

文章编号 1004-924X(2006)06-0986-04

压弯光栅线密度检测

刘 斌,楼 俊,刘正坤,王秋平,徐向东,付绍军
(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室,安徽 合肥,230029)

摘要:对压弯光栅的线密度进行了实验研究。首先制作了大变化率的变线距光栅(约 9.2 line/mm),并选取薄玻璃(0.16 mm)作为光栅基底材料。其后采用长程面形仪测试压弯后光栅面形,使用衍射法测试压弯前后光栅线密度,从而得到线密度的变化曲线。实验与理论计算结果误差小于 0.41 line/mm rms。

关键词:压弯光栅;线密度;光学检测

中图分类号:O436.1;TH741 **文献标识码:**A

Determination of groove density for bending gratings

LIU Bin, LOU Jun, LIU Zheng-kun, WANG Qiu-ping, XU Xiang-dong, FU Shao-jun

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and
Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract: Primary researches on the groove density variations of bending grating were experimented. Firstly, highly varied line-spacing gratings (nearly 9.2 line/mm) were fabricated. Meanwhile thin glasses with the thickness 0.16 mm were chosen as their substrates. Consequently, the long trace profiler was used to test the curved substrates precisely and the groove density of the gratings were measured by diffractive method. Experimental result shows that the error is 0.41 line/mm rms between experimental and theoretical values.

Key words: bending grating; groove density; optical metrology

1 引 言

由于具有自聚焦、消像差的特性,在许多同步辐射装置中采用变间距(VLS)光栅作为光束线单色器的分光元件^[1-2]。为提高单色器的分辨率及光子通量,研究者们尝试了很多不同类型的单色器。近年来,人们对压弯光栅展开了研究,并取得一定的进展^[3-6]。传统 VLS 光栅单色器只能在一

个波长附近消除某些特定像差,它限制了单色器整个波段范围的分辨率。而在压弯光栅单色器中,针对单色器的不同波长,调整光栅的面形,从而能一定程度上减小光栅成像像差对单色器分辨率的损害,进而在整个波段范围内实现较高分辨率。

因此,对压弯光栅进行高精度的检测,包括对光栅面形及其线密度进行测试就显得较为重要。目前,发展了以下几种光栅线密度的检测方法:原

收稿日期:2006-01-09;修订日期:2006-05-17.

基金项目:教育部 211 工程资助项目(No. W15211070200)

子力显微镜法(AFM: Atomic force microscopy),能检测光栅的局部线间距及粗糙度,但它不能评价光栅线密度的整体性能;由法国 Jobin-Yvon 公司发展的莫尔条纹法(Moiré fringe method)是一种干涉测量方法^[7-8],需要一个已知线密度的标准光栅;长程面形仪(LTP: long trace profiler)由于对小角度测量具有很高的灵敏度^[9],常用来测试同步辐射光束线上的光学镜, Daniele Cocco (ELETTRA)在此基础上发展了 LTP 测试光栅线密度的方法^[10-11],但由于受 LTP 角度测量范围的限制,待测光栅线密度变化不能太大;光栅生产厂家常采用衍射法检测光栅性能,是光栅线密度测试的一种基本方法^[12-13]。

本文对压弯光栅线密度进行了实验研究。光栅压弯后,采用长程面形仪测试压弯后的面形,使用衍射法检测压弯前后的线密度,得到两者间的变化关系。实验结果对于压弯光栅单色器的研究具有一定意义。

