

单色仪转角重复精度的相位板衍射准直方法测量

巩志华 陈敏 王勇 严睿 郇仁忠

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要 为准确测量上海光源软 X 射线谱学显微光束线采用的变包含角平面光栅单色仪的转角重复精度, 提出了一种新的基于相位板衍射准直技术的测量方法。该方法将半导体激光单模光纤和相位板衍射准直技术结合起来, 利用面阵 CCD 采集图像, 通过测量光斑的位移变化确定平面镜和光栅的角度变化。实验表明, 该方法可以测量掠入射情况下单色仪联动时的转角重复精度, 测量精度可达 $\pm 0.1''$, 此测量精度优于同等实验条件下的商用 ELCOMAT 3000 自准直仪的测量精度。

关键词 测量; 相位板; 衍射准直; 平面光栅单色仪

中图分类号 TN741.1+4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092910.2813

Measurement of Monochromator's Angle Repeatability by Phase Plate Diffraction Collimation Method

Gong Zhihua Chen Min Wang Yong Yan Rui Tai Renzhong

(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Institute of Applied Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In order to measure the mechanical angle repeatability of the variable-included-angle plane-grating-monochromator used in soft X-ray spectro-microscopy beamline at Shanghai Synchrotron Radiation Facility, a new method was proposed based on the phase plate diffraction collimation. This system was designed combining laser diode fiber with phase plate diffraction collimation technique. A 2-dimension CCD was adopted to collect the images, which was used to measure the displacement of the light spot, thus the angle repeatability of the plane mirror and the grating could be determined. The results show that this method could be used to measure the monochromator's angle repeatability in a higher precision estimated to be $\pm 0.1''$, which is better than that measured by the commercial ELCOMAT 3000 auto collimator used in the same condition.

Key words measurement; phase plate; diffraction collimation; plane-grating-monochromator

1 引言

第三代同步辐射光由于其光谱连续, 亮度高, 准直性好, 又有偏振, 脉冲时间结构等特点, 与常规光源相比有很大的优越性^[1], 但同时也对传输过程中的光学元件的机械精度提出了很高的要求。如上海光源首批建造的七条光束线之一的软 X 射线谱学显微光束线, 采用变包含角平面光栅单色仪^[2,3], 单色仪机械结构的精度直接影响出射光束的能量稳定性及能量分辨能力。为了实现具有较高能量分辨率

的光束输出, 要求平面镜和光栅的转角重复精度小于 $0.43''$, 联动时光斑漂移小于 $1.1''$ 。

目前, 可测量此精度要求的仪器主要有激光干涉仪^[4]和光电自准直仪^[5]。由于激光干涉仪及自准直仪测量原理的限制, 给单色仪转角重复精度的测量精度带来了一定程度的影响, 因此迫切需要提出一种新的测量方法。

光学测角法^[6]由于具有非接触、高准确度和高灵敏度的特点而倍受人们的重视。随着激光光源和

收稿日期: 2008-12-09; 收到修改稿日期: 2009-02-17

作者简介: 巩志华(1982—), 女, 硕士研究生, 主要从事单色仪光学检测方面的研究。E-mail: gongzhihua@sinap.ac.cn

导师简介: 郇仁忠(1967—), 男, 研究员, 主要从事软 X 射线光谱显微技术以及 X 射线相干性等方面的应用研究。

E-mail: tairenzhong@sinap.ac.cn(通信联系人)

面阵 CCD^[7]的发展,通过利用相位板产生的衍射条纹的空间连线作为测量基准,利用它对平漂不敏感这一特点来减小光漂影响,测量准直精度可达 10^{-6} 量级^[8]。本文采用了半导体激光单模光纤^[9]和相位板相结合的衍射准直方法进行高精度转角重复精度的测量,测量结果明显优于商用的 ELCOMAT 3000 自准直仪。

