

文章编号: 1005-5630(2015)05-0419-07

# 用于柱面镜面形检测的 CGH 的设计与误差分析

马顺翔, 王占山

(同济大学 物理科学与工程学院 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 现代 X 射线掠入射成像式望远镜是由大量的圆柱面超薄玻璃镜面经压制成圆锥面组成的准 Wolter-I 型望远镜。为了完成超薄玻璃圆柱面的检测, 设计了适用于干涉检测的计算全息图(CGH)。结合 CGH 的设计制作过程, 分析了 CGH 的基底面形误差、刻蚀占空比误差、刻蚀位置误差、刻蚀深度等误差, 并对占空比、刻蚀深度的参数做了具体的分析, 通过对制作误差的分析选择了制作参数。采用设计制作的 CGH 和 ZYGO 干涉仪实现了 X 射线望远镜用柱面镜的检测, 检测结果达到了柱面镜的使用要求。

**关键词:** 二元线性光栅; 计算全息图(CGH); 标量衍射; ZYGO 干涉仪

**中图分类号:** O 436.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.05.009

## Design and production error analysis of CGH for testing the cylinder surface

MA Shunxiang, WANG Zhanshan

(Key Laboratory of Advanced Micro-structured Materials(MOE), School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Modern X-ray grazing incidence imaging telescope consists of a large number of conical surfaces pressed from cylindrical surfaces. In order to test figure error of the cylinder surface, the design of computer generated hologram (CGH) is achieved. Combined with the design and production process of CGH, we study the substrate surface figure error of CGH, etching duty cycle, etching position and etching depth. The cylindrical surfaces were tested in the X-ray telescope using the ZYGO interferometer and CGH. The results show that the figure error of cylinder surfaces meets the requirements of the mirrors of X-ray telescope.

**Keywords:** binary linear grating; computer generated hologram (CGH); scalar diffraction; ZYGO interferometer

## 引 言

掠入射 X 射线 Wolter-I 型望远镜是由一个旋转抛物面和一个旋转双曲面同轴共焦组成, 已广泛应用于 X 射线天文观测中<sup>[1]</sup>。Wolter-I 型望远镜结构克服了单个旋转对称非球面反射镜因不满足阿贝正弦条件而产生的大轴外像差, 能获得高的分辨率。在天文观测中, 为了获得大的集光面积, 需要采用嵌套式

收稿日期: 2015-02-11

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技专项资助项目(XDA04060605)

作者简介: 马顺翔(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计和测试方面的研究。E-mail:paradise.msx@163.com

通信作者: 王占山(1963—), 男, 教授, 主要从事 X 射线元器件与系统方面的研究。E-mail:wangzs@tongji.edu.cn

望远镜结构。美国在 1999 年发射的 Chandra 望远镜嵌套了 4 层抛物面和双曲面共焦的镜片,望远镜研制用了十多年才完成加工装配,成本巨大<sup>[2]</sup>。为了进一步提高集光面积和降低研制成本,国际上采用的望远镜结构均为类 Wolter-I 型的圆锥嵌套结构。用圆锥面代替抛物双曲面,可大大降低镜片的制作难度和研制成本,但望远镜理论分辨率在十几个角秒,远小于 Chandra 望远镜 0.5 角秒的分辨率。在以通量为观测目标的望远镜研制中,人们普遍采用的是圆锥面组成的望远镜,如日本研制的 Astro-E 天文望远镜<sup>[3]</sup>。近年来,由于玻璃工业的发展,人们可以采用超薄玻璃进行掠入射 X 射线望远镜的制作,如美国 2012 年发射的 NuSTAR 望远镜采用多层嵌套的圆锥面超薄玻璃镜。在 NuSTAR 研制过程中,首先研制大量的圆柱面反射镜,在最后的安装时将其压制成圆锥面<sup>[4]</sup>。在我国 X 射线时变与偏振望远镜研制过程中,我们计划采用类似方案,即先制作大量的圆柱面反射镜,然后在安装时将其装配成需要的圆锥面。为此,实现玻璃成形的熔融石英圆柱面模具和成形后的超薄玻璃圆柱面面形质量的测试成为高质量圆柱面超薄玻璃生产的关键。