2 压弯光栅测试系统的组成

2.1 衍射法测量光栅线密度

人们一般如公式(1)所示对 VLS 光栅进行描述,其中 N_0 为光栅原点处的线密度, N_{10} - N_{30} 分别为光栅线密度的变化参数。衍射法一般采用 Littrow 放置(入射角 α = 衍射角 β),它具有结构简单、测试精度高等优点,实验证明可达到 $dN/N = 1 \times 10^{-4}$ 的水平^[12-13]。其测试原理如图 1 所示:中心波长为 λ 的入射光,入射到光栅原点处,调整光栅使得零级反射光自准直返回,即确定了光栅的法线方向。转动光栅,使光栅衍射后的 ± 1 级光均满足 Littrow 条件,再次记录角度编码器的位置,得到衍射角 β 。于是,原点处的光栅线密度可得:

$$N(x) = N_0(1 + N_{10}x + N_{20}x^2 + N_{30}x^3 + \dots), \quad (1)$$

$$N = 2 \sin \beta / (m\lambda). \quad (2)$$

其中 m 为光栅衍射级次。在测量过程中,入射光方向与探测器的位置是固定不动的。为了测试光栅不同位置处的线密度情况,光栅沿导轨线性移动,使得入射光能沿着光栅基底进行扫描测试。在光栅每个位置的测试中,均重复以上步骤,如此可得到一组线密度 $N(x)$,即完成光栅线密度的一次测量。其测试系统如图 2 所示:激光光源通

过半透半反镜入射到光栅表面,衍射后自准直返回,经反射镜反射后光斑的位置信息由 CCD 接收,光栅置于转台和线性导轨上,以便实现转动和移动的功能。采用 HUBER 系列 420 型回转工作台, HEDENHAIN 公司圆光栅编码器进行角度测量; HUBER 系列 5101.3 直线导轨移动光栅; Duma 公司 SPOTCCD-VIS 系列 CCD 用于探测衍射光斑位置。

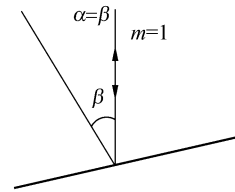


图 1 衍射法测量原理图(Littrow 放置)

Fig. 1 Principle of the measuring system based on diffractive method (Littrow mounting)

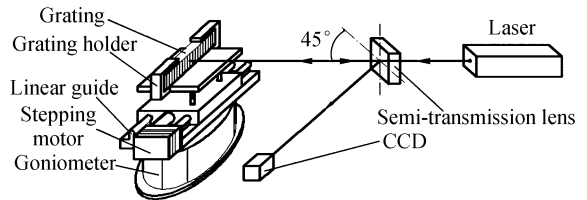


图 2 测试系统示意图

Fig. 2 Sketch of the measuring system

2.2 长程面形仪

长程面形轮廓测量仪在同步辐射光学镜的面形检测中具有很高的精度,它是基于顺序扫描策略而实现非球面轮廓测量的轮廓仪,光学系统本质上是一个 f - θ 透镜系统(如图 3 所示):两束平行光沿待测元件的主方向进行扫描,反射后经透镜成像在探测器上的是干涉条纹;在扫描过程中,由于待测元件面形是变化的,所以探测器接收到干涉条纹也是变化;通过记录每个条纹的位置,可以得到光学元件该处的角度值($\alpha = d/2f, f \gg d$)。每扫描一次,得到一组角度变化曲线(即 slope 曲线),该曲线反映了待测光学元件的面形参数。采用双光束干涉的暗条纹准直方法是为了提高仪器对角度测量的分辨率。2004 年初,国家同步辐射实验室(NSRL)与 Qian(美国, BNL)合作,开始研发新型的长程面形仪。并于 2005 年成功研制了新型的长程面形仪^[9],如图 4 所示:该仪器具有精度高、角度测量范围大、光学头尺寸小等优点,适用于一般光学镜的检测。

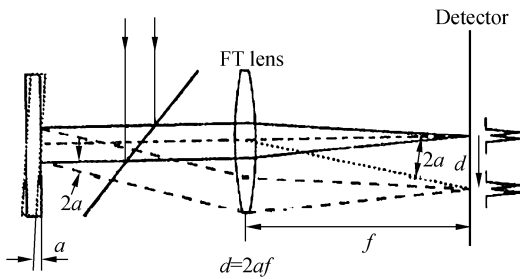
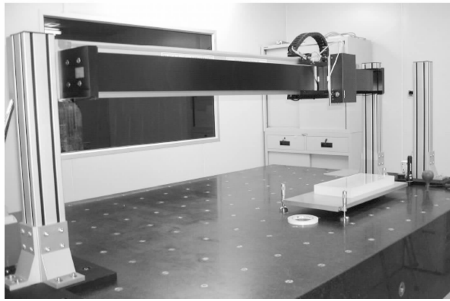
图 3 扫描轮廓测量仪的基本原理($f-\theta$ 透镜系统)Fig. 3 Basic principle of the surface scanning profiler ($f-\theta$ system)

