

# 光学学报

## 基于微焦点 X 射线光栅干涉仪的波前传感与面形测量技术

赵帅<sup>1</sup>, 王秋平<sup>2</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 王克逸<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026;

<sup>2</sup>中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029

**摘要** 为了支撑高性能光源波前调控与先进实验技术开发, 并在工作波长下实现实验室级面形测量, 搭建了微焦点 X 射线光栅干涉仪实验平台。X 射线光栅干涉仪是一种具有极高灵敏度的波前传感技术, 可定量测量 X 射线波前畸变。利用相位步进和傅里叶分析方法重建条纹的相位和波前曲率半径分布, 进而计算出波前角度和镜面斜率误差分布。傅里叶分析方法的测量结果与长程面形仪具有很好的一致性, 两者差值的均方根小于 200 nrad。所提技术可用于 X 射线主动光学波前在线反馈调控, 反射、折射、衍射器件误差检测, 以及大科学装置 X 射线光束质量评估等领域。

**关键词** X 射线光学; X 射线光栅干涉仪; 波前传感; 面形测量

中图分类号 P234.3; O434.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2334002

### Wavefront Sensing and Surface Shape Measurement Based on Microfocus X-Ray Grating Interferometer

Zhao Shuai<sup>1</sup>, Wang Qiuping<sup>2</sup>, Zhang Lei<sup>1</sup>, Wang Keyi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Precision Machinery and Precision Instruments, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

<sup>2</sup>National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, Anhui, China

**Abstract** An experimental platform based on a microfocus X-ray grating interferometer is established to support the wavefront control of high-performance light sources and the development of advanced experimental technologies, and facilitate laboratory-level surface shape measurement at a working wavelength. X-ray grating interferometry is a highly sensitive wavefront sensing technique and can be used to quantitatively measure the X-ray wavefront distortion. Furthermore, the phase of the fringes and the wavefront radius of curvature distribution are reconstructed by phase stepping and Fourier analysis, so as to calculate the wavefront angle and mirror slope error distribution. The measurement results obtained by Fourier analysis are in good agreement with the long trace profiler, with the root mean square of their difference less than 200 nrad. The proposed technique can be used for online wavefront feedback and control in X-ray active optics, error detection of reflection, refraction and diffraction devices, and quality evaluation of X-ray beams of large scientific devices.

**Key words** X-ray optics; X-ray grating interferometer; wavefront sensing; surface shape measurement

## 1 引言

第四代同步辐射光源与 X 射线自由电子激光装置等大科学装置具有高亮度、高相干性和高准直性等特点, 其光束接近衍射极限和傅里叶变换极限, 可开展高

光谱分辨、高空间分辨和高时间分辨实验。光束线系统是光源和实验站之间的桥梁, 保持波前形状和高保真传递 X 射线束相干性对开展同步辐射实验具有重要意义, 这对高精度光学器件的制造和检测提出了挑战。光束质量会受到反射或透射表面的粗糙度、较大范围

收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-05-08; 录用日期: 2022-06-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0401303)、中央高校基本科研业务费(WK5290000002)

通信作者: \*kywang@ustc.edu.cn

形状误差、光学组件的未对准和自适应元件(如可弯曲的反射镜或晶体)的未校准等影响。在极高能量分辨率或纳米聚焦应用中,新一代同步辐射光束线要求镜子工作表面的斜率误差在 100 nrad 以下,所需的高度误差通常低于 1 nm(均方根)<sup>[1]</sup>。因此,精确测量光学元件的表面轮廓和波前表征对下一代光源的发展与应用十分重要。

目前基于可见光开发的高精度面形检测仪器有很多,如长程面形仪(LTP)<sup>[2-3]</sup>、面形干涉仪<sup>[4-5]</sup>、粗糙度仪和原子力显微镜等。然而,这类仪器只能实现离线测量,不能反映实际工作条件下光学元件表面形状的变化,这会直接影响光束的性能,包括聚焦质量和相干保持程度。对于压弯反射镜或折射相位板等波前补偿装置,可见光仪器无法测量其调制后的波前形状<sup>[6]</sup>。建立工作波长下光学元件的高精度在线测量和波前分析系统,对高精度 X 射线光学元件的制造、X 射线自适应光学波前反馈信号的测量、高热负荷光学元件冷却技术的研究、辐射损坏或机械安装(安装、夹紧、振动和应力)引起的波前传播角度误差的测量具有重要意义<sup>[7]</sup>,同时也是开发高性能光源先进实验方法和技术必不可少的部分。

近 10 年来,国内外 X 射线光学元件工作波长下的面形测量主要采用哈特曼波前传感器法<sup>[8]</sup>、散斑法<sup>[9-11]</sup>、传播迭代算法<sup>[12]</sup>和光栅干涉仪法<sup>[6, 13-18]</sup>。光栅干涉法因具有极高的角度灵敏度(10 nrad 量级)<sup>[19]</sup>、抗干扰性好和原位与工作波长下无损检测等优点,已经被广泛用于晶体单色器<sup>[7, 20]</sup>、多层膜镜<sup>[15-16, 21]</sup>、双压电晶片镜<sup>[22]</sup>、折射 X 射线透镜<sup>[23-25]</sup>、衍射光学器件<sup>[25]</sup>的测量,以及 X 射线自由电子激光光束的质量评价<sup>[26-29]</sup>。由于光栅干涉法是无损检测技术,且对机械振动的敏感度很低<sup>[30]</sup>,故欧洲同步辐射光源(ESRF)团队在加工过程中集成在线检测技术来控制镜面形状与粗糙度<sup>[31]</sup>。通过更改光栅参数,可将该技术扩展到更软或更硬的 X 射线。

