

文章编号: 1001-4322(2008)08-1265-05

155 mm 入射距离的 XUV 平场光谱仪参量设计*

霍海波^{1,2}, 李英骏¹, 程 涛¹

(1. 中国矿业大学, 北京 100083; 2. 郑州航空工业管理学院 数理系, 郑州 450015)

摘 要: 为了缩短掠入射 XUV 平场谱仪尺寸以方便其使用, 利用建立的光路追踪程序优化研究了当入射距离缩短为 155 mm, 聚焦面仍满足平面的条件下凹面光栅的各参量对谱线成像的影响。计算表明, 对于曲率半径为 5 649 mm、光栅标称间距为 1/1 200 mm 的凹面光栅, 当入射距离为 155 mm, 入射角为 87.5°, 聚焦参量为 $-21/R$, 彗差参量为 $4.655 \times 10^2/R^2$ 时, 可以在 12~40 nm 波段内得到优化的成像效果。

关键词: X 射线; X 射线平场光谱仪; 彗形像差; 入射距离; 聚焦

中图分类号: TH744.15 **文献标志码:** A

由于等离子体辐射的 X 射线中包含着等离子体状态的大量信息, 通过对谱线的测量可以得到等离子体的很多状态参量, 如电子密度、电子温度、电离度等。这些状态参量对 ICF 和 X 射线激光等物理过程的研究有着非常重要的意义。

目前的掠入射谱仪普遍使用的是变栅距刻线凹面光栅, 是由日本 T. Harada 等人研究设计的^[1], 日立公司利用数控机床加工而成。它既像 Rowland 凹面光栅一样同时具有分光 and 聚焦两项功能, 又具有谱线成像在一平场面上的特点。而后者是非常重要的, 因为它可以使平面的摄谱仪器 (CCD、条纹像机、微通道板等) 的配置更为方便。使用中采用掠入射方式是为了提高光栅对 X 射线的反射率。受日本 T. Harada 等人对凹面光栅设计的影响, 通常的掠入射平场谱仪的入射距离都是 237 mm。但在实际的实验应用中, 由于受到实验过程对真空的要求和激光等离子体相互作用靶室空间尺寸的限制, 使得以入射距离为 237 mm 而设计的谱仪必须被放置在相互作用靶室外部, 这大大增加了安装瞄准等操作的难度。为此, 李英骏等人提出了 155 mm 入射距离的设计方案^[4]。然而由于凹面光栅的形状不可避免地会存在像差和像散, 而在靶室中使用辅助光路来减小像差和像散的方法又不容易实现。同时由于光学仪器的吸收、散射等原因又会减少入射光的强度而影响测量结果。所以在实验条件的限制下如何合理地设计光栅参量, 使光线实现聚焦在平场的同时又能尽量使像差和像散最小, 就显得尤其重要。

本文首先利用建立的光路追踪程序研究了光栅参量对聚焦平场的影响, 计算了将入射距离缩短为 155 mm 时不同光栅参量在新入射距离下的聚焦成像, 给出了与彗差有关的彗差参量 M_{30} 。

1 基本方程

如图 1 所示, 以光栅中心为坐标原点建立直角坐标系。其中, α 为入射角, β 为衍射角, 坐标原点为凹面光栅球形面的顶点 o ; x 轴垂直于光栅, 而 y 轴和 z 轴分别垂直和平行于在 o 点的刻线, $A(x, y, o)$ 点为入射点光源, $B(x', y', o)$ 为成像点。 AoB 和 APB 为其中的两条入射光线。 $P(u, w, l)$ 是除光栅中心点外的任意入射点的坐标, 利用 T. Harada 等人的结果^[1], 通过凹面光栅的光路函数可以表示为

$$F = r + r' + wF_{10} + w^2F_{20} + l^2F_{02} + w^3F_{30} + w^2l^2F_{12} + w^2l^2F_{22} + w^4F_{40} + l^4F_{04} + o(w^5) \quad (1)$$