图 4 新型长程面形仪装置

Fig. 4 Photo of the advanced long trace profiler in NSRL

3 理论分析及实验结果

同步辐射光束线的压弯镜或压弯光栅单色器,其工作时的压弯的程度通常是较小的。但为了测出压弯后光栅线密度的变化情况,期望压弯前后的线密度有较大变化。而此变化主要由以下两个方面决定的^[5-6]:光栅自身参数;弯曲的程度。为此,设计了大变化率的变线距光栅(约 9.2 line/mm),并采用全息方法制作;基底为薄玻璃材料(厚度约 0.16 mm,便于弯曲),尺寸为 100 mm×30 mm×0.16 mm。图 5 为光栅弯曲后在长程面形仪下的测试结果,其拟合面形如式(3)所示。

$$Y=C(x)=c_2x^2+c_3x^3, \\ c_2=2.373\times 10^{-3}, c_3=-1.220\times 10^{-5}. \quad (3)$$

图 6 为该平面变线距光栅压弯前线密度测试结果,三次多项式拟合可得到线密度的各个参数:

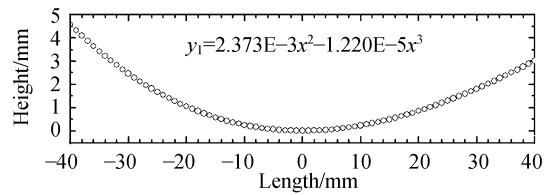


图 5 光栅弯曲后的拟合面形

Fig. 5 Fitted profile of the bending grating

$N_0 = 958.222 \text{ line/mm}$, $N_{10} = 9.625 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$, $N_{20} = 3.673 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-2}$, $N_{30} = 1.200 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-3}$ 。光栅压弯后,结合公式(1)、(3),其绝对线密度应为^[5-6]:

$$N_c(x) = N \left(\int_0^x [1 + C'(x)]^2 dx \right) = \\ N_0 \left[1 + N_{10}x + N_{20}x^2 + (N_{30} + \frac{2}{3}c_2^2N_{10})x^3 \right], \quad (4)$$

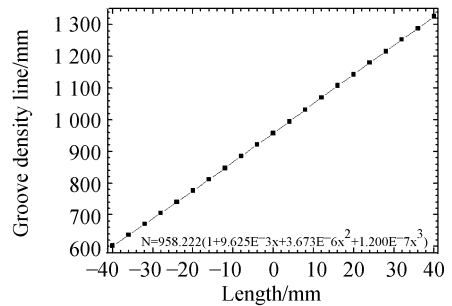


图 6 平面变线距光栅的线密度曲线

Fig. 6 Fitted groove density of the plane VLS grating

衍射法在测量小曲率非平面光栅线密度时,面形弯曲与离轴误差的耦合对测量精度影响较大^[13],补偿后光栅线密度的理论测量值为:

$$N_e(x) = N_c(x)[1 - C(x)C''(x)] = \\ N_0 \left[1 + N_{10}x + (N_{20} - 2c_2^2)x^2 + \right. \\ \left. (N_{30} - \frac{4}{3}c_2^2N_{10} - 8c_2c_3)x^3 \right], \quad (5)$$

$$N_e(x) - N(x) =$$

$$N_0 \left[-2c_2^2x^2 + (-\frac{4}{3}c_2^2N_{10} - 8c_2c_3)x^3 \right]. \quad (6)$$

