

用于高精度非球面面形检测的计算全息图的设计

高松涛 武东城 于长淞

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室超精密光学工程研究中心, 吉林 长春 130033

摘要 目前,高数值孔径(NA)投影光刻物镜都普遍采用非球面元件来提升光学系统的成像质量并降低系统的复杂度,但是高精度非球面检测一直是光学检测领域的一大难题,也是限制高 NA 投影光刻物镜制造的关键因素。为了解决这一难题,针对高 NA 投影光刻物镜中的一偶次高次非球面,论述了计算全息图(CGH)相位与空间频率的关系,以及相位与空间频率的计算方法;采用点光源照明模式,详细分析了 CGH 设计时的关键参数的选择方法和避免 CGH 非工作衍射级次的干扰的方法;采用所选定的设计参数,加工制作了 CGH,并用此 CGH 完成了对非球面的高精度检测。经过多轮加工检测迭代,最终非球面的收敛精度的均方根(RMS)达到了 0.46 nm。

关键词 测量; 计算全息图; 非球面; 投影光刻物镜; 衍射鬼像; 干涉仪

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.090901

Computer-Generated Hologram Design for High-Precision Aspherical Surface Testing

Gao Songtao Wu Dongcheng Yu Changsong

Research Center of Extreme Precision Optics, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract At present, aspherical elements are usually used to improve imaging quality and degrade complexity of system in the high numerical aperture (NA) projected lithography objective. However, high-precision aspherical surface testing has been a major problem in the field of optical detection. It is also the key factor which restricts the fabrication of high NA projected lithography objective. To solve this problem and aim at high NA projected lithography objective in the even of a high order asphere, the relationship and the calculating method between the phase and spatial frequency of computer-generated hologram (CGH) are discussed in the paper first. Then, by using a point source illumination mode, the methods of choosing key CGH design parameters and avoiding the interference of non-working order diffraction rays are analyzed in detail. Lastly, a CGH is fabricated using the design parameters chosen from this paper, and the asphere is tested by this CGH precisely. The root mean square value of the aspheric surface's convergence precision eventually reaches 0.46 nm after several fabricating and testing iterations.

Key words measurement; computer-generated hologram; asphere; projected lithography objective; diffraction ghost; interferometer

OCIS codes 090.1760; 090.1790; 120.3940; 120.6650

1 引言

在光学设计中,如果系统的数值孔径(NA)较大,往往会导致光线的入射角较大,从而引入较大的像差(特别是高阶像差),这在高 NA 投影光刻物镜中表现得尤为明显。对于低阶像差的校正,通过曲率半径及间隔的优化即可达到较好的效果;而对于高阶像差的校正,则较为困难。此时如果采用非球面元件,就可以达

收稿日期: 2016-04-20; **收到修改稿日期:** 2016-05-11; **网络出版日期:** 2016-08-20

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 高松涛(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事高精度非球面面形检测方面的研究。

E-mail: gaost965@126.com

到较好的效果^[1-3]。对于非球面元件,除了顶点曲率半径之外,往往还有二次曲面常数和高阶项系数可供优化。当非球面元件放置于光阑附近,可以很好地校正系统的球差及高阶球差;放置于远离光阑的位置,则可以校正彗差及高阶彗差。由于非球面比球面拥有更多设计的自由度,所以在高 NA 投影光刻物镜中,普遍采用非球面元件来减小系统的复杂度,并提高系统的成像质量^[4-5]。虽然非球面有优良的光学性质,但是非球面检测,特别是高精度非球面面形检测一直是光学检测领域的一个难题,也是制约非球面元件应用的关键因素。

当前,干涉测量法是进行高精度面形检测的主要方法。对于偏离度较小的非球面,可以采用环带子孔径拼接^[6]或者圆形子孔径拼接法^[7]进行测量,但检测精度往往受制于机械定位误差和干涉仪的非共光路误差;对于二次曲面,可以采用无像差点法^[8]进行检测,但往往会引入中心遮拦;而对于一般的高次非球面,则往往采用零位补偿法^[9-14]进行检测。零位补偿法是指采用透镜(通常是球面透镜)补偿镜或者计算全息图(CGH)作为补偿器,将干涉仪发出的球面波转换为与非球面相匹配的非球面波,从而实现非球面的零位检测。补偿镜^[9-10]一般由 2~3 片球面透镜构成,为了保证检测精度,往往需要严格控制透镜的中心厚度、间隔、曲率半径、折射率和面形等因素。而 CGH^[11-16]由基板和基板上的刻线构成,结构相对简单;并且 CGH 往往还具有辅助调整功能,可以精确调节 CGH 和非球面的位置,所以在高精度检测领域,往往采用 CGH 作为零位补偿器来对非球面进行零位检测。