本文搭建了实验室级微焦点 X 射线光栅干涉仪,

通过相位步进和傅里叶分析技术来表征反射光 X 射线波前,并进一步重建出了反射镜表面轮廓的斜率误差。将测量结果与 LTP 进行比对,二者具有很好的一致性。与大科学装置光束线相比,该系统测量灵活方便、成本低,可为 X 射线反射、折射、衍射光学器件的制造过程提供工作波长下的反馈信息,无需使用同步辐射等大科学装置<sup>[32]</sup>。由于采用了微焦点光源,故 X 射线相机一次曝光可以同时记录到反射与直通光束的条纹信息,直接计算出镜面斜率误差分布,提高了测量效率。同时,该实验可为先进同步辐射光源与 X 射线自由电子激光在线波前调控验证提供技术支撑。

## 2 光栅干涉仪波前传感原理

X 射线波前传感原理如图 1 所示。微焦点 X 射线光栅干涉仪由作为分束器的相位光栅  $G_1$ 、作为探测器透射掩模的吸收光栅  $G_2$  和 X 射线相机组成。在 X 射线从反射镜表面掠入射后,相位光栅下游的周期性干涉图案(Talbot 自成像)因反射镜表面斜率误差导致波前畸变产生相移。由于干涉图案周期较小,故常规 X 射线相机不能分辨出相移信号,通过增加分析光栅可以放大相移信号。采用相位步进技术或者傅里叶分析技术可以解析出条纹相位和波前曲率半径分布,进而计算出波前角度(相位梯度)和镜面斜率误差分布<sup>[33]</sup>,微焦点光栅干涉仪原理图如图 1(b)所示,其中  $F_1$  和  $F_2$  为压弯镜压弯时施加的力,  $p_2$  为吸收光栅  $G_2$  的周期。

在光栅的 Fresnel 衍射区内某些距离处能够观察到光栅自身的像,这种不依赖透镜对周期性物体成像的现象被称为 Talbot 效应<sup>[14-15]</sup>。图 1(a)是平行光照射下光栅干涉仪示意图,其中  $\theta_s$  为光束经过相位光栅衍射的剪切角。根据分数 Talbot 效应,当波长为  $\lambda$  的平面 X 射线垂直照明周期为  $p_1$  的一维光栅,且光栅周期远大于入射波长时,在距离相位光栅  $d_N$  处自成像具有最大的调制度,该距离被称为 Talbot 距离<sup>[34-35]</sup>,可以表示为

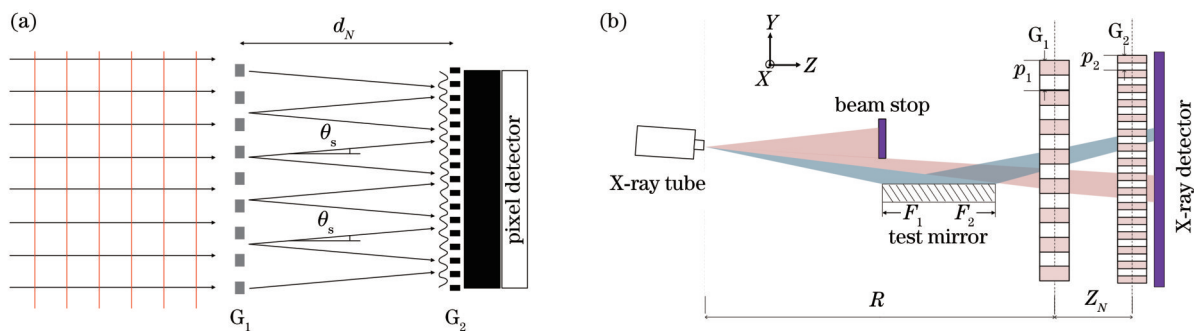


图 1 X 射线波前传感原理图。(a)平行光照射下光栅干涉仪原理图;(b)锥形光束照射下光栅干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of X-ray wavefront sensing. (a) Schematic diagram of grating interferometer under parallel light illumination; (b) schematic diagram of grating interferometer under conical beam illumination

$$d_N = \frac{Np_1^2}{8\lambda}, \quad (1)$$

式中:  $N$  是与分数 Talbot 距离的阶次相对应的奇数。对于锥形光束, 需考虑在球面波照射下的几何放大率, 该距离<sup>[34, 36]</sup>重新调整为

$$Z_N = \frac{R \cdot d_N}{R - d_N} = M \cdot d_N, \quad (2)$$

式中:  $R$  是光源与光栅  $G_1$  的距离;  $M$  是放大系数。

锥形光束的干涉图样的横向周期<sup>[33, 35]</sup>重新调整为

$$p_2^* = \frac{Mp_1}{\eta}, \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为衍射光栅与干涉条纹周期的比值, 当选择  $\pi$  相位光栅时,  $\eta = 2$ <sup>[35]</sup>。

当使用拓展 X 射线点光源时, 光源尺寸  $\Omega$  必须足够小<sup>[32, 34-35]</sup>, 使得在  $G_1$  平面的空间相干长度  $\Delta_c = \lambda R / \Omega$  大于干涉光束的剪切长度  $h_N = Np_1 / 4$ 。