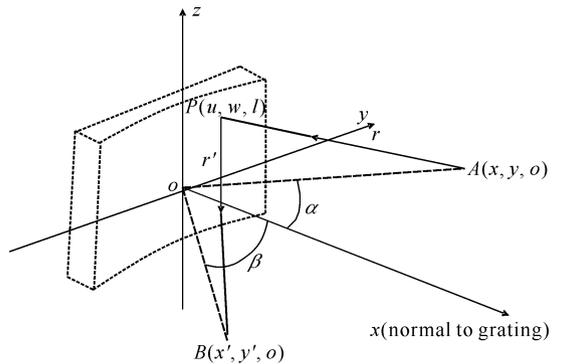


Fig. 1 Light path of the aberration-corrected concave gratings
图 1 变栅距刻线光栅的光路图

* 收稿日期: 2007-09-17; 修订日期: 2008-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10474137); 国家高技术发展计划项目; 国家 973 项目

作者简介: 霍海波 (1980—), 男, 硕士研究生, 主要从事 X 射线方面的研究; hhb-18@163.com.

联系作者: 李英骏, lyj@aphy. iphy. ac. cn.

式中: $o(\omega^5)$ 是比 ω^5 更高阶的项; F_{10} 与光栅的色散有关; F_{20} 与光谱方向聚焦条件有关; F_{02} 与像散性有关; F_{30} 与彗形像差有关;而其它 F_{ij} 项与高阶像差有关,且 F_{ij} 可以表示为

$$F_{ij} = C_{ij} + \frac{m\lambda}{\sigma_0} M_{ij} \quad (2)$$

式中: m 为衍射级次; λ 为入射光的波长; C_{ij} 是与传统等栅距刻线相关的项; M_{ij} 是与变栅距曲线刻线相关的相差修正项; σ_0 是光栅的刻线标称栅距,由于实际的光栅间距是变化的,为与等栅距光栅的光栅常数 d 区别,在此采用 σ_0 来表示。 C_{ij} 和 M_{ij} 的直接表达式为

$$C_{10} = -\sin\alpha - \sin\beta \quad (3)$$

$$M_{10} = 1 \quad (4)$$

$$C_{20} = \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2\alpha}{r} - \frac{\cos\alpha}{R} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2\beta}{r'} - \frac{\cos\beta}{R} \right) \quad (5)$$

$$M_{20} = \frac{1}{R} \left(b_2 - \frac{\tan\theta}{2} \right) \quad (6)$$

$$C_{02} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos\alpha}{R} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r'} - \frac{\cos\beta}{R} \right) \quad (7)$$

$$M_{02} = -\frac{\tan\theta}{2R} \quad (8)$$

$$C_{30} = \frac{1}{2} \frac{\sin\alpha}{r} \left(\frac{\cos^2\alpha}{r} - \frac{\cos\alpha}{R} \right) + \frac{1}{2} \frac{\sin\beta}{r'} \left(\frac{\cos^2\beta}{r'} - \frac{\cos\beta}{R} \right) \quad (9)$$

$$M_{30} = \frac{1}{R^2} (b_3 - b_2 \tan^2\theta) \quad (10)$$

以上式中: r 为入射狭缝到光栅中心 o (坐标原点,下同)的距离; R 为光栅的曲率半径; r' 为光栅中心 o 到焦平面的距离。由上面的式子中不难看出: C_{ij} 与光栅的曲率半径、光源到光栅中心 o 的距离、成像点到光栅中心 o 的距离、入射角及衍射角有关;而 M_{ij} 与光栅的加工参量 θ 和 b_2, b_3, \dots, b_k 有关。而且为了得到好的成像,可以通过分别选择 M_{02}, M_{20} 和 M_{30} 的值来确定参量 θ, b_2 和 b_3 。当这些参量确定后,就可以设计出对应于光栅上每点所需的间距(其倒数为光栅常数),根据光栅间距的公式

$$\sigma = \sigma_0 / \left(1 + \frac{2b_2}{R} \omega_\theta + \frac{3b_3}{R^2} \omega_\theta^3 + \frac{4b_4}{R^3} \omega_\theta^3 + \dots \right) \quad (11)$$

$$\omega_\theta = \omega - u \tan\theta \quad (12)$$

式中: u, ω 分别与入射点的坐标相对应。这就是变栅距刻线光栅的设计方法。

在利用像差校正凹面光栅设计平场摄谱仪时,为了获得理想的点聚焦成像,必须满足

$$\frac{\partial F}{\partial \omega} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial l} = 0, \quad F_{ij} = 0 \quad (13)$$