2 相位板衍射准直方法的测量原理

相位板衍射准直技术之前已应用于 SSRF 的 LTP 上^[10],借鉴其基本原理,用于单色仪转角重复精度的测量中,图 1 为相位板衍射准直方法的原理图,此设计采用了基于相位板衍射准直的光学透镜系统。从半导体激光器^[11]发出的光经单模光纤准直后,光源不稳定性的影响被大大降低。准直的细光束通过一维 π 阶跃相位板时将产生衍射图样,衍射之后的光束再经分束镜到达反射镜,反射镜被固定在待测物体上,经反射镜返回的光由 FT 透镜聚焦到 CCD 靶面上形成测量光斑,最后通过面阵 CCD 探测光斑信号并将其转换为数字信号存入计算机并进行数据处理。

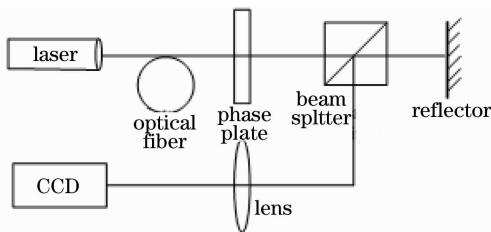


图 1 相位板衍射准直原理图

Fig. 1 Schematic diagram of phase plate diffraction collimation

相位板用于产生所需要的衍射图样,该装置采用透射型相位板,此相位板是在透明玻璃平板的一半面上镀以一定厚度的膜层,使通过左右两部分的光产生 π 的相位差。根据菲涅耳衍射理论,衍射图样与直边衍射图样类似,如图 2 所示。在这种情况下相位板的下游光斑中间将产生一条暗线,以此作为测量基准,图 3 即为 CCD 采集到的光斑图像。该装置的优点是基于相位板衍射,而避免了干涉,因此仪器不受光源不稳定性的影响,空气扰动的影响也被大大降低^[9]。

根据几何光学原理,当反射镜有微小的角度 θ 变化时,如图 4 所示,入射光线和反射光线夹角改变 2θ ,则 CCD 上被测量光斑相对参考光斑的暗线位置变化为 δd ,此时位移与反射镜角度变化的关系为

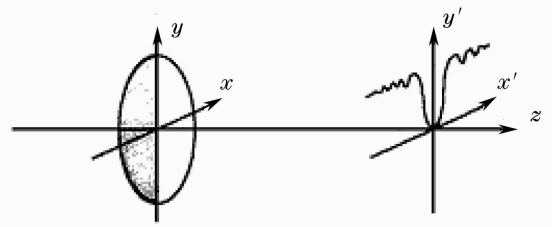


图 2 一维相位板及其衍射图样

Fig. 2 Diffraction pattern of a one-dimension asymmetrical phase plate

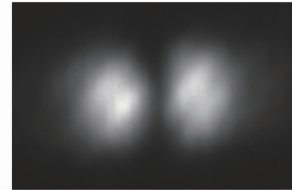


图 3 CCD 采集到的光斑图像

Fig. 3 CCD images

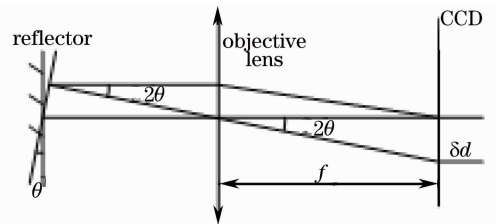


图 4 简化的角度关系图

Fig. 4 Illustration of the angle relationship

$$\delta d = f \tan(2\theta), \quad (1)$$

其中 f 为 FT 透镜的焦距,因被测角很小,上式可简化为

$$\theta = \delta d / (2f) \quad (2)$$

通过以上分析可知,角度的变化可以通过测量 CCD 上光斑的暗线位移变化来确定。相位板衍射图样经 CCD 采样后转化为一组离散灰度数据,由于 CCD 的像素尺寸较大为 $7.4 \mu\text{m}$,为提高精度,需对其进行细分。然而由于噪声的存在,如常遇到的空气湍流的影响、CCD 的量化噪声^[12]等,实际应用中一般选择曲线拟合方法进行细分^[13]。

