针方向偏离角 δ , 则有

$$2\varphi = \pi - (\alpha - \beta - \delta). \quad (4)$$

另外, 光线还必须满足光栅方程:

$$\sin\alpha + \sin\beta = Nk\lambda, \quad (5)$$

其中 N 为光栅的刻槽密度, k 为光谱衍射级次。

这个单色仪的工作原理是通过转动平面前置镜以改变光束打在球面光栅上的偏向角 $\theta = \alpha - \beta$, 并同时转动光栅, 在 θ 改变很小 ($< 1^\circ$) 的情况下, 使 (1) 式 ~ (5) 式在整个工作波段内都能满足。

为了使光束经过平面前置镜后打在光栅上的位置保持不变, 通常, 镜子的运动方式有两种: 一种是平面前置镜绕自身轴转动的同时, 沿入射光方向移动; 另一种是平面前置镜只绕镜面外的轴转动。由于第一种方式运动结构复杂, 实现困难, 所以采用简单可靠的第二种方式。

为了使光源和单色仪相匹配, 提高单色仪的集光能力, 需要使用前置聚焦系统。由于激光等离子体光源光点尺寸小, 类似点光源, 所以不采用软 X 射线单色仪常用的 Kirkpatrick-Baez 型正交镜^[7], 而采用一块超环面镜, 使其以 2 倍的缩放比将光源在垂直方向聚焦于入射狭缝, 在水平方向与后置光学系统协同聚焦于实验样品处。设计时在保证成像要求的同时尽可能增大其接收立体角以提高单色仪的效率, 其接收角为 $12 \text{ mrad(H)} \times 5 \text{ mrad(V)}$, 其中 H 和 V 分别表示水平方向和垂直方向。对于单色仪出缝输出光束, 采用一块易于加工的球面反射镜以 1:1 的缩放比将其聚焦于 X 光探测器上。

3 光学元件参数的确定

3.1 光栅参数的确定

按照 Chen 的理论^[1], 综合考虑光栅衍射效率、空间总体布局等因素, 选择光栅的 +1 级衍射光, 确定入射臂长 r_0 为 2000 mm, 出射臂长为 3100 mm。为了使单色仪覆盖 3 nm ~ 20 nm 的光谱范围, 选择两块光栅: G_1 (1050 l/mm) 和 G_2 (750 l/mm), 曲率半径分别为 17.200 m 和 15.400 m, 分别覆盖 3 nm ~ 8 nm 和 8 nm ~ 20 nm 的光谱范围。利用数值算法求解 (1) 式 ~ (5) 式可以求得不同波长对应的人射角 α 和衍射角 β , 再根据 (2) 式、(3) 式和 (4) 式可以给出在离焦像差为零的情况下, 不同波长对应的平面镜物距 r_m 和平面镜的掠入射角 φ 。

3.2 扫描机构参数确定

光栅以表面中心 o 为转动轴, 为了减小光栅的尺寸, 要求波长扫描过程中, 光束尽可能打到 o 点, 这样能减小面形误差对分辨率的影响。设计时是根据如图 2 所示的几何关系, 选择在三个工作波长处

使光束打在光栅中心, 在其余工作波长使光束偏移中心很小。依此设计思想, 考虑一般情况, 取 o 点为坐标原点, x 轴平行于入射光的光轴, 入射光的光轴交 y 轴于 D_0 。设前置平面镜的离轴转动中心为 $M(x_m, y_m)$, 转动半径为 R_m 。光轴与前置平面镜、 y 轴及光轴的交点分别为 I 、 A 、 G 。由图可得出以下关系式:

$$(x_m - x_1)\tan\varphi + R_m/\cos\varphi = y_m - D_0, \quad (6)$$

G 点在光栅表面的坐标为

$$W_G = y_A \cdot [\cos(2\varphi)/\cos\alpha]. \quad (7)$$

在实验室条件下, 根据有限的空间安排, 光栅的长度确定为 $L_g = 120 \text{ mm}$; 光栅到入射光束的垂直距离的确定应使得在最极端的情况下, 光栅的下端不挡住入射光束。依此原则, 取 $|D_0| = 20 \text{ mm}$, 经过优化, 最终可求得确定前置平面镜转轴空间位置的三个参量 (x_m, y_m) 和 R_m 。

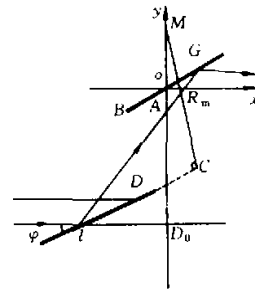


Fig. 2 The scheme of scanning theory

3.3 前、后置聚焦镜参数的确定

前置、后置聚焦镜的几何参数可由 Coddington 方程求得, 即:

$$\text{在子午面} 1/r + 1/r' = 2/R\cos\theta, \quad (8)$$

$$\text{在子午面} 1/r + 1/r' = 2\cos\theta/\rho. \quad (9)$$

式中, r 为物距, r' 为像距, R 、 ρ 分别为镜子的子午和弧矢曲率半径, θ 为主光线入射角。所有光学元件的基底材料选择石英, 光学表面的微观粗糙度要求为 2 nm, 光学表面镀金。现将计算结果列于表 1。