这就保证了普通的入射光线也能够与通过光源中心的入射光线聚焦点坐标相同。利用衍射光栅方程我们编制了光栅的光路追踪程序,并利用该程序计算研究了不同参量对光栅成像的影响。

2 计算结果与讨论

为了优化入射距离为 155 mm 时不同参量对平焦场面和彗差的影响,我们首先计算了聚焦项 M_{20} 取不同值时聚焦场面的变化,并与入射距离为 237 mm 的标准情况进行了比较。然后在聚焦场满足平场的条件下,比较计算了不同 M_{20} 参量对彗差的影响,并对彗差的影响进行了优化选择。

2.1 不同聚焦项 M_{20} 对实现平焦场面的影响

为了便于比较,我们首先选取与 T. Harada 等人研究中相同的条件:入射距离 $r=237$ mm, $\sigma_0=1/1\ 200$ mm, $R=5\ 649$ mm,对不同的 M_{20} 利用程序计算了各自的聚焦场面,结果如图 2(a)所示。可见当入射角为 87° 时,在距离光栅中心 o 为 235 mm 处存在一个近似的平场面,具体参数见表 1,其中出射到 x 平面距离的最大值为 236.49 mm,最小值为 233.23 mm, T. Harada 等人用此光栅测量 5~20 nm 的波段^[1],以 235 mm 为平场面,误差范围为 ± 1.49 mm。而且,其最佳的波段范围从 10 nm 到 20 nm。而当波长从 5 nm 到 10 nm 时,与平场面的误差值为 ± 1.49 mm,明显位于误差的上限范围。

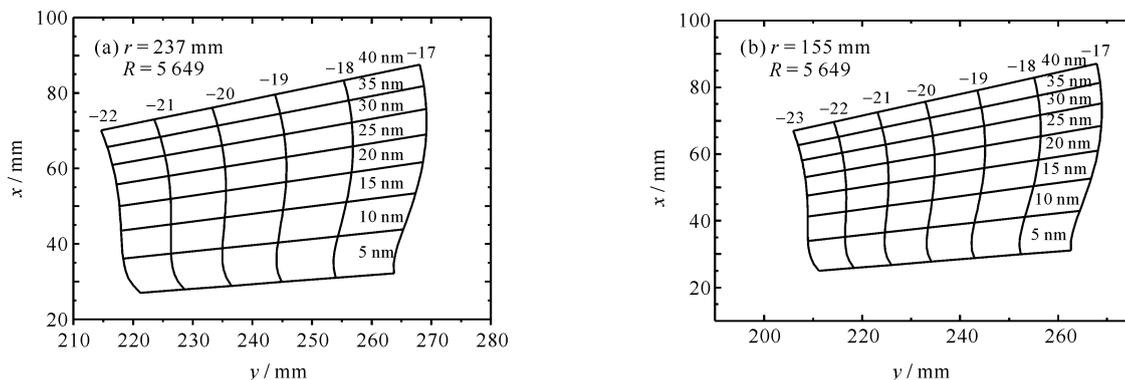


Fig. 2 Focusing flat-field figure of different focusing parameter M_{20}

图 2 不同的聚焦参量 M_{20} 形成的聚焦平场图

表 1 入射距离为 237 mm 的聚焦平场位置

Table 1 Flat-field position when the incident distance is 237 mm

λ/nm	flat-field distance/mm
5	236.49
10	234.98
15	235.38
20	235.57
25	235.39
30	234.90
35	234.17
40	233.23