3 实验结果

根据上述原理,设计了新的基于半导体激光器和相位板衍射准直技术的实验装置,装置中采用的激光器为英国 POINT SOURCE 公司的 iFLEX-2000 型激光器,波长为 670 nm ,功率 4 mW ,光斑尺寸 0.7 mm 。CCD 采用德国 AVT 公司生产的 PIKE F-100B 型 CCD 相机及图像采集卡,并进行了相关的实验及测量。

3.1 分辨率和量程

仪器的分辨率取决于测量光衍射图样位置的精确性。本装置中采用的 CCD 的像素大小为 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ ，总像素数为 1000×1000 。利用改进的图像处理方法^[14]，可以得到小于 $0.08 \mu\text{m}$ 的位移变化。因此，理论上待测角度的分辨率为

$$R = \delta x / (2f) < 0.02'' \quad (3)$$

其中 $f=501 \text{ mm}$ 为 FT 透镜的焦距。

对于该系统，FT 透镜的通光孔径远大于 CCD 的靶面尺寸，于是可以根据 CCD 的像面尺寸 d_m 确定仪器的测量范围 S_m ：

$$S_m = d_m / (2f) \approx 17.77' \quad (4)$$

3.2 静态稳定性

完成一组测量的时间大约需要 10 min，为此测试仪器的静态稳定性是必要的。图 5 给出了不同采样时间的角度偏差。从这些数据中可以计算出测量的标准偏差^[15]为 $0.1057''/600 \text{ s}$ ，这个值足以保证仪器的精度。整个实验过程在棚屋内进行，实验过程中并未对环境温度和气流扰动作修正，因此该结果表明该实验方案对环境的要求并不苛刻。

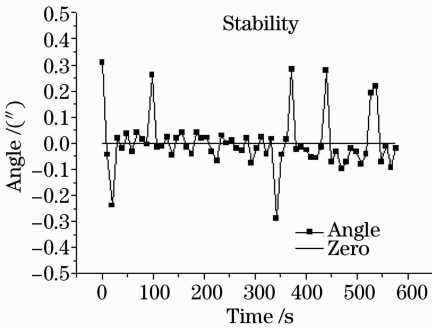


图 5 静态稳定性曲线

Fig. 5 Static stability for phase plate diffraction collimation within 600 seconds

3.3 与自准直仪测量结果对比

相位板衍射准直装置的测量精度主要受以下因素的影响：

1) 装置本身采用的光学系统的像差：

包括 FT 透镜的像差 Δ_{FT} 和光学元件的制造误差，安装误差而造成的像差 Δ_{OE} ；

2) 环境噪声对测量精度的影响：

包括测量现场温度漂移 Δ_T ，空气扰动 Δ_N ，工作台振动 Δ_V 等因素的影响；

为了测试该系统的精度，将该准直光路系统与 ELCOMAT 3000 自准直仪进行了测量对比，测量原理如图 6 所示，将平面镜固定在旋转台上，使自准

直仪和实验装置发出的光分别从两侧照射到反射镜上，且保证两束光在同一条直线上，旋转反射镜，同时用自准直仪和本实验装置记录每次旋转的角度信息，理论上两装置测得的角度应该完全相同。

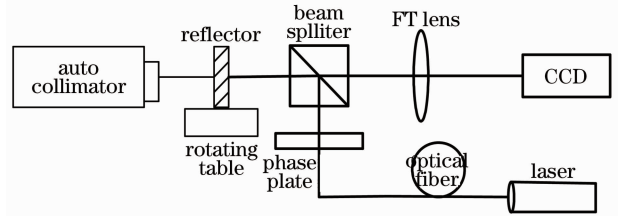


图 6 与自准直仪对比的测量原理图

Fig. 6 Schematic diagram of Measurement compared with Auto Collimator

根据上述原理，测量了 $40''$ 范围内的任意 30 个点，每一点相对于自准直仪测量结果的差值如图 7 所示。由误差传递原理，可以计算出我们测量仪器的精度为

$$\Delta^2 = \Delta_1^2 + \Delta_2^2 \quad (5)$$

其中， Δ 为图 7 测量结果差值的标准偏差，计算结果为 $0.16''$ ； Δ_1 为自准直仪的测量精度，约为 $0.1''$ ，由此可以估算出我们的测量装置在 $40''$ 范围内的精度 Δ_2 为 $0.12''$ 。