本文针对高 NA 投影光刻物镜中的一偶次高次非球面,首先论述了 CGH 相位与空间频率的关系,以及相位与空间频率的计算方法;然后采用点光源照明模式,详细分析了 CGH 设计时的关键参数的选择方法和避免 CGH 非工作衍射级次的干扰的方法;最后,采用所选定的设计参数,加工制作了 CGH,并用此 CGH 完成了对非球面的高精度检测。

2 CGH 的相位与空间频率的计算

2.1 非球面方程

所选择的偶次高次非球面的方程可以表示为

$$z = \frac{(\rho/R)^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)(\rho/R)^2}} + \sum_{n=1}^M A_n \rho^{2n+2}, \quad (1)$$

式中 z 为非球面的矢高, R 为顶点曲率半径, κ 为二次曲面常数, A_n 为高阶项系数, M 为高阶项的阶数, ρ 为非球面的径向坐标。非球面的具体参数如表 1 所示,其中 D 为通光口径。非球面偏离度与梯度如图 1 所示。

表 1 非球面的参数

Table 1 Parameters of asphere

D	R	κ	A_4	A_6	A_8	A_{10}
156	550.000	0	1.703×10^{-8}	6.4298×10^{-13}	2.4105×10^{-17}	-2.9658×10^{-22}

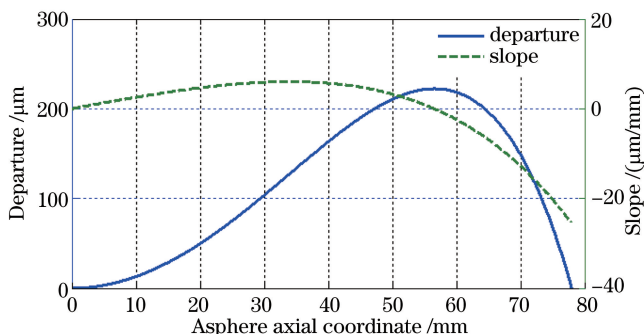


图 1 非球面的偏离度和梯度

Fig. 1 Departure and slope of asphere

2.2 CGH 相位和空间频率的计算

2.2.1 CGH 相位与空间频率的关系

CGH 的相位与空间频率满足如下关系^[17]

$$\Phi(\rho) = 2\pi N \int f(\rho) d\rho, \quad (2)$$

式中 $\Phi(\rho)$ 为相位, $f(\rho)$ 为空间频率, N 为衍射级次。因此, 对于 CGH 而言, 相位与空间频率只要知道其一, 另外一个即可通过(2)式(或其微分形式)进行计算。

2.2.2 CGH 相位计算方法

CGH 相位或空间频率的计算往往采用“倒置”的计算方法, 如图 2 所示。图中 P 为非球面上的任意一点, 过 P 作非球面的法线, 交 CGH 后表面于点 M ; 光线 PM 经 CGH 衍射后, 交 CGH 前表面于点 N , 最后汇聚于点 F ; 其中 CGH 基板的折射率为 n_g , 周围空气的折射率为 n_a ; 非球面距 CGH 后表面的距离为 d_1 , CGH 基板厚度为 d , 点 F 距 CGH 前表面的距离为 d_2 ; P 点与光轴距离为 ρ , M 点与光轴距离为 r ; 光线 PM 在 CGH 上的入射角为 θ_0 , 衍射角为 θ_1 , 离开基板时的出射角为 θ_2 。考虑到衍射效率^[18-19], 设计时采用 CGH 的 +1 级衍射光。