表 2 入射距离为 155 mm 的聚焦平场位置比较

Table 2 Flat-field position when the incident distance is 155 mm

λ/nm	flat-field distance/mm	
	$M_{20} = -21/R$	$M_{20} = -20/R$
5	225.95	234.12
10	224.67	233.44
15	225.17	234.30
20	225.40	234.75
25	225.25	234.76
30	224.78	234.39
35	224.07	233.75
40	223.16	232.88

相同地,参考李英俊等人的工作^[2-4],我们将入射距离缩短为 155 mm, σ_0 和 R 不变,分别为 1/1 200 mm 和 5 649 mm,对于不同的 M_{20} ,利用程序计算了各自的聚焦场面,结果当入射角为 87.5° 时存在两个较理想的近似平场面,如图 2(b) 所示,具体数据见表 2。

由图 2(b) 和表 2 可见,当入射角 $\alpha = 87.5^\circ$ 时,在入射距离为 237 mm 的误差范围内,从 $M_{20} = -21/R$ 到 $M_{20} = -20/R$ 都可以形成近似平场,选择不同的参量 M_{20} 将聚焦到不同位置的平场,当光栅参量 $M_{20} = -20/R$ 时,平场距离光栅中心 o 为 234 mm 处可形成平场;而当 $M_{20} = -21/R$ 时在 225 mm 处可形成平场。可见,尤其是当 $M_{20} = -21/R$ 时,聚焦平场相对于入射距离为 237 mm 的谱仪来说向前移动了近 10 mm,这对于有限的靶室空间来说是非常有利的。

2.2 彗形像差的计算

在平场场的计算完成后,彗差的影响就成为了优化谱线成像的判定依据。所谓彗形像差是指傍轴物点发出的宽阔光束经光具组后在焦平面上不再交于一点,而是形成状如彗星的亮斑,故称之为彗形像差。传统的消除彗差的方法是利用配曲法可消除单个透镜的彗差,也可以利用粘和透镜来消除彗差。但考虑到相关材料对 X 射线的吸收导致的反射率的显著减少,以上方法在掠入射变栅距光栅平场谱仪中无法实现。

变栅距光栅的光路函数 F_{30} 项对应着彗差值,形成的彗差形状则与具体的入射光源形状相关。在本文中,我们考虑了以点光源入射时描述彗差的 F_{30} ,给出了在实现平场的前提下减小彗差的设计参量 M_{30} ,进一步计算了在此参量下具体的 F_{30} 值,并与标准的入射距离为 237 mm 的情况进行了比较。

考虑到在 T. Harada 等人的工作中^[5-7],对于 $r = 237$ mm,曲率半径 $R = 5\ 649$ mm,入射角为 87° ,标称间距为 1/1 200 mm,当中心波长为 10 nm 时,其优化参量为 $M_{20} = -20/R, M_{30} = 4.558 \times 10^2 / R^2$ 。为了验证我们的程序,在与 T. Harada 相同的条件下对彗差项进行了计算,结果与文献中的结果相吻合。但由于凹面光栅本身所具有的特点,使得成像不可能在所有波长范围内使彗差完全消除,而只能根据实际需要选择特定波长范围使彗差值尽可能最小。为此我们进一步计算了入射距离为 155 mm,聚焦参量分别为 $M_{20} = -20/R$ 和 $M_{20} = -21/R$ 时的彗差参量 M_{30} 对应不同波长的变化曲线,见图 3。由图中可见,对应于 $M_{20} = -20/R$ 和 $M_{20} = -21/R$

R, M_{30} 在 10~40 nm 波段内的变化不大,也就是说在此波段内可以忽略彗差所带来的影响。且当 $M_{20} = -21/R$ 时,我们选择变化较为平缓的波段范围 10~40 nm,见图 3 中点划线所示。利用取平均值的方法,计算得出 $M_{30} = 4.558 \times 10^2 / R^2$ 。