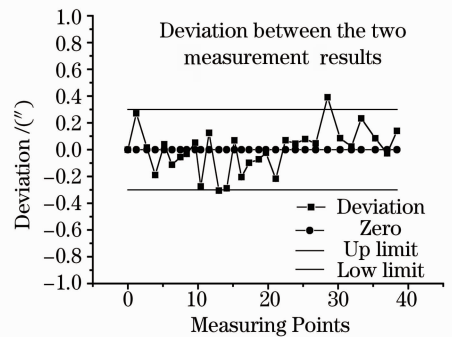


图 7 与自准直仪测量结果的差值

Fig. 7 Deviation Curve

3.4 变包含角平面光栅单色仪转角重复精度的测量

根据变包含角平面光栅单色仪的测量要求，利用 ELCOMAT 3000 自准直仪和设计的相位板衍射准直装置分别对平面镜单独运动时及平面镜和光栅联动时的转角重复精度进行了测量。

3.4.1 平面镜转角重复精度的测量

测量平面镜的转角重复精度时，需要在平面镜转动轴上安装角棱镜，测量原理如图 8 所示，实验中采用的角棱镜有四个面，第一、二、三、四镜面分别对应于角棱镜从上往下的四个面，每个面之间的角度差为 2° ，在测量每一个棱镜面时，调节自准直仪使

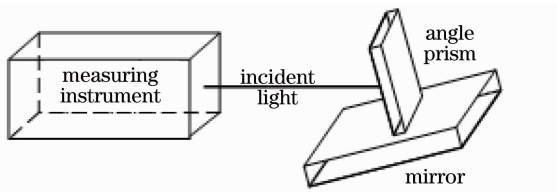


图 8 平面镜转角重复精度的测量原理图

Fig. 8 Schematic diagram of measurement of PM's angle repeatability

其读数为零,控制滑台使滑台往下走 10 mm,然后返回记录点,纪录该点数据,之后从记录点往上走 10 mm,再次返回记录点,同时纪录该点数据,重复测量五次。实验中规定滑台从下往上走为正向,从上往下走为反向,由于滑台为垂直放置,受重力的影

表 1 两种方法的测量结果比较(")

Table 1 Contrasts between the measurement results of two methods

Measurement position	Angle repeatability (measurement results of autocollimator)		Angle repeatability (measurement results of phase plate diffraction collimation method)	
	forward	reverse	forward	reverse
The first point	0.040192	0.039350	0.026841	0.061277
The second point	0.072176	0.038968	0.027292	0.062809
The third point	0.084780	0.052793	0.071538	0.031047
The fourth point	0.113381	0.043005	0.162696	0.026263

3.4.2 平面镜和光栅联动时转角重复精度的测量

测量平面镜和光栅联动时转角重复精度的原理图如图 9 所示,将自准直仪放在光栅一侧,反射镜放在平面镜一侧,自准直仪发出的光依次经光栅、平面镜、反射镜反射后,再次经平面镜和光栅反射,回到自准直仪,平行转动平面镜和光栅,测量角度变化,测量步骤与平面镜转角重复精度的测量步骤相同,测量时选取了其中四个角度测量点。相位板衍射准直装置的测量方法与自准直仪的测量方法相同。

表 2 给出了在每个测量点处两种方法的测量结果。数据处理方法同表 1。从表中可以看出,在相同的测量条件下,相位板衍射准直方法测量的转角重复精度明显优于自准直仪的测量结果。软 X 射

表 2 两种方法的测量结果比较(")