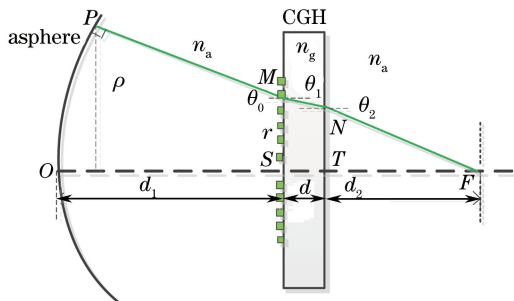


图 2 CGH 的相位和空间频率计算示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch for calculating phase and spatial frequency of CGH

根据费马等光程原理, 要使非球面上任意一点沿法线出射的光线都汇聚到点 F , 则有

$$n_a |PM| + n_g |MN| + n_a |NF| + \Phi(r) = n_a d_1 + n_g d + n_a d_2 + \Phi(0). \quad (3)$$

考虑到实际使用过程中采用的都是相对相位, 因此令 $\Phi(0) = 0$, 则有

$$\Phi(r) = n_a (d_1 + d_2 - |PM| - |NF|) + n_g (d - |MN|). \quad (4)$$

采用光线追迹的方法, 利用(4)式可以数值求解出 CGH 的相位分布; 利用(2)式的微分形式, 可以计算出 CGH 的空间频率。

2.2.3 CGH 空间频率计算方法

设非球面方程为 $z(\rho)$ (光轴方向为 +Z), 根据图 2, 光线 PM 的入射角为

$$\theta_0 = -\arctan \left[\frac{dz(\rho)}{d\rho} \right]. \quad (5)$$

根据光栅方程, 有

$$n_g \sin \theta_1 - n_a \sin \theta_0 = M\lambda f(r). \quad (6)$$

根据折射定律, 有

$$n_a \sin \theta_2 = n_g \sin \theta_1. \quad (7)$$

在 $\triangle NFT$ 中, 根据几何关系, 有

$$\theta_2 = \arctan \left(\frac{r}{d_2} \right). \quad (8)$$

利用(5)~(8)式, 采用数值计算的方法, 可以计算出 CGH 的空间频率; 利用(2)式, 可以计算出 CGH 的相位。

3 CGH 设计的关键参数选择及设计实例

3.1 CGH 到非球面距离的选择

根据 2.2 节中的计算可以看出, CGH 的坐标与非球面坐标一一对应, 因此从原则上来看, 只要 CGH 处于非球面的焦散区之外, 都可以按照 2.2.2 节和 2.2.3 节中的计算方法计算出 CGH 的相位和空间频率。但在实际设计过程中, 除了考虑非球面的焦散区之外, 还要考虑 CGH 的刻蚀加工尺寸和成像畸变。从图 2 可以看出, 非球面到 CGH 的距离 d_1 直接决定了 CGH 的尺寸。对于凹非球面, CGH 到非球面的距离越大, 其

尺寸将越小;而对于凸非球面,结果则恰恰相反。以表 1 中的非球面为例,如图 3 所示,CGH 距非球面越近,则 CGH 尺寸越大,相应的加工成本越高,而 CGH 的成像畸变则越小;而当 CGH 远离非球面时,其尺寸变小,相应的加工成本降低,但是 CGH 的成像畸变则会明显变大。虽然 CGH 的成像畸变可以矫正,但是如果成像畸变增大,则矫正之后的剩余残差也会增大^[15]。因此,在实际的设计过程中,要根据实际情况来确定 CGH 的尺寸,以便在可以接受的加工成本下实现较小的成像畸变。实际上,当前国际上商用的 CGH 的基板的尺寸为 $6'' \times 6'' \times 0.25''$,而可以用于刻蚀的区域是直径小于 140 mm 的圆形域,并且在此圆形域中,不仅要刻蚀用于零位补偿的 CGH,往往还要刻蚀用于辅助调节的 CGH。因此,在 CGH 设计之初,需要首先确定整个 CGH 的刻线布局,而后根据零位 CGH 的尺寸来确定非球面到 CGH 的距离。综合考虑 CGH 的制造成本和成像畸变,对于表 1 所示的非球面,其到 CGH 的距离最终选定为 $d_1 = 150$ mm。