波前畸变会导致干涉条纹产生移动, 移动距离  $s$  的表达式<sup>[37]</sup>为

$$s = 2\alpha Z_N, \quad (4)$$

式中:  $2\alpha$  是测试镜中反射角的变化, 如图 2(a) 所示, 其中  $\beta$  为入射角。干涉图样的偏移可以用弧度表示为

$$\delta = 2\pi \cdot s / p_2^*. \quad (5)$$

旋转  $G_1$  与  $G_2$  使得其光栅刻线与  $X$  轴有一个相同

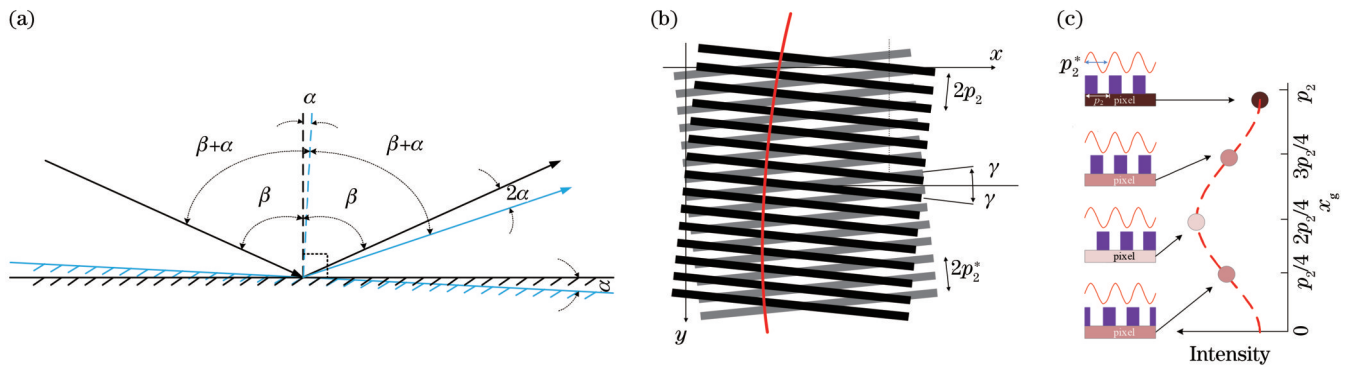


图 2 波前重建原理图。(a) 镜面偏折示意图; (b) 波前畸变导致的扭曲的莫尔条纹; (c) 相位步进示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wavefront reconstruction. (a) Schematic diagram of mirror deflection; (b) distorted Moiré fringes caused by wavefront distortion; (c) schematic diagram of phase stepping

虽然莫尔条纹分析模式仅需要单个图像, 但是受莫尔条纹的周期限制<sup>[19, 30, 40]</sup>, 故其空间分辨率较低。为了提高空间分辨率, 通常使用相位步进模式, 如图 2(c) 所示,  $x_g$  代表相位步进的距离。通过相位或分析光栅在垂直于光栅刻线方向进行扫描的方式来获取光强变化数据, 适合于连续波的波前检测。在光栅干涉仪中, 相位步进法的图像获取过程是: 在垂直于光栅线方向的光栅周期内使光栅移动三个阶梯以上, 并且利用检测器记录在每个阶梯中获得的投影。根据以上参数计算, 设计了实验装置三维模型图, 如图 3 所示。

夹角  $\gamma$ 。此时, 受到镜面反射的影响, 当入射角不变, 镜面斜率误差为  $\alpha$  时, 出射角度相对于原来的角度增大  $2\alpha$ 。对于锥形光束, 反射角  $2\alpha$  与分析光栅平面对应的相位移量  $\psi$  的关系为

$$2\alpha = \psi \times \frac{p_2^*}{2\pi \times Z_N}. \quad (6)$$

因此, 可以得到镜面斜率误差与分析光栅平面对应的相位移量  $\psi$  的关系<sup>[16, 38]</sup>为

$$\alpha = \psi \times \frac{p_2^*}{4\pi \times Z_N}. \quad (7)$$

当干涉条纹周期很小 (小于  $5 \mu\text{m}$ ) 时, 相位移量不能被 X 射线相机探测器直接测量, 故采用分析光栅  $G_2$  对其进行扫描<sup>[39]</sup>。该光栅是周期与 Talbot 自成像匹配的高吸收线光栅。双光栅干涉仪可工作在莫尔模式与相位步进模式下。图 2(b) 显示了仿真的畸变波前干涉条纹与分析光栅产生扭曲的莫尔条纹, 莫尔效应极大地放大了相位的信号, X 射线相机很容易分辨出比光栅周期长的莫尔条纹。利用傅里叶方法分析莫尔条纹, 逐行求解相位与相位解包裹可得到镜面沿纵向的斜率分布。傅里叶分析方法仅需要单幅图像即可求解出波前分布, 非常适合于 X 射线自由电子激光等脉冲光源的波前检测<sup>[27-29]</sup>。

### 3 实验装置

实验系统放置在尺寸为  $2600 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \times 1070 \text{ mm}$  的铅房中, 防护层铅板厚度为  $6 \text{ mm}$ 。铅房为上下结构, 上部为铅防护区域, 下部为电气安装区域, 如图 4 所示。考虑到光源的时间相干性和空间相干性, 采用焦点直径最小为  $5 \mu\text{m}$  的微焦点光源 (HAMAMATSU, L9421-02), 靶材为固定钨靶。该微焦点光源为密封型 X 射线光源, 冷却方式为内部的对流冷却, 锥束照明, X 光束锥角为  $39^\circ$ , 最大可输出功率为  $8 \text{ W}$ 。