Table 2 Contrasts between the measurement results of two methods

Measurement position	Angle repeatability (measurement results of autocollimator)		Angle repeatability (measurement results of phase plate diffraction collimation method)	
	forward	reverse	forward	reverse
PM: 4.0°	0.48893	1.099235	0.169892	0.319331
PM: 4.5°	0.690267	0.758297	0.256135	0.097576
PM: 5.0°	0.420634	0.667216	0.07863	0.101022
PM: 5.5°	0.435869	0.356523	0.272848	0.272861

响,从正向和反向分别到达待测点的的误差不同,因此需要测量正反两个方向的误差,其中正向为主要测量的误差。相位板衍射准直方法的测量步骤方法与自准直仪的测量步骤相同。

表 1 给出了两种方法的测量结果。每个角度点(每个镜面对应一个角度)上五次测量数值的标准偏差作为机械系统的转角重复精度的测量值。数据处理过程中,测量系统的系统误差已经消除,该标准偏差的准确性仅由测量电子学的读出误差决定,经测量估算,自准直仪与相位板准直方法均为 $\pm 0.06''$ 。从表中可以看出,在相同的测量条件下,两种方法的测量结果很接近,说明在测量平面镜的转角重复精度时,本装置的测量精度与自准直仪的测量精度基本相同。

线单色仪通常工作在掠入射模式下,平面镜和光栅的转角范围为 $-0.1^\circ \sim 7.5^\circ$,而 ELCOMAT 3000 自准直仪采用的 LED 光源光斑尺寸为 32 mm,经计算当掠入射角为 4° 时,若光全部照射在平面镜上,

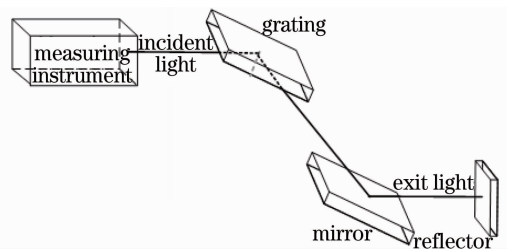


图 9 联动时转角重复精度的测量原理图

Fig. 9 Schematic diagram of measurement of PM and PG's angle repeatability

要求平面镜和光栅的长度为 459 mm, 而其实际长度仅为 450 mm 和 170 mm, 所以, 有近 2/3 的光子沿途损失掉, 导致自准直仪的信噪比严重较低。为了便于测量, 在自准直仪出光位置处安装了一个孔径为 10 mm 左右的光阑, 以增强稳定性。总之, 自准直仪精度下降的原因主要有下面两点: ①光束的通光孔径变小, 返回到自准直仪的光强减弱, 仪器的信噪比降低; ②出光孔径受限, 光束的出射平行度受到一定程度的影响, 则经反射镜后成像在 CCD 靶面上的聚焦光斑尺寸变大, 从而影响 CCD 测得的位移精度。从测量结果来看, 相位板衍射准直方法能够克服自准直仪测量法固有的缺陷, 较好的实现了掠入射条件下的转角重复精度的高精度测量。

在测量平面镜的转角重复精度时, 测量仪器出射的光线正入射到角棱镜上, 不存在掠入射情况下光斑太大造成的影响, 因此两种方法的测量结果基本相同。

在利用自准直仪测量过程中, 要求平面镜和光栅替代镜具有好的面型精度及较高的反射率, 制作成本很高; 而相位板衍射准直装置, 由于采用了稳定的准直激光束作为测量基准, 光束直径小于 1 mm, 当掠入射角为 4° 时需要的平面镜和光栅替代镜的长度仅为 15 mm, 大大降低了镜子的制作成本。