柱面镜面形检测无法直接采用常规的干涉仪完成,若用干涉仪进行检测则需要制作一个柱面补偿器。若用玻璃透镜进行柱面镜补偿器的制作,该透镜中需包含柱面镜,由于其面形精度决定了补偿器的精度,因此这样的补偿器研制十分困难。补偿器也可以采用计算全息图(computer generated hologram, CGH)组成,目前,CGH 制作精度较高,CGH 光学检测技术已是一种高精度的光学检测技术<sup>[5]</sup>。近年来,随着光学检测仪器逐步趋向行业标准化<sup>[6]</sup>,国内开展了 CGH 光学检测技术方面的研究,在模拟分析和实验中均取得了一定进展<sup>[7-9]</sup>。本文设计了柱面检测需要的 CGH,并对其制作误差进行了分析,同时完成了基于设计制作的 CGH 补偿器的圆柱面检验,证明了 CGH 补偿器可以获得较高的圆柱面测量精度,能够满足国内 X 射线望远镜用圆柱面的检测。

### 1 用于柱面镜检测的 CGH 设计与制作

光学元件面形检测的常用方法是零位检测。在干涉仪检验中,如果被测面是球面,则来自干涉仪的球面波入射到被测球面上时将按原路返回,入射标准球面波与被测球面反射回来的波实现等厚干涉,根据干涉图可以获得被测球面的面形误差。按照零位条件,需要测量柱面面形误差并需要在干涉仪检测系统中增加光学元件以产生标准的柱面波,本文研究的 CGH 就是装在干涉仪中获得柱面波的光学元件。

#### 1.1 位相型 CGH 台阶的设计方案

为实现高的衍射效率,制作位相型 CGH。依据衍射理论,产生柱面波的全息图应该是一维的波带片,若要制作产生柱面波的 CGH,需要准确知道 CGH 中一维方向上的具体尺寸。设  $x_K$  为从中心开始计算的每个台阶的具体位置,由波带片的计算公式可知

$$x_K = \sqrt{Kf\lambda} \tag{1}$$

式中: $K$  为台阶数; $f$  为焦距; $\lambda$  为光波波长。相邻两波带的光束在焦点处有  $\pi$  的相位差。 $z$  方向上的光程差如图 1 所示。在干涉仪测量中,使用光波波长  $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ,由待测柱面镜的曲率半径范围可以确定出制作的 CGH 的焦距  $f=105 \text{ mm}$ ,口径为  $52 \text{ mm}$ ,由此可计算出总波带数为 10 174 个。

#### 1.2 CGH 的相位分布

半波带的径向位置由式(1)表示,由此可得

$$\varphi = \frac{\pi}{f\lambda} x_K^2 = \pi K \tag{2}$$

式(2)表明,由菲涅耳波带片理论计算的 CGH 径向位置是相位改变  $\pi$  的位置。所设计的 CGH 是为了检测柱面,所以入射的平行光经 CGH 后要形成平行于  $y$  轴的亮线,其会聚线应在被测柱面的焦点上,同时也在 CGH 的焦点上。在此位置上若有光源,则在 CGH

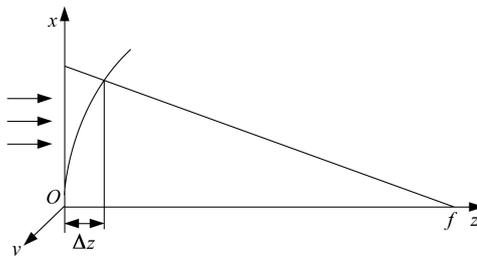


图 1 CGH 在 z 方向上的光程差  
Fig. 1 Optical path difference of z direction of CGH

上  $x$  处的相位为

$$L(x) = \sqrt{x^2 + f^2} - f \approx \frac{x^2}{2f} \quad (3)$$

式(3)表明, $L(x)$ 便是在轴线上半径为  $f$  的抛物面上与  $x$  轴的距离。所以 CGH 在纵向  $x$  方向上的连续相位为抛物面曲线,可表示为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x_k^2}{2f} = \frac{2\pi}{\lambda} L(x) \quad (4)$$