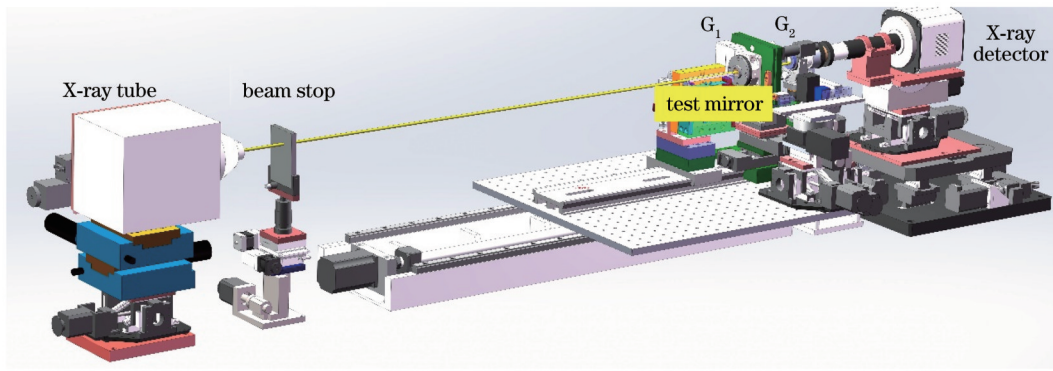


图 3 微焦点 X 射线光栅干涉仪三维设计图

Fig. 3 Three-dimensional design drawing of microfocus X-ray grating interferometer

本系统中使用的相位光栅和分析光栅都由 Microworks 公司加工,  $G_1$  为  $\pi$  相位光栅, 周期为  $5.366 \mu\text{m}$ 。 $\pi$  相位光栅更适用于高阶 Talbot 效应实验, 在高级 Talbot 阶处,  $\pi$  相位光栅的可见度要高于  $\pi/2$  相位光栅<sup>[41-43]</sup>。同时, 与  $\pi/2$  相位光栅相比,  $\pi$  相位光栅对光源的空间相干性要求更低<sup>[44]</sup>。 $G_2$  的周期为  $3 \mu\text{m}$ , 由在聚酰亚胺基板上电镀金制造而成。X 射线

探测器 (SIGRAY, Dhyana 400D) 的像素分辨率可达  $2.2 \mu\text{m}$ , 探测器图像视场面积可达  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。该相机的图像传输接口为 USB 3.0, 图像采集速度为  $30 \text{ frame/s}$ , 数据读出位数为 32 bit。本文基于 MATLAB 开发了莫尔条纹图像采集、细化、周期计算软件, 使得莫尔条纹图像处理工作简洁高效。

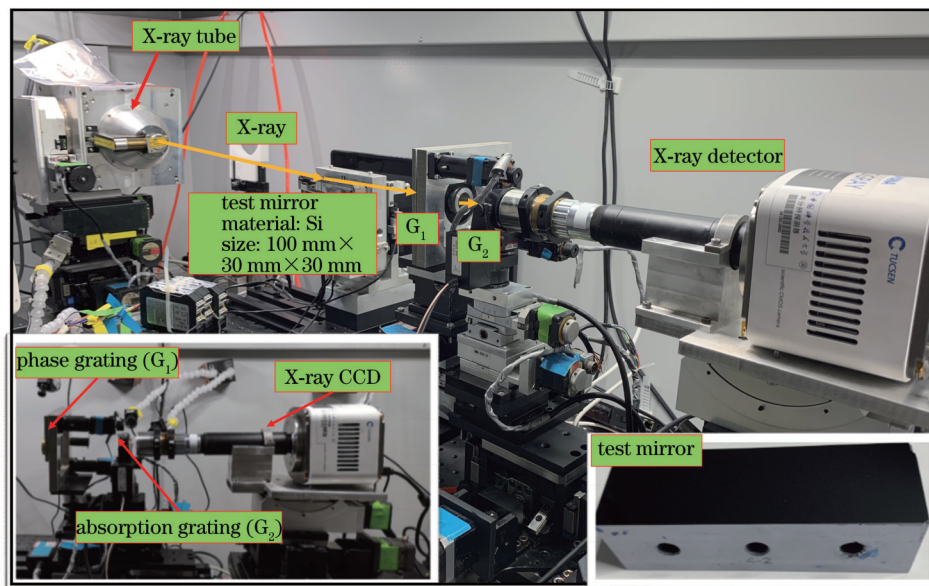


图 4 X 射线光栅干涉仪实验装置

Fig. 4 Experimental setup of X-ray grating interferometer

#### 4 实验结果与数据处理

在莫尔模式下, 经过探测器校准、相位光栅与分析光栅粗对准 (利用可见光激光器衍射对准), 以及莫尔条纹对准<sup>[45-46]</sup>后, 探测器采集到的实验图像结果如图 5 所示。

相位光栅下游的干涉条纹强度分布  $I_1(x, y)$  可以表示为

$$I_1(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ \cos \left[ \frac{2\pi}{p_2} (y \cos \gamma + x \sin \gamma) - \varphi(x, y) \right] + 1 \right\}, \quad (8)$$

式中:  $\varphi(x, y)$  为成像面某一点的相位移动。

吸收光栅的强度传输函数  $I_2(x, y)$  可以表示为

$$I_2(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ \cos \left[ \frac{2\pi}{p_2} (y \cos \gamma - x \sin \gamma) \right] + 1 \right\}. \quad (9)$$