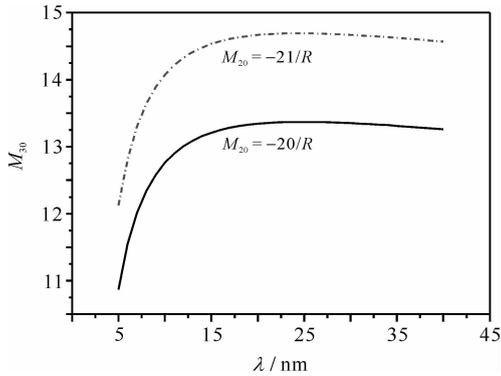


Fig. 3 Value of M_{30} varies with the wavelength when the incidence ray focusing to a flat-field

图 3 在实现平焦场条件下, M_{30} 随波长的变化曲线

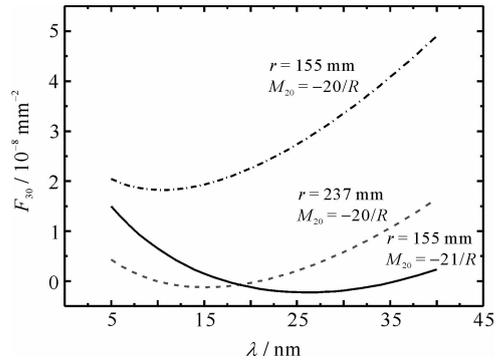


Fig. 4 Curves of F_{30} when the incident distance is 237 mm and 155 mm

图 4 入射距离 237 mm 和 155 mm 形成的 F_{30} 曲线

在彗差参量选定好以后,我们进一步计算对比了两种不同入射距离在选定参量下的 F_{30} 值大小,以便得出新入射距离光栅的适用波长范围和误差。由图 4 中虚线可以看出,当入射距离为 237 mm 时,短波长波段处的 F_{30} 值相对较小,所以在 T. Harada 等人的设计中,他们通过选择其中波长为 10 nm 时的 F_{30} 值等于零来设计参量 M_{30} ,并通过计算给出了 F_{30} 误差的标准,得到了误差在其误差范围内的适用波段范围为 5~20 nm^[7]。计算表明对于入射距离为 237 mm 的设计方案,在 5~20 nm 的波段内也是有彗差的,其正向最大 F_{30} 值对应波长 5 nm 时为 $F_{30} = 4.31 \times 10^{-3} / \text{m}^2$,负向最大值对应波长 15 nm 时为 $F_{30} = -1.209 \times 10^{-3} / \text{m}^2$ 。而入射距离变为 155 mm 时,对应原有的光栅参量 $M_{20} = -20/R, M_{30} = 4.558 \times 10^2 / R^2$,由图 4 中点划线可见 F_{30} 值较大,彗差的影响较明显。将光栅参量改变为 $M_{20} = -21/R, M_{30} = 4.655 \times 10^2 / R^2$ 后可以看出(图中实线)在 12~40 nm 波段 F_{30} 值相对较小,波长为 12 nm 时 $F_{30} = 4.202 \times 10^{-3} / \text{m}^2$,负向最大值对应波长 26 nm 时为 $F_{30} = -2.245 \times 10^{-3} / \text{m}^2$ 。在 18~20 nm 和 33~35 nm 波段 F_{30} 值小于入射距离为 237 mm 时的负向最大值 $F_{30} = -1.209 \times 10^{-3} / \text{m}^2$ 。测量效果会比较好,但其余波段的绝对值也均在 $4.31 \times 10^{-3} / \text{m}^2$ 之内,因此用入射距离为 155 mm 的谱仪来测量 12~40 nm 的 X 射线是可以忽略彗差所带来的影响的。但当所需测量的波长超出这个优化波段时,需要给予适当的补偿。由此,我们用入射距离为 155 mm 的谱仪来测量 X 射线,在保证实现聚焦平场的前提下,优化的测量波段为 12~40 nm。

在实际应用中,通常在 5 nm 时已经开始使用,而对于 155 mm 的谱仪设计,在 5~10 nm 波段 F_{30} 值较 10~40 nm 波段大。当 $M_{30} = 4.655 \times 10^2 / R^2$ 时, F_{30} 的计算结果如表 3 所示。可以看出,在短波长处, F_{30} 值较大,单位面积上接收到的光强减小,但仍然可以应用于光谱测量。