### 1.3 位相型 CGH 台阶位置的计算

图 2 所示为利用式(4)得到径向相位余弦图,由此可见,由菲涅耳波带理论计算出的波带边界  $x_k$  与相位余弦的极值点位置是一致的。利用式(4)可精确制作 CGH 波带片,在基底上的刻蚀深度和边界如图 3 所示。

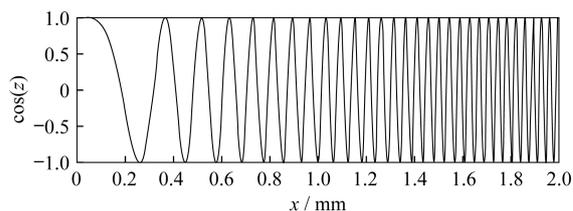


图 2 CGH 相位余弦图

Fig. 2 Phase cosine of CGH

从图 3 可以看出:CGH 上的条纹间距与径向位置成反比关系;空间频率与径向位置成正比关系。利用式(4)可计算出刻线密度与刻线位置的关系,如图 4 所示。

通过计算可得 CGH 边缘 26 mm 处的频率为 391 条/mm,依据现有的刻蚀技术,这很容易制作。当入射光为平行光时,由此 CGH 产生的波前三维图像如图 5 所示。