莫尔条纹强度图案是二者强度函数的叠加, 先假

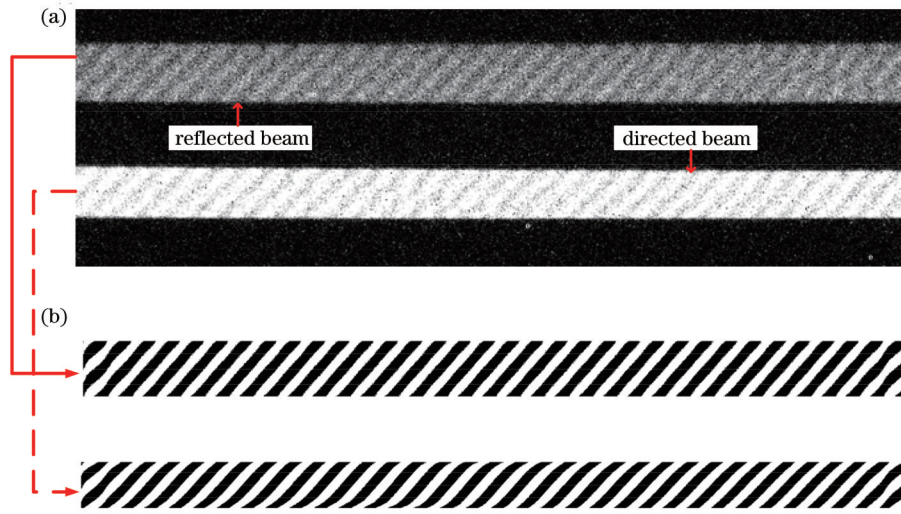


图 5 莫尔模式下探测器记录的图像。(a)原始图像;(b)滤波后图像  
Fig. 5 Recorded fringe by detector in Moiré mode. (a) Original image; (b) filtered image

设干涉条纹没有畸变时  $\varphi(x, y) = 0$ , 则其表达式为

$$I(x, y) = I_1(x, y) \times I_2(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ \cos \left[ \frac{2\pi}{p_2^*} (y \cos \gamma + x \cos \gamma) \right] + 1 \right\} \times \frac{1}{2} \left\{ \cos \left[ \frac{2\pi}{p_2} (y \cos \gamma - x \cos \gamma) \right] + 1 \right\}, \quad (10)$$

令  $A = \frac{2\pi}{p_2^*} (y \cos \gamma + x \cos \gamma)$  和  $B = \frac{2\pi}{p_2} (y \cos \gamma - x \cos \gamma)$ , 则式(10)可改写为

$$I(x, y) = \frac{\cos A + 1}{2} \times \frac{\cos B + 1}{2} = \frac{1}{4} (\cos A + \cos B + 1 + \cos A \cos B) = \frac{\cos A + 1}{2} + \frac{\cos B + 1}{2} - \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \cos(A + B) + \frac{1}{8} \cos(A - B). \quad (11)$$

被探测器测量到的莫尔条纹项  $I_m(x, y)$  可表示为

$$I_m(x, y) = \cos \left[ \frac{2\pi}{p_2^*} (y \cos \gamma + x \sin \gamma) - \frac{2\pi}{p_2} (y \cos \gamma - x \sin \gamma) \right], \quad (12)$$

此时莫尔条纹倾角  $\nu_m$  与光栅倾角关系为  $\tan \nu_m = \frac{Z_N}{2\gamma} \times \frac{1}{R}$ 。

莫尔条纹的各行之间的相位是独立的, 利用傅里叶方法可以逐行求解相位, 此时因相位移动产生畸变的莫尔条纹的每一行条纹强度分布可表示为

$$I_m(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos \left[ \frac{2\pi}{p_2} \left( \frac{p_2}{p_2^*} \sin \gamma - \sin \gamma \right) x + \frac{2\pi}{p_2} \left( \frac{p_2}{p_2^*} \cos \gamma - \cos \gamma \right) y + \varphi(x, y) \right], \quad (13)$$

令  $f_0 = \frac{1}{p_2} \left( \frac{p_2}{p_2^*} \sin \gamma - \sin \gamma \right)$ ,  $\psi = \frac{2\pi}{p_2} \left( \frac{p_2}{p_2^*} \cos \gamma - \cos \gamma \right) y + \varphi(x, y)$ , 则式(13)可改写为

$$I_m(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \psi), \quad (14)$$

$f_0$  是莫尔条纹在 Y 方向的空间频率(载波频率), 将  $I_m(x, y)$  进行傅里叶变换可得到

$$\mathcal{F}[I_m(x, y)] = A(f, y) + C(f - f_0, y) + \bar{C}(f + f_0, y), \quad (15)$$

式中:  $f$  为 X 方向上的空间频率;  $\mathcal{F}(\cdot)$  为傅里叶变换函数。将三个频率项在傅里叶空间分离,  $A(f, y)$  为中心频率,  $C(f - f_0, y)$  和  $\bar{C}(f + f_0, y)$  分别为 +1 级频谱和 -1 级频谱。由于相位  $\psi(x, y)$  是连续函数, 故其在 Y 方向的变化相当缓慢<sup>[30]</sup>。选择合适的滤波器, 滤除 +1 级频谱以外的其他级次得到  $C(f, y)$ , 再对滤波后的频谱进行傅里叶逆变换, 即

$$\psi(x, y) \bmod(2\pi) = \arg \left\{ \mathcal{F}^{-1} [C(f, y)] \right\}, \quad (16)$$