公式(6)为压弯前后,光栅线密度变化的理论表达式。实验测量结果与理论计算值分别如图 7 中曲线(a)、(b)所示,两者间误差为 0.41 line/mm rms(图 7(c)曲线)。

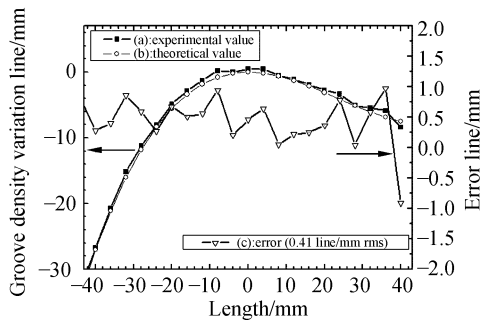


图 7 压弯光栅线密度的测试曲线

Fig. 7 Experimental and theoretical groove density variations of bending gratings

4 结 论

为验证压弯前后光栅线密度的变化情况,本文对压弯后的光栅线密度进行了实验测试研究。实验与理论计算结果误差小于 0.41 line/mm rms,从而在一定程度上验证了有关变曲率光栅线密度变化与弯曲面形之间的数学关系,为变曲率光栅单色器的实用化打下了一定的基础。

参考文献:

- [1] ITOU M, HARADA T. Soft X-ray monochromator with a varied-space plane grating for synchrotron radiation: design and evaluation[J]. *Applied Optics*, 1989,28(1): 146.
- [2] HAASS M, JIA J J. Varied groove spaced grating monochromators for synchrotron light sources[J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 1994,347: 258.
- [3] PALMER C, MCKINNEY W R. Imaging properties of varied line-space (VLS) gratings with adjustable curvature [J]. *SPIE*, 1998, 3450: 87-102.
- [4] CHEN S J, CHEN C T. Design and fabrication of an active polynomial grating for soft-X-ray monochromators and spectrometers[J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2001,467-468: 298-301.
- [5] LIU B, HU ZH W, WANG Q P, et al. Generalized groove density equation concerning bending-grating-related imaging properties[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, 23(5): 1135-1140.
- [6] 刘斌,王秋平. 压弯光栅线密度变化分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 224-228.
LIU B, WANG Q P. Analysis of groove density for diffraction grating during bending[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 224-228. (in Chinese)
- [7] 朱向冰,付绍军. 对变线距光栅干涉测量中的环形条纹的分析[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6): 634-638.
ZHU X B, FU SH J. Explanation of the round interference fringes in the measurement of varied-line-space gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 634-638. (in Chinese)
- [8] 朱向冰,付绍军. 消像差光栅的理论及实验研究[J]. *光学精密工程*, 2003,11(4):354-358.
ZHU X B, FU SH J. Theory, design, manufacture and measurement of a aberration reducing gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003,11(4): 354-358. (in Chinese)
- [9] QIAN SH N, WANG Q P. Multiple functions long trace profiler (LTP-MF) for national synchrotron radiation laboratory of china[J]. *SPIE*, 2005, 5921: 592104-1-592104-7.
- [10] COCCO D, SERGO R. High-precision measurements of the groove density of diffraction gratings[J]. *SPIE*, 2000, 4146: 143-150.
- [11] COCCO D, SERGO R. Technique for measuring the groove density of diffraction gratings using the long trace profiler[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, 74(7): 3544-3548.
- [12] 陈锵,胡中文. 变间距光栅刻线密度测试系统的性能评价[J]. *核技术*, 2004,27(1):9-13.
CHEN Q, HU ZH W. Performance of a grating groove density measuring system by diffraction method[J]. *Nucl. Tech.*, 2004,27(1):9-13. (in Chinese)
- [13] HU ZH W, LIU Z P. Determination of groove spacings for concave diffraction gratings[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, 75(11): 4419-4422.

作者简介:刘 斌(1980—),男,江西吉安人,中国科学技术大学国家同步辐射实验室博士研究生。主要从事光学检测、光栅成像理论与压弯光栅的研究。E-mail:figo_abin@163.com