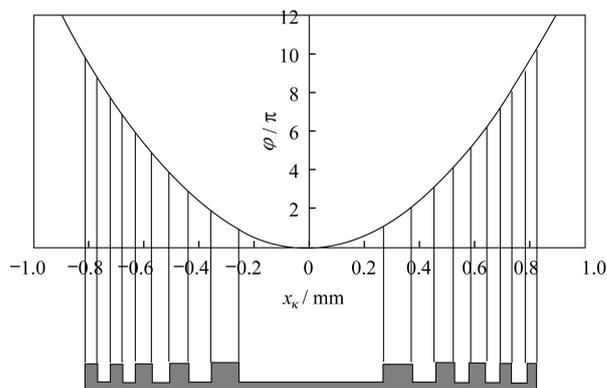


图 3 CGH 制作示意图

Fig. 3 Schematic of CGH

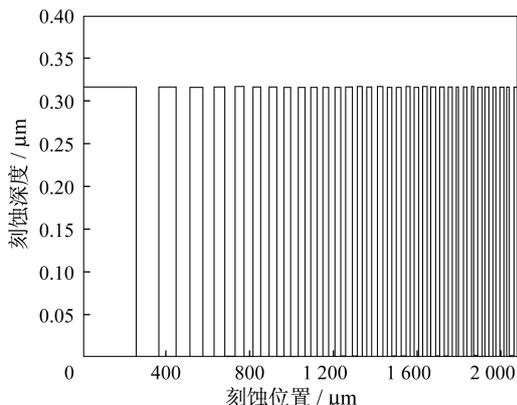


图 4 CGH 刻蚀深度和边界

Fig. 4 The border and etching depth of CGH

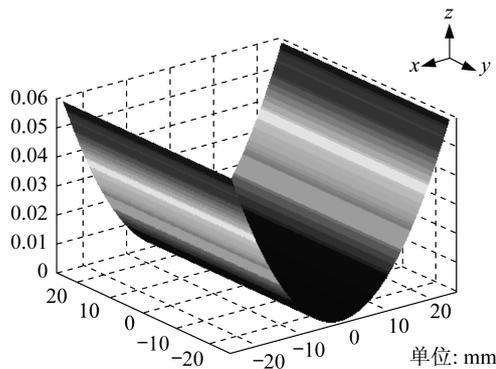


图 5 波前三维图像

Fig. 5 Three-dimensional image of the wave front

### 1.4 位相型 CGH 的衍射效率

图 6(a)为振幅型 CGH,类似于波带片,将所有奇数半波带(或偶数带)全部挡掉,使剩下的带在焦点的光强大大增加。图 6(b)为位相型 CGH,它不挡住相间的半波带,而是在奇数带(或偶数带)的位置设置台阶,适当控制台阶的高度,使通过它的光波在焦点处产生的振动相位延迟  $\pi$ ,这样使各带在焦点的振动相位相同,进一步增加光强。

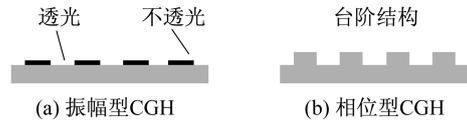


图 6 CGH 类型  
Fig. 6 The CGH type

CGH 相当于一系列不同频率的光栅的组合,图 7 为二元线型光栅模型。图中:  $A_0$  和  $A_1$  分别表示光波通过光栅的波峰和波谷的振幅值,它们与光波入射到 CGH 过程中的反射系数和透射系数有关,可以用菲涅耳公式求出<sup>[10]</sup>;  $\varphi$  表示波峰与波谷的相位差,其大小与刻蚀深度有关;  $d$  为光栅周期;  $b$  为线宽。

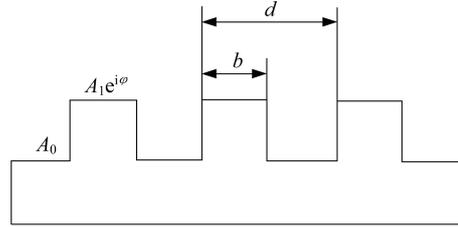


图 7 相位型 CGH  
Fig. 7 Phase type of CGH

如果平面波正入射到这样一个光栅上,经过衍射后的光波波前可以表示为

$$u(x) = A_0 + (A_1 e^{i\varphi} - A_0) \text{rect}\left(\frac{x}{b}\right) \cdot \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x}{d}\right) \quad (5)$$

根据夫琅和费衍射理论,远场衍射波面与初始波面有数学上的傅里叶变换关系,即

$$\begin{aligned} U(\xi) &= F(u(x)) = A_0 \delta(\xi) + (A_1 e^{i\varphi} - A_0) b \cdot \text{sinc}(b\xi) \cdot \text{comb}(d\xi) = \\ &= \{A_0 \delta(\xi) + [A_1 \cos(\varphi) - A_0] D d \cdot \text{comb}(d\xi) \text{sinc}(Dd\xi)\} + \\ &+ i\{[A_1 \sin(\varphi) - A_0] D d \cdot \text{comb}(d\xi) \cdot \text{sinc}(Dd\xi)\} = \\ &= \{A_0 \delta(\xi) + [A_1 \cos(\varphi) - A_0] D \cdot \text{sinc}(Dd\xi) \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\xi - \frac{m}{d})\} + \\ &+ i\{[A_1 \sin(\varphi) - A_0] D \cdot \text{sinc}(Dd\xi) \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\xi - \frac{m}{d})\} = \\ &\begin{cases} \{A_0 + [A_1 \cos(\varphi) - A_0] D\} + i\{A_1 \sin(\varphi) D\} & m = 0 \\ \{[A_1 \cos(\varphi) - A_0] D \cdot \text{sinc}(mD)\} + i\{A_1 \sin(\varphi) D \cdot \text{sinc}(mD)\} & m = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