Table 1 Parameters of optical elements

	parameter /mm	deviation angle / ($^\circ$)	fig. accuracy (rms)/s	dimension /(mm^2)
pre-mirror (toroid)	$R = 14335$ $\rho = 81.6$	86	1	120×45
plane	$R = \infty$	160.92 ~ 163.71	0.2	120×40
spherical	$R = 17200$	163.30 ~ 162.96	0.5	100×30
grating	$R = 15400$	161.16 ~ 160.98	0.5	100×30
post-mirror (spherical)	$R = 22925$	87.5	0.5	120×45

4 分辨率的计算

光栅单色仪的分辨率受入射狭缝、出射狭缝、光学元件像差和面形斜距误差等分量的影响,系统总的分辨率是以上各项分量的卷积。

图 3 给出了各波长对应的分辨率曲线。在计算中,取前置镜面面形误差 $\sigma_M = 0.2''$, 球面镜面形误差 $\sigma_G = 0.5''$, 光栅长 $L_G = 120$ mm, 入缝和出缝的宽度都取 $50 \mu\text{m}$ 。由图可见,系统的分辨率都优于 1000,尤其在激光等离子体光源的 13 nm 处分辨率大于 2000。如果将入缝缩小,系统的分辨率还会提高很多,但在实验中为了增大光通量,狭缝不应开得太小。

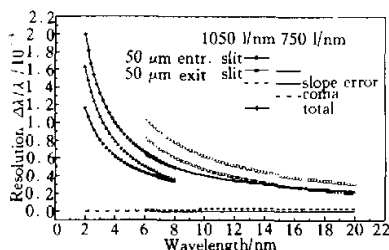


Fig. 3 The theoretical resolution of the monochromator

5 单色仪系统效率的分析

单色仪系统效率主要由反射镜的反射率、光栅衍射效率 ϵ_g 和单色仪对光源的几何透过率 ϵ_{opt} 决定。改进的球面光栅单色仪系统效率是以上各因素的乘积:

$$\epsilon = \epsilon_g \epsilon_{\text{opt}} R_{\text{TM}} R_{\text{PM}} R_{\text{SM}}, \quad (10)$$

式中, R_{TM} 、 R_{PM} 、 R_{SM} 分别表示前置超环面镜、单色仪中的前置平面镜和后置球面镜的反射率。

在软 X 射线波段,反射镜光学表面的粗糙度是影响反射率的重要因素,它会降低镜子对软 X 射线的反射率。粗糙表面的反射率为

$$R = R_0 \exp \left[-4 \sin^2 \theta \sqrt{n^2 - \cos^2 \theta} \left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (11)$$

式中 R_0 为理想光滑表面的反射率, θ 为光束的掠入射角, σ 为元件表面粗糙度 (rms)。因折射率 n 近似为 1, 所以通常上式可近似表示为

$$R = R_0 \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma \sin \theta}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (12)$$

即 Debye-Waller 公式。按此公式可知反射镜的反射率。为了达到较高的反射率,要求光学元件的粗糙度约为 2 nm 左右,同时要以较小的掠射角入射且

需镀重金属 Au 膜(计算时设反射镜表面镀厚 30 nm 的 Au 膜,表面粗糙度为 2 nm)。

单色仪系统的透过率是指由于孔阑及狭缝的遮挡导致的光线的通过率,可以利用光线追迹程序 SHADOW^[8] 计算得到。

光栅的衍射效率可利用 Nevier 的微分理论^[9] 来计算。适当选择光栅的刻槽深度和刻槽宽度与光栅周期的比率,不仅使光栅在所选波段能取得最大的衍射效率,且能起到抑制高次衍射的作用。图 4 为 1050 l/mm 和 750 l/mm 两种光栅在选择不同参数时的衍射效率计算结果。由图可见:1050 l/mm 的光栅在刻槽深为 6.5 nm、宽度与周期比为 0.55 时,750 l/mm 的光栅在刻槽深为 20 nm、宽度与周期比为 0.65 时,在相应波段的衍射效率较高。