4 结 论

该方法将相位板衍射准直技术和半导体单模光纤技术结合起来, 采用了激光, 光束直径小于 1 mm, 实现了掠入射情况下变包含角平面光栅单色仪的转角重复精度的高精度测量。实验表明, 在测量平面镜和光栅联动时单色仪的转角重复精度时, 该装置的测量精度可达 $\pm 0.1''$, 该精度优于商用的 ELOMAT 3000 自准直仪的测量精度, 而且不需要大的光学镜子。因此该方法可用于 SSRF 中其他光束线采用的光学元件转角重复精度的测量。目前该装置只能测量一个方向的角度变化, 自准直仪可同时测量 x, y 两个方向的角度变化, 故下一步的工作考虑设计能同时测量两个方向角度变化的装置。

参 考 文 献

- Xu Chaoyin. *Synchrotron Radiation Optics and Engineering* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China, The Third Edition, 2006: 1~4, 105~111
- 徐朝银. 同步辐射光学与工程[M]. 合肥: 中国科学技术大学, 第

- 三版, 2006: 1~4, 105~111
- Tony Warwick, Daniela Cambie, Howard A. Padmore *et al.*. A variable-included-angle plane-grating-monochromator on an undulator for spectroscopy and microscopy at the Advanced Light Source [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2001, **467**~**468**: 525~528
- M. Domke, T. Mandel, A. Puschmann *et al.*. Performance of the high resolution SX700/II monochromator [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(1): 80~89
- The Instruction manual of Agilent 5529A Laser Interferometer. Website: www.agilent.com
- The Instruction Manual of ELCOMAT 3000 Auto Collimator. Website: www.opticaltest.com
- Zheng Defeng, Wang Xiangzhao, Li Zhongliang *et al.*. Dynamic measurement of small angle with two prisms [J]. *Chinese J. Laers*, 2007, **34**(9): 1255~1259
- 郑德锋, 王向朝, 李中梁等. 一种使用双棱镜的动态小角度测量方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1255~1259
- Zou Wanjun, Zhu Guoli, Wu Xuebing. Angle measuring system of laser on array CCD [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(10): 91~95
- 邹万军, 朱国力, 吴学兵. 基于面阵 CCD 的激光角度测量系统的研究[J]. *光电工程*, 2006, **33**(10): 91~95
- Hao Qun. Study of phase plate alignment in large-scale measurement [J]. *Acta metrological Sinica*, 2001, **22**(3): 185~188
- 郝群. 相位板衍射准直研究[J]. *计量学报*, 2001, **22**(3): 185~188
- Kuang Cuifang, Feng Qibo, Chen Shiqian *et al.*. Study on straightness measurement based on laser collimation [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(6): 699~701
- 匡萃方, 冯其波, 陈士谦等. 基于激光准直直线度测量方法的研究[J]. *光学技术*, 2003, **29**(6): 699~701
- Tiqiao Xiao, Shaojian Xia. A new long trace profiler for aspheric optical surface metrology [C]. *SPIE*, 2002, **4927**: 208~213
- Zhou Shuai, Zhang Tong, Cui Yiping. Power control of semiconductor laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(S1): 65~69
- 周帅, 张彤, 崔一平. 半导体激光器的功率控制[J]. *光学学报*, 2008, **28**(S1): 65~69
- Ding Xiaohua, Li You, Yu Qifeng *et al.*. CCD noise calibration and its application in edge location [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 99~100
- 丁晓华, 李由, 于起峰等. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 99~100
- Li Zhi, Zhao Yang, Li Dacheng. Image processing for pattern diffracted by phase plane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1079~1083
- 李直, 赵洋, 李达成. 相位板衍射图样处理方法的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1079~1083
- Du Guohao, Xiao Tiqiao, Xia Shaojian *et al.*. Control system and data processing system of the novel LTP [J]. *Nuclear Techniques*, 2004, **27**(7): 511~514
- 杜国浩, 肖体乔, 夏绍建等. 新型大量程 LTP 控制系统及数据处理系统[J]. *核技术*, 2004, **27**(7): 511~514
- Liang Jinwen, Chen Lincai, He Gong. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: China Publishing House of Metrology, Revised Edition, 2003: 10~18, 84~91
- 梁晋文, 陈林才, 何贡. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 中国计量出版社, 修订版, 2003: 10~18, 84~91