式中:  $\bmod(\cdot)$  为取余函数;  $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$  为傅里叶逆变换函数;  $\arg(\cdot)$  为复数的幅角。

求解出的相位图分布在  $[-\pi, \pi]$  之间, 相位解包裹后可以得出真实相位分布<sup>[30]</sup>。此时, 沿镜面的斜率误差  $\kappa$  为

$$\kappa = \psi \times \frac{p_2}{4\pi Z_N}. \quad (17)$$

在相位步进模式下求解条纹相位时, 吸收光栅  $G_2$  在垂直于光栅刻线方向进行 5 步相位步进以获取光强



变化数据。本实验可同时获得反射光与直通光光束的光强分布。在相位步进过程中,直通光相位作为参考相位,其光强分布为  $I_k^t$ ,反射光光强分布表达为  $I_k^s$ 。二者的表达式为

$$I_k^t(x, y) = A^t(x, y) + B^t(x, y) \cos\left(\phi_j^t + \frac{2\pi k}{K}\right), \quad (18)$$

$$I_k^s(x, y) = A^s(x, y) + B^s(x, y) \cos\left(\phi_j^s + \frac{2\pi k}{K}\right), \quad (19)$$

式中: $k$ 为步进序数; $K$ 为单个周期总的步数; $\phi_j^s$ 为第  $j$  行反射光相位; $\phi_j^t$ 为第  $j$  行直通光参考相位。反射镜引起的相位步进曲线的相移量为  $\phi_j = \phi_j^s - \phi_j^t$ 。然后,利用式(17)即可求解出镜面斜率误差分布。

经过数据处理,分别得到采用傅里叶分析和相位步进技术 5 次测量的重复性  $R_m$  和  $R_p$  如图 6(a)、(b) 所示。可以看出,在相位步进模式下 5 次测量重复性偏

差较大,不如傅里叶分析技术的单次曝光测量结果稳定。出现该现象的原因是当压电位移台带动吸收光栅  $G_2$  在  $Y$  轴方向上移动一个周期时,不同周期之间位移量有误差。相位步进方法有机械振动、电压漂移、温度变化,以及压电陶瓷存在迟滞和蠕变等特性。然而,傅里叶分析无需机械位移,只需要在光栅对准后保持在某个位置锁死即可。在理论上,相位步进模式可以带来高角度灵敏度和高空间分辨率,但在光通量较低的微焦点光源下,相较于傅里叶分析方法,相位步进方法在测量精度方面没有优势,如图 6(c) 所示,并且还会因机械运动造成重复性误差偏大。傅里叶分析与 LTP 测量结果差值的均方根小于 200 nrad。图 6(d) 显示了 LTP、傅里叶分析和相位步进技术拟合的高度轮廓线,可以发现傅里叶分析与 LTP 的一致性更好。

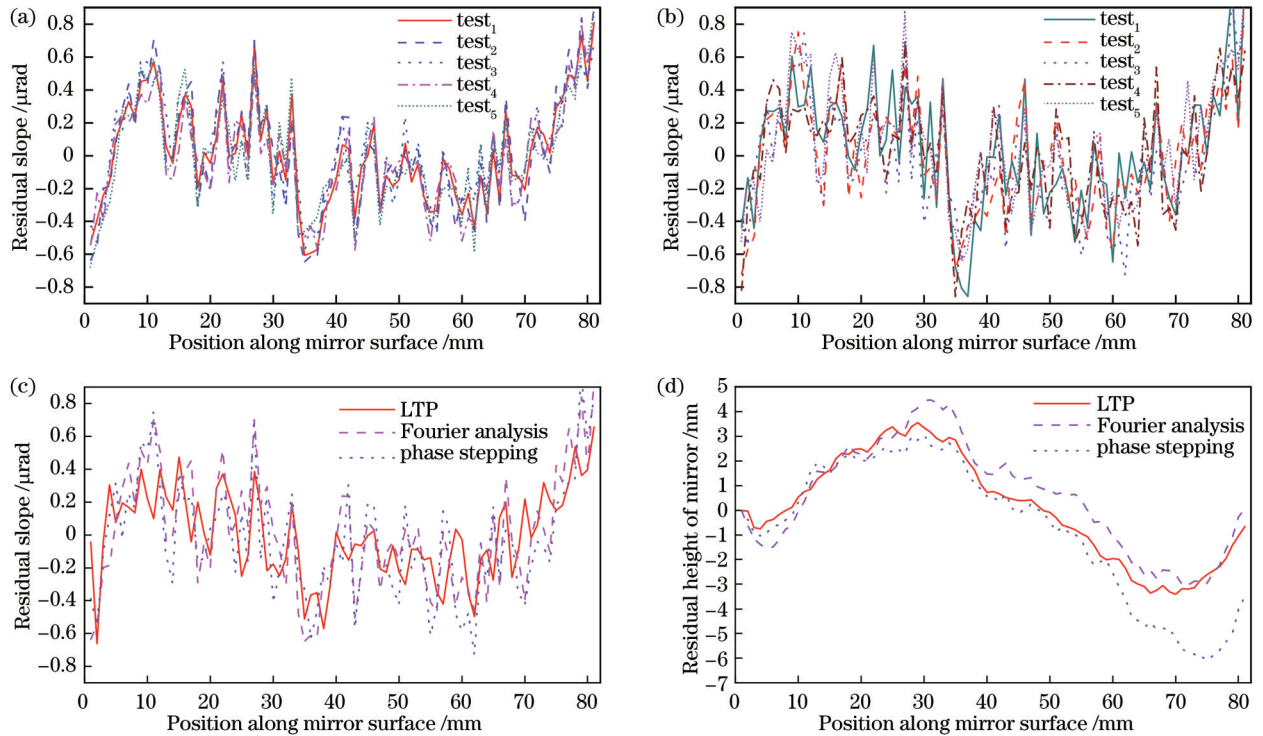


图 6 实验结果。(a)傅里叶分析技术 5 次测量的重复性;(b)相位步进 5 次测量的重复性;(c)三种测量方式下的残差斜率;(d)三种测量方式下镜面的残差高度