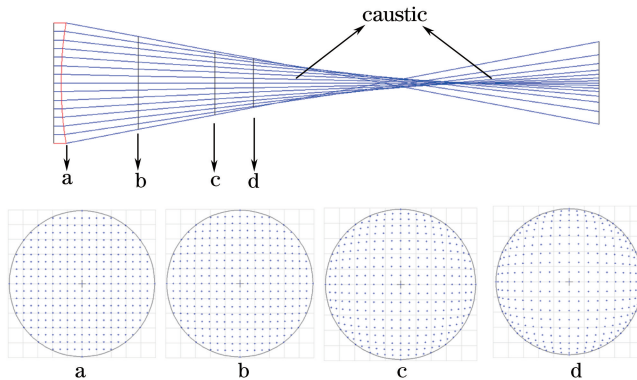


图 3 非球面的焦散区和 CGH 处于不同位置时的成像畸变

Fig. 3 Caustic of the asphere and the imaging distortions at different positions of CGH

3.2 CGH 到干涉仪焦点距离的选择

对于结构最简单的轴对称 CGH,其到干涉仪焦点的距离决定了刻线密度,从而也决定了刻蚀误差对波前的影响和非工作衍射级次的分离情况。为了便于理解,首先介绍一下 CGH 刻蚀畸变对波前的影响,以及 CGH 的非工作衍射级次和干涉仪滤波小孔,然后再讨论 CGH 到干涉仪焦点距离的选择方法。

3.2.1 CGH 刻蚀畸变对波前的影响^[18,20]

CGH 刻蚀畸变对衍射波前的影响可以表示为

$$\Delta W(x, y) = -\nabla W_\lambda(x, y) \cdot E(x, y), \quad (9)$$

式中 $\Delta W(x, y)$ 为 CGH 所生成非球面波的波面误差, $W_\lambda(x, y)$ 为衍射波前, $\nabla W_\lambda(x, y)$ 为衍射波前的梯度, $E(x, y)$ 为刻蚀畸变矢量。利用线性光栅模型^[17], (9) 式可以化简为

$$\Delta W(x, y) = -m\lambda \frac{\varepsilon(x, y)}{S(x, y)}, \quad (10)$$

式中 m 为所使用的衍射级次, $\varepsilon(x, y)$ 为刻蚀畸变沿刻线法线方向的误差, $S(x, y)$ 为刻线的局部周期。从(10)式可以看出,为了减小刻蚀畸变所引入的误差,在进行 CGH 设计时,需要尽量加大刻线的周期,降低刻线的密度。

3.2.2 利用干涉仪小孔光阑过滤 CGH 非工作衍射级次的干扰

作为二元衍射光学元件,当光照射到 CGH 上时,除了产生所需要级次的衍射光之外,还会产生其他衍射级次,如图 4 所示,不仅存在透射衍射光,还存在反射衍射光。如果非工作级次的衍射光进入干涉仪,则会对测量造成干扰,形成鬼像。为了避免鬼像的干扰,在进行 CGH 设计时,需要考虑利用干涉仪内部的孔径光阑,将非工作衍射级次的衍射光过滤掉。干涉仪内部的孔径光阑模型如图 5(a)所示, r_1 为孔径光阑半径, L_1 为准直镜焦距, L_2 为球面标准镜焦距, r_2 为孔径光阑经准直镜和标准镜所成像的半径。 r_1 与 r_2 满足

$$r_2 = \frac{L_2}{L_1} r_1. \quad (11)$$

对于商用干涉仪,其孔径光阑尺寸是确定的(如 Zygo 6'' 干涉仪小孔尺寸为 1.5 mm),利用(11)式可以计算出参考面焦点处光阑像的尺寸,在光学设计软件中将其设置为滤波小孔,从而可查看分析 CGH 非工作衍射级次衍射光的干扰情况。通过增加 CGH 的倾斜或离焦载频,利用干涉仪内部的孔径光阑,可以避免非工