式中:  $\xi = \frac{x}{\lambda z}$ ; 线型光栅的占空比  $D = \frac{b}{d}$ 。从此式可以看出,当且仅当  $\xi$  为  $\frac{1}{d}$  的整数倍时,  $U(\xi)$  有非零值。这表明存在多个整数衍射级,每个函数值对应不同的衍射级次,可以通过在光路中特定位置加入光阑的方式得到所需的衍射级次。

对于零级衍射光 ( $m=0$ ), 其衍射光强为

$$\begin{aligned} I(\xi) &= |\{A_0 + [A_1 \cos\varphi - A_0] D\} + i\{A_1 \sin\varphi \cdot D\}|^2 = \\ &= A_0^2 (1 - D)^2 + A_1^2 D^2 + 2A_0 A_1 D (D - 1) \cos\varphi \quad (7) \end{aligned}$$

对于非零级衍射光 ( $m \neq 0$ ), 其衍射光强为

$$\begin{aligned} I(\xi) &= |\{[A_1 \cos\varphi - A_0] D \text{sinc}(mD)\} + i\{A_1 \sin\varphi \cdot D \text{sinc}(mD)\}|^2 = \\ &= \{[A_1 \cos\varphi - A_0] D \text{sinc}(mD)\}^2 + \{A_1 \sin\varphi \cdot D \text{sinc}(mD)\}^2 = \\ &= [A_0^2 + A_1^2 - 2A_0 A_1 \cos\varphi] D^2 \text{sinc}^2(mD) \quad (8) \end{aligned}$$

所以,对不同的衍射级次,衍射效率分别为

$$\eta_{m=0} = A_0^2 (1 - D)^2 + A_1^2 D^2 + 2A_0 A_1 D (D - 1) \cos\varphi \quad (9)$$

$$\eta_{m \neq 0} = [A_0^2 + A_1^2 - 2A_0 A_1 \cos\varphi] D^2 \text{sinc}^2(mD) \quad (10)$$

当刻蚀深度为  $0.5\lambda$  时,非零级衍射效率见图 8,为了获得较大的衍射效率,选择占空比为 0.5 的 1 级

衍射光作为测试光束。

从远场波面关系式可以得到衍射光波的实部和虚部为

$$\begin{cases} \operatorname{Re}\{U(\xi)\} = A_0\delta(\xi) + [A_1\cos(\varphi) - A_0]Dd \cdot \operatorname{comb}(d\xi)\operatorname{sinc}(Dd\xi) \\ \operatorname{Im}\{U(\xi)\} = [A_1\sin(\varphi) - A_0]Dd \cdot \operatorname{comb}(d\xi)\operatorname{sinc}(Dd\xi) \end{cases} \quad (11)$$

由此再现波面位相分布为

$$\psi = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}\{U(\xi)\}}{\operatorname{Re}\{U(\xi)\}}\right) = \begin{cases} \arctan\left[\frac{DA_1\sin\varphi}{A_0(1-D) + A_1D\cos\varphi}\right] & m=0 \\ \arctan\left(\frac{A_1\sin\varphi}{A_0\cos\varphi - A_0}\right) & m=\pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (12)$$

## 2 CGH 误差分析

### 2.1 基底面形误差

CGH 的玻璃基底误差是导致衍射光低频波像差的原因,在加工、装配和测试过程中会形成面形误差。如图 9 所示,假设 CGH 基底面形误差为  $\delta$ ,则反射波的波前误差为  $2\delta$ ,透射波的波前误差为  $(n-1)\delta$ ,其中  $n$  为基底材料对于入射光波的折射率。对于制作 CGH 的基底面形误差,在刻蚀 CGH 之前,用干涉仪进行了测量,面形误差小于 32 nm。

### 2.2 占空比及刻蚀深度误差

从式(12)可以看出波前位相函数  $\psi$  可用占空比  $D$  和位相  $\varphi$  来表示。通过将  $\psi$  对  $D$  和  $\varphi$  求一阶导数可以计算出位相变化,此一阶导数称为波前位相的敏感函数,它代表每单位占空比或位相的变化引起的波前相位变化。