Fig. 6 Experimental results. (a) Repeatability of five measurements by Fourier analysis technique; (b) repeatability of five measurements by phase stepping; (c) residual slope under three measurement methods; (d) residual height of mirror under three measurement methods

## 5 结 论

建立了微焦点 X 射线光栅干涉仪波前传感与反射镜表面斜率误差测量的理论模型。搭建了实验室级 X 射线光栅干涉仪系统,分别采用相位步进和傅里叶法分析技术对平面镜进行面形测量,并详细阐述了两种算法的计算过程。将两种测量模式相互对比以分析误差来源,并将二者测量结果与 LTP 比对,发现傅里叶

分析技术的测量结果与 LTP 的一致性更好。

所提技术的应用包括:1)研究波前传播角度或检测由光学元件(多层反射镜、单色器和菲涅耳波带片等)斜率误差引入的 X 射线波前畸变;2)应用于实验室级折射透镜测量,指导透镜加工工艺与误差修正;3)为 X 射线自适应光学反馈信号的关键技术提供实时波前测量和相干光束质量评价。该实验可为先进同步辐射光源与 X 射线自由电子激光在线波前调控验证提

供技术支撑。作为一种在线和原位方法,它允许测量工作条件下光学元件存在面形误差,并可无损检测由热负荷、自身重量变形、辐射损坏和机械安装(安装、夹紧、振动和应力)引起的波前传播角度误差。

微焦点光源与线光源不同,其焦斑尺寸在 X 方向和 Y 方向都较小,且均可满足空间相干性要求。因此,该系统可拓展到二维光栅干涉仪中,以进行二维波前传感与面形测量技术的研究。采用更亮的 X 射线源可以提高光通量,从而实现更高精度和更快测量速度。傅里叶分析技术更适合于 X 射线自由电子激光脉冲的波前测量,只需要单幅图像就可重建出波前相位分布。

#### 参 考 文 献

- [1] Wang H C, Moriconi S, Sawhney K. Nano-precision metrology of X-ray mirrors with laser speckle angular measurement[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 195.
- [2] Irick S C. Improved measurement accuracy in a long trace profiler: compensation for laser pointing instability [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1994, 347(1/2/3): 226-230.
- [3] 罗红心, 王劫, 肖体乔. 同步辐射用光学元件的检测[J]. *中国激光*, 2009, 36(s2): 134-139.  
Luo H X, Wang J, Xiao T Q. Optical elements metrology in synchrotron radiation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(s2): 134-139.
- [4] Rommeveaux A V, Lantelme B, Barrett R. ESRF metrology laboratory: overview of instrumentation, measurement techniques, and data analysis[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7801: 47-57.
- [5] 林维豪, 罗红心, 宋丽, 等. 同步辐射用光学元件面形绝对检测方法的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0912005.  
Lin W H, Luo H X, Song L, et al. Absolute flatness measurement of optical elements in synchrotron radiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0912005.
- [6] Zhao S, Yang Y, Shen Y, et al. Optics metrology and at-wavelength wavefront characterization by a microfocus X-ray grating interferometer[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 22704-22713.
- [7] Rutishauser S, Rack A, Weitkamp T, et al. Heat bump on a monochromator crystal measured with X-ray grating interferometry[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2013, 20(2): 300-305.
- [8] Idir M, Mercere P, Modi M H, et al. X-ray active mirror coupled with a Hartmann wavefront sensor[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 616(2/3): 162-171.
- [9] Xue L, Li Z L, Zhou T, et al. Absolute metrology method of the X-ray mirror with speckle scanning technique[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(31): 8658-8664.
- [10] Berujon S, Wang H C, Alcock S, et al. At-wavelength metrology of hard X-ray mirror using near field speckle [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6438-6446.
- [11] 李凡, 康乐, 杨福桂, 等. 基于 X 射线近场散斑的波前检测技术研究现状[J]. *光学学报*, 2022, 42(8): 0800002.  
Li F, Kang L, Yang F G, et al. Present research status of X-ray near-field speckle based wavefront metrology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(8): 0800002.
- [12] Kimura T, Mimura H, Handa S, et al. Wavefield characterization of nearly diffraction-limited focused hard X-ray beam with size less than 10 nm[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(12): 123704.
- [13] Berujon S, Ziegler E. Grating-based at-wavelength metrology of hard X-ray reflective optics[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4464-4466.
- [14] Kayser Y, David C, Flechsig U, et al. X-ray grating interferometer for *in situ* and at-wavelength wavefront metrology[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2017, 24(1): 150-162.
- [15] Wang H C, Sawhney K, Berujon S, et al. X-ray wavefront characterization using a rotating shearing interferometer technique[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16550-16559.
- [16] Weitkamp T, Nöhammer B, Diaz A, et al. X-ray wavefront analysis and optics characterization with a grating interferometer[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(5): 054101.
- [17] Marathe S, Wojcik M J, Kujala N G, et al. Development of grating-based hard X-ray Talbot interferometry for optics and beam wavefront characterization at the advanced photon source[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8501: 85010J.
- [18] Kayser Y, Rutishauser S, Katayama T, et al. Shot-to-shot diagnostic of the longitudinal photon source position at the SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser by means of X-ray grating interferometry[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 733-736.
- [19] Rutishauser S. X-ray grating interferometry for imaging and metrology[D]. Zurich: ETH Zurich, 2013.
- [20] Diaz A, Mocuta C, Stangl J, et al. Coherence and wavefront characterization of Si-111 monochromators using double-grating interferometry[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2010, 17(3): 299-307.
- [21] Wang H C, Berujon S, Sawhney K. Development of at-wavelength metrology using grating-based shearing interferometry at Diamond Light Source[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, 425(5): 052021
- [22] Wang H C, Sawhney K, Berujon S, et al. Fast optimization of a bimorph mirror using X-ray grating interferometry[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2518-2521.
- [23] Rutishauser S, Zanette I, Weitkamp T, et al. At-wavelength characterization of refractive X-ray lenses using a two-dimensional grating interferometer[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(22): 221104.
- [24] Wang H C, Berujon S, Sawhney K. Characterization of a one dimensional focusing compound refractive lens using the rotating shearing interferometer technique[C].