由以上结果可见,相比于入射距离为 237 mm 的谱仪设计,入射距离为 155 mm 的设计方案具有以下优点:(1)入射距离和出射距离变短,节省了靶室的空间。这在空间有限的靶室中是非常实用的。(2)入射距离为 155 mm 的新设计在 12~40 nm 波段彗差值较小,而在 5~10 nm 波段 F_{30} 值较大,在使用中需要加以考虑。通过设计参量后,彗差对较短波长处影响较大,但新设计的测量范围变宽。

3 结 论

本文利用建立的光路追踪程序,优化研究了当入射距离缩短为 155 mm,聚焦面仍满足平面的条件下凹面光栅的各参量对谱线成像的影响。计算表明对于曲率半径为 5 649 mm、光栅标称间距为 1/1 200 mm 的凹面光栅,当入射距离等于 155 mm 时,满足平焦场的入射角等于 87.5°。当聚焦参量为 $-21/R$,彗差参量为 4.655

表 3 5~10 nm 波段相应的 F_{30} 值

Table 3 Value of F_{30} at 5~10 nm band

λ / nm	F_{30} / m^{-2}
5	0.014 791 0
6	0.012 696 0
7	0.010 804 2
8	0.009 095 8
9	0.007 552 2
10	0.006 156 6

$\times 10^2/R^2$ 时,可以在 12~40 nm 波段内得到优化的成像效果。该优化设计为将掠入射平场谱仪的尺寸缩小以方便使用提供了一种有效的途径。

参考文献:

- [1] Harada T, Toshiaki K. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings[J]. *Appl Opt*, 1980, **19**(23):3987-3993.
- [2] 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**(5):863-867.(Li Y J, Yang J L, Zhang J. Imaging study of flat-field gratings for non-point light source. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(5):863-867)
- [3] 李英骏,张杰,彭翰生,等.可变入射距离平场谱仪的概念设计[J].强激光与粒子束,1998,**10**(3):409-413.(Li Y J, Zhang J, Peng H S, et al. A concept design of the flat-field spectrograph for incidence distanced variable. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(3):409-413)
- [4] 李英骏,杨建伦,张保汉,等.一台入射距离为 155 mm 的 XUV 平场光谱仪[J].强激光与粒子束,2000,**12**(5):582-584.(Li Y J, Yang J L, Zhang B H, et al. A flat-field XUV spectrometer with 155 mm incidence distance. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(5):582-584)
- [5] Iwanaga R, Oshio T. Aberration reduced mechanically ruled grating for simple rotational mounting[J]. *J Opt Soc Am*, 1979, **69**(11):1538-1546.
- [6] Noda H, Namioka T, Seya M. Design of holographic concave gratings for Seya-Namioka monochromators[J]. *J Opt Soc Am*, 1974, **64**:1043-1048.
- [7] Kita T, Tatsuo Harada T, Nakano N. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings for a flat-field grazing-incidence spectrograph[J]. *Appl Opt*, 1983, **22**(4):512-513.

Parameters of XUV spectrometer with 155 mm incident distance

HUO Hai-bo^{1,2}, LI Ying-jun¹, CHENG Tao¹

(1. *China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China*;

2. *Department of Mathematics and Physics, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China*)

Abstract: In order to make the grazing incidence XUV flat-field spectrograph's size shorter for the convenience of use, a ray-tracing code is set to research the influence of the concave grating's parameter on the spectrum imaging when the incident distance is 155 mm and the focusing surface is still flat. It is found that for the concave grating with curvature radius of 5 649 mm and 1/1 200 nm nominal spacing of the grooves, the angle of incidence is 87.5°, when the incident distance is 155 mm, the focus parameter is $-21/R$ and the coma-type aberration parameter is $4.655 \times 10^2/R^2$, a better imaging effect within the wave band of 12~40 nm is realized.

Key words: X-ray; X-ray flat-field spectrum apparatus; Coma-type aberration; Incident distance; Focusing