当  $m=0$  时,

$$\begin{cases} \frac{\partial\psi_{m=0}}{\partial D} = \frac{A_0A_1\sin\varphi}{A_1^2D^2 + A_0^2(1-D)^2 + 2A_0A_1D(1-D)\cos\varphi} \\ \frac{\partial\psi_{m=0}}{\partial\varphi} = \frac{A_1^2D^2 + A_0A_1D(1-D)\cos\varphi}{A_1^2D^2 + A_0^2(1-D)^2 + 2A_0A_1D(1-D)\cos\varphi} \end{cases} \quad (13)$$

当  $m=\pm 1, \pm 2, \dots$  时,

$$\begin{cases} \frac{\partial\psi_{m\neq 0}}{\partial D} = \begin{cases} \infty & \operatorname{sinc}(mD) = 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ \frac{\partial\psi_{m\neq 0}}{\partial\varphi} = \frac{A_1^2 + A_0A_1\cos\varphi}{A_0^2 + A_1^2 - 2A_0A_1\cos\varphi} \end{cases} \quad (14)$$

由式(13)、式(14)可以看出,在零级衍射光中,占空比及刻蚀深度都会对衍射波前相位函数有影响,所以此时占空比或刻蚀深度的变化都会使零级衍射光的衍射波前产生误差。而在非零级衍射光中,刻蚀深度依然会对衍射波前产生影响,而占空比则不会,所以选用-1级衍射光对透镜进行检测,此时仅刻蚀深度会对非零级衍射光的衍射波前产生影响。

通过计算相位敏感函数,在-1级衍射中,理论上获得刻蚀深度为  $0.5\lambda$ ,虽然此时的衍射效率最大,但刻蚀深度的变化会导致衍射效率的下降,为平衡两者的关系,在制作中刻蚀深度需要控制在  $0.40\lambda \sim 0.48\lambda$ 。

### 2.3 刻蚀图案畸变误差

CGH 对入射光的相位和振幅都有调制作用,CGH 上的刻蚀条纹的位置直接影响到入射光通过

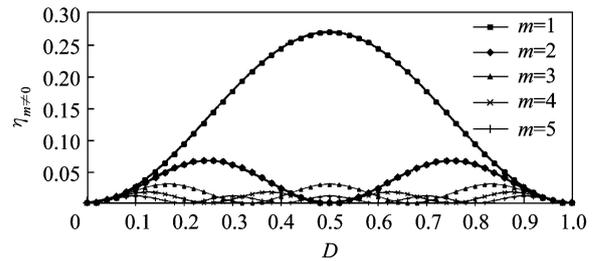


图 8 非零级衍射效率

Fig. 8 Diffraction efficiency of non-zero order

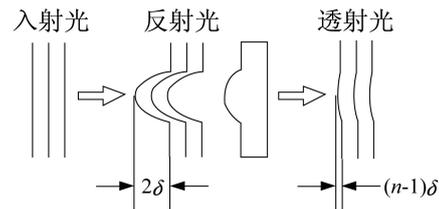


图 9 基底面形误差示意图

Fig. 9 Substrate surface shape error

CGH 后的衍射波,从而对衍射后的相位分布产生影响。

对于对称形式的 CGH,刻蚀过程中图案沿径向位置的偏差可以通过二元线性光栅模型来计算。通过刻线中心的两条相邻的光线的光程差为  $d\sin\theta=m\lambda$ ,说明每一条刻线的作用是对  $m$  级的衍射光提供  $m$  个波长的相位补偿,对于 1 级衍射光波,每条刻线提供 1 个波长的相位补偿,所以,由刻蚀图案位置的偏移造成的相位误差为<sup>[1]</sup>

$$\Delta W(r) = m\lambda \frac{\epsilon(r)}{d(r)} \tag{15}$$

式中  $\epsilon(r)$  和  $d(r)$  分别是 CGH 在点  $x$  处条纹的径向偏移量和条纹间距。由此可以知道,在我们设计的 CGH 制作中,常规光刻的  $1\ \mu\text{m}$  制作误差完全达到了制作 CGH 的精度要求。