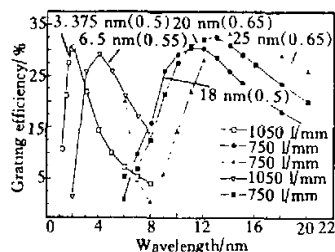


Fig. 4 The efficiency of gratings with different depth and duty ratio

图 5 给出了综合考虑以上几个因素后整个系统的传输效率的理论计算值。由图可见,系统的传输效率平均达到了 5% 左右。

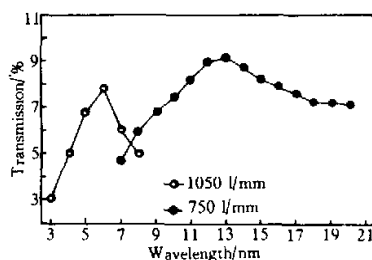


Fig. 5 The transmission of the monochromator

6 光线追迹及结果分析

在软 X 射线波段,由于存在严重的吸收现象,所以反射镜和光栅只有以掠入射方式工作才能获得足够高的反射率,但是掠入射的光学结构会产生严重的像差,影响系统的性能。因此,在设计到最后必须用光线追迹的方法对系统作精确的像质评价,以便验证设计的可行性。我们利用国际通用的光线追

迹程序 SHADOW 对软 X 射线源、单色仪系统作了精确的成像模拟。图 6 是在入、出缝开启宽度为 $50 \mu\text{m}$ 、单色仪的垂直和水平接收角分别为 5 mrad 和 12 mrad 的情况下 13 nm 和 13.00325 nm 两条谱线在单色仪的出缝平面处的光谱分布,显然谱线可被分开,其光谱分辨率极限达到 0.00325 ,这和前面的计算结果基本一致。

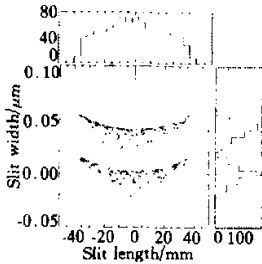


Fig. 6 The image and histogram distribution of 13 nm and 13.00325 nm at the exit slit

通过以上的分析,可以看到:1) 改进型球面光栅单色仪系统在整个工作波段内满足完全消除离焦的条件,而不需要移动入缝或出缝,使样品处的光斑更好,同时减轻了对后置聚焦系统的压力。2) 单色仪应用了简单的平面镜和球面光栅,光学元件易于加工,其面形误差精度一般可以达到约 $2 \mu\text{rad}$ (rms 值),这对得到高的光谱分辨率是很关键的。3) 通过仔细的选择光栅的参数,使系统具有较好的抑制高次衍射的能力。

结论 提出了一种掠入射球面光栅单色仪系统的设计方案,即在入缝和出缝均固定不动的情况下,通过在球面光栅前加平面反射镜来改变光栅偏向角,

从而提高系统分辨率的目的。文中还给出了系统的重要几何参数,计算了系统在相应波段的理论分辨率优于 2000 ,若考虑激光等离子体源的有限大小,则系统的分辨率在相应波段仍可达到 1000 ;对主要影响单色仪系统传输效率的光栅参数利用 Neveve 光栅衍射理论进行了优化设计。最后,利用通用的程序 SHADOW 对设计结果进行了验证,两者符合较好。不足之处是在短波段的效率不是太高,这主要是由于整个系统的长度受限而导致的。

参 考 文 献

- [1] Chen C T. Concept and design procedure for cylindrical element monochromators for synchrotron radiation. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1987, **A256**(3):595-604
- [2] Petersen H, Senf F, Scafers F *et al.*. Monochromators for the undulator U49 at the BESSY II storage ring. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(2):1777-1783
- [3] Padmore H A. Optimization of soft X-ray monochromators. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, **60**(7):1608-1702
- [4] Padmore A. Application of a simple rotational spherical grating mounting to high-resolution soft X-ray spectroscopy. *Proc. SPIE*, 1986, **733**:253-261
- [5] 吕丽军,王秋平,余小江. $4 \sim 120 \text{ nm}$ 波段的单色仪光束线设计. *光学学报*, 1999, **19**(1):117-123
- [6] Namioka T. The theory of the concave grating. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, **49**(5):446-460
- [7] Kirkpatrick P, Baez A V. Formation of optical images by X-rays. *J. Opt. Soc. Am.*, 1948, **38**(9):766-774
- [8] Lai B, Cerrina F. SHADOW: A synchrotron radiation ray tracing program. *Nucl. Instrum. Meth.*, 1986, (A)**246**(2):337-341
- [9] Nevie M, Vincent R, Petit P. Sur la theorie reseau conducteur et ses applications a l'optique. *Nouv. Rev. Opt.*, 1974 **5**(1):65-76

Optical Design for a Kind of Exactly Focusing Spherical Grating Monochromator

Gong Yan Chen Bo

(National Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

(Revised 20 September 1999; revised 20 March 2000)

Abstract: Optical design of a novel spherical grating monochromator is described, which is used in testing the soft X-ray spectra of a low debris laser produced plasma (LPP). By employing a variable deviation angle at the grating, it is possible to exactly focus the entrance slit on the exit slit in the wavelength range of $3 \text{ nm} \sim 20 \text{ nm}$. The effect of the key parameters is analyzed, and the optimum design is implemented. A resolution of $\lambda/\Delta\lambda \geq 2000$ at 13 nm has been achieved (the entrance slit is $50 \mu\text{m}$).

Key words: grazing incidence; spherical grating; monochromator; optical design