- AIP Conference Proceedings, 2012, 1466(1): 223-228.
- [25] Wang H C, Berujon S, Pape I, et al. X-ray wavefront characterization of a Fresnel zone plate using a two-dimensional grating interferometer[J]. Optics Letters, 2013, 38(6): 827-829.
- [26] Rutishauser S, Samoylova L, Krzywinski J, et al. Exploring the wavefront of hard X-ray free-electron laser radiation[J]. Nature Communications, 2012, 3: 947.
- [27] Seaberg M, Cojocaru R, Berujon S, et al. Wavefront sensing at X-ray free-electron lasers[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2019, 26(4): 1115-1126.
- [28] Liu Y W, Seaberg M, Zhu D L, et al. High-accuracy wavefront sensing for X-ray free electron lasers[J]. Optica, 2018, 5(8): 967-975.
- [29] Makita M, Seniutinas G, Seaberg M H, et al. Double grating shearing interferometry for X-ray free-electron laser beams[J]. Optica, 2020, 7(5): 404-409.
- [30] Berujon S. At-wavelength metrology of hard X-ray synchrotron beams and optics[D]. Grenoble: Université De Grenoble, 2013.
- [31] Ziegler E, Peverini L, Kozhevnikov I V, et al. On-line mirror surfacing monitored by X-ray shearing interferometry and X-ray scattering[C]. AIP Conference Proceedings, 2007, 879(1): 778-781.
- [32] Engelhardt M, Baumann J, Schuster M, et al. Inspection of refractive X-ray lenses using high-resolution differential phase contrast imaging with a microfocus X-ray source[J]. The Review of Scientific Instruments, 2007, 78(9): 093707.
- [33] 吴朝. X射线光栅相衬成像中的信息分离以及计算机断层重建[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.  
Wu Z. Information separation and CT in X-ray grating-based phase contrast imaging[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [34] Engelhardt M, Kottler C, Bunk O, et al. The fractional Talbot effect in differential X-ray phase-contrast imaging for extended and polychromatic X-ray sources[J]. Journal of Microscopy, 2008, 232(1): 145-157.
- [35] Engelhardt M, Baumann J, Schuster M, et al. High-resolution differential phase contrast imaging using a magnifying projection geometry with a microfocus X-ray source[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(22): 224101.
- [36] Weitkamp T, Diaz A, Nohammer B, et al. Moiré interferometry formulas for hard X-ray wavefront sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5533: 140-144.
- [37] Weitkamp T, David C, Kottler C, et al. Tomography with grating interferometers at low-brilliance sources[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6318: 63180S.
- [38] Zhao S, Wang K Y, Cheng G Y, et al. X-ray wavefront characterization with grating interferometry using an X-ray microfocus laboratory source[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11492: 118-130.
- [39] 胡仁芳. X射线光栅相位衬度成像实验技术和应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.  
Hu R F. Experimental technology and application of X-ray grating phase contrast imaging[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [40] Herzen J. A grating interferometer for materials science imaging at a second-generation synchrotron radiation source[D]. Hamburg: Universitaet Hamburg, 2010.
- [41] Hipp A, Willner M, Herzen J, et al. Energy-resolved visibility analysis of grating interferometers operated at polychromatic X-ray sources[J]. Optics Express, 2014, 22(25): 30394-30409.
- [42] Thuering T, Stampanoni M. Performance and optimization of X-ray grating interferometry[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2014, 372(2010): 20130027.
- [43] Gromann L B, Bequé D, Scherer K, et al. Low-dose, phase-contrast mammography with high signal-to-noise ratio[J]. Biomedical Optics Express, 2016, 7(2): 381-391.
- [44] 王志立. X射线光栅相位衬度成像研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.  
Wang Z L. Study on X-ray grating phase contrast imaging [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [45] 韩华杰. X射线光栅相衬成像医学应用与实验技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.  
Han H J. Research on medical applications and experimental techniques of X-ray grating-based phase contrast imaging[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [46] 王圣浩. X射线光栅相位衬度成像技术和方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.  
Wang S H. Research on grating based X-ray phase-contrast imaging and related techniques[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.