### 3 CGH 检验柱面镜面形实验

我们进行测试的柱面镜的尺寸为:口径 80 mm,长度 150 mm,焦距 75 mm。实际制作用于柱面镜测量的 CGH 尺寸为:辅助标准环带宽度 5 mm,CGH 区域  $60\ \text{mm} \times 52\ \text{mm}$ ,焦距 105 mm,厚度 2.28 mm,图 10 为测试图。

根据柱面镜和 CGH 的尺寸,能计算出采用此 CGH 可实现的柱面镜的测量范围为  $60\ \text{mm} \times 37\ \text{mm}$ ,由于柱面镜长为 150 mm,测量中可以平移柱面镜,实现柱面镜不同区域面形精度的测量。

将待检测的柱面镜放在 CGH 后,其凸面朝向 CGH,同时调整 CGH 的焦点与柱面镜的焦点在同一位置处。图 11 是用 CGH 测量获得的柱面镜波前图和干涉条纹图,由图可以知道上图的柱面镜的面形精度是 PV 值为  $0.893\ \lambda$ ,均方根值  $RMS=0.122\ \lambda$ 。下图的柱面镜的面形精度是 PV 值为  $2.418\ \lambda$ ,均方根值  $RMS$  为  $0.390\ \lambda$ 。

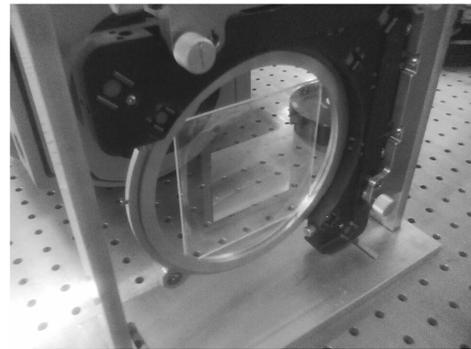


图 10 在测试过程中的 CGH

Fig. 10 The CGH in the interferometer

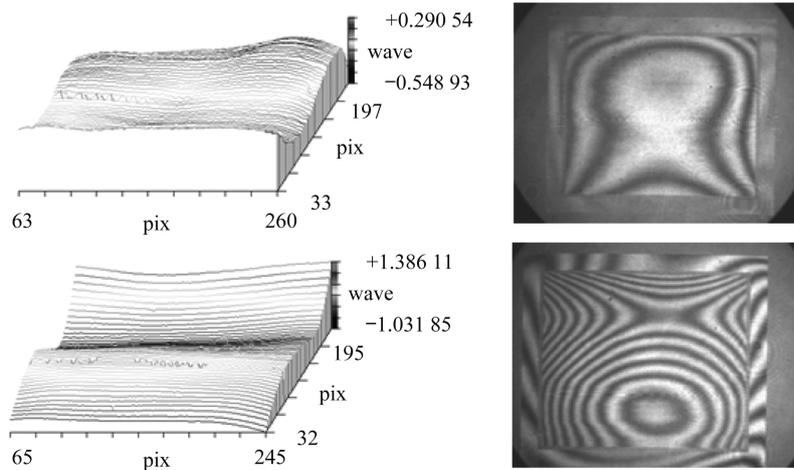


图 11 柱面镜测试结果

Fig. 11 Measured results of cylindrical lens

### 4 结 论

根据 X 射线望远镜对柱面镜的需求,设计了用于柱面镜检测的 CGH,分析了相关的误差,得出刻蚀深度为  $0.45\lambda$ ,占空比为 0.5,最大空间频率为 391 条/mm。采用 ZYGO 干涉仪与 CGH 组成的柱面镜检测系统,实现了柱面镜的测试,得到了柱面镜面形误差,测试结果表明,研制的柱面镜能够满足 X 射线望远镜对柱面镜的需要。

**参考文献:**

- [ 1 ] KOGLIN J E, CHEN C M, CHONKO J C, et al. Hard X-ray optics; from HEFT to NuSTAR[J]. SPIE, 2004, 5488: 856-866.
- [ 2 ] WEISSKOPF M C, O'DELL S L, ELSNER R F, et al. Advanced X-ray astrophysics facility (AXAF): an overview[J]. SPIE, 1995, 2515: 312-329.
- [ 3 ] KUNIEDA H, ISHIDA M, ENDO T, HIROHIKO Y, et al. X-ray telescope onboard Astro-E: optical design and fabrication of thin foil mirrors[J]. Applied Optics, 2001, 40(4): 553-564.
- [ 4 ] KOGLIN J E, CHRISTENSEN F E, CRAIG W W, et al. NuSTAR hard X-ray optics[J]. SPIE, 2005, 5900: 2-7.
- [ 5 ] DEBOO B, SASIAN J. Precise focal-length measurement technique with a reflective Fresnel-zone hologram[J]. Applied Optics, 2003, 42(19): 3903-3909.
- [ 6 ] 黄卫佳. 光学和光学仪器——光学传递函数——测量原理和步骤[J]. 光学仪器, 2008, 30(1): 90-94.
- [ 7 ] 卢振武, 刘华, 李凤有. 利用曲面计算全息图进行非球面检测[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 555-559.
- [ 8 ] 许英朝, 周平, 张新. 三次位相传播中的波像差及在 CGH 中衍射级次的分离[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2104-2109.
- [ 9 ] 胡特, 张海涛, 宠永杰, 等. 计算全息检测非球面的模拟计算研究[J]. 激光杂志, 2009, 30(1): 44-46.
- [ 10 ] 梁柱. 光学原理教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [ 11 ] BURGE J H. Applications of computer generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics[J]. SPIE, 1995, 2576: 258-269.

(编辑: 刘铁英)

**(上接第 406 页)**

- [ 5 ] KIM T G, WARRENDER J M, AZIZ M. Photoluminescence properties peculiar to the Mn-related transition in a lightly alloyed ZnMnO thin film grown by pulsed laser deposition[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(24): 241902.
- [ 6 ] WU C, CROUCH C H, ZHAO L, et al. Near-unity below-band-gap absorption by microstructured silicon[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(13): 1850-1852.
- [ 7 ] PENG Y, CHEN X Q, ZHOU Y Y, et al. Annealing-insensitive "black silicon" with high infrared absorption[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(7): 073102.
- [ 8 ] CROUCH C H, CAREY J E, SHEN M, et al. Infrared absorption by sulfur-doped silicon formed by femtosecond laser irradiation[J]. Applied Physics A, 2004, 79(7): 1635-1641.
- [ 9 ] SIMMONS C B, AKEY A J, KRICH J J, et al. Deactivation of metastable single-crystal silicon hyperdoped with sulfur[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(24): 243514.
- [ 10 ] SARNET T, HALBWAX M, TORRE R S. Femtosecond laser for black silicon and photovoltaic cells[J]. SPIE, 2008, 6881: 688119.
- [ 11 ] CROUCH C H, CAREY J E, WARRENDER J M, et al. Comparison of structure and properties of femtosecond and nanosecond laser-structured silicon[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(11): 1850-1852.
- [ 12 ] PENG Y, WEN Y, ZHANG D S, et al. The optimal relation between laser power and pulse number for the fabrication of surface-microstructured silicon[J]. Applied Optics, 2011, 50(24): 4765-4768.
- [ 13 ] PENG Y, CHEN H Y, ZHU C G, et al. The effect of laser wavelength on the formation of surface-microstructured silicon[J]. Materials Letters, 2012, 83: 127-129.
- [ 14 ] SHER M J, MAZUR E. Intermediate band conduction in femtosecond-laser hyperdoped silicon[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(3): 032103.

(编辑: 刘铁英)