作衍射级次的鬼像干扰,如图 5(b)所示。

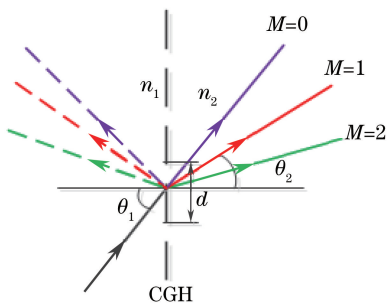


图 4 CGH 不同衍射级次的衍射光

Fig. 4 Diffracted rays for different orders of the CGH

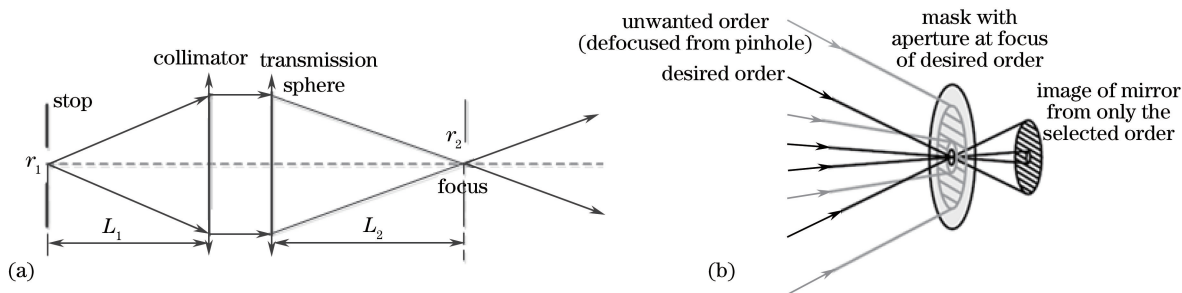


图 5 (a)干涉仪的孔径光阑模型; (b)利用孔径光阑过滤非工作级次的衍射光

Fig. 5 (a) Aperture diaphragm model of interferometer; (b) filtering non-working order diffraction rays by aperture diaphragm

3.2.3 CGH 到焦点距离的选择

若焦点 F 置于最佳拟合球的球心附近,此时的载频最小,CGH 的刻线较为稀疏,CGH 刻线的相位与空间频率如图 6 所示。由于载频很小,此时 $(+3, -1)$ 和 $(-1, +3)$ 级衍射光会造成严重的干扰,如图 7 所示。

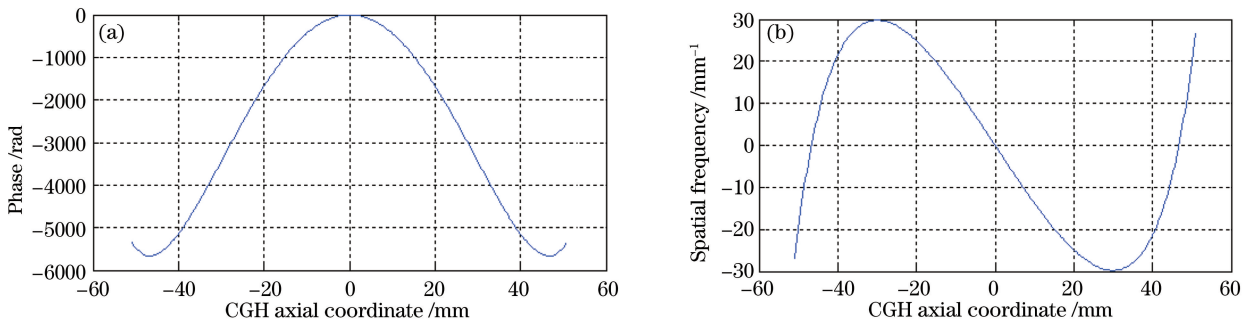


图 6 $d_2 = 290$ mm 时 CGH 的(a)相位与(b)空间频率

Fig. 6 (a) Phase and (b) spatial frequency of CGH when $d_2 = 290$ mm

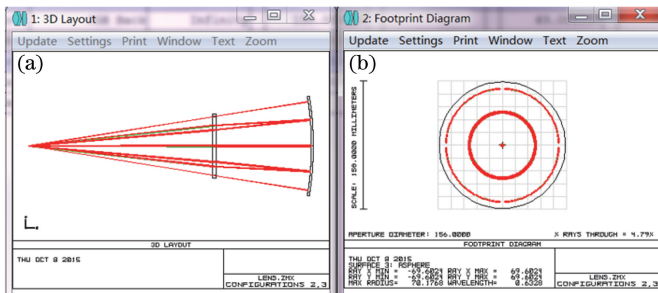


图 7 $(+3, -1)$ 与 $(-1, +3)$ 级衍射光造成的干扰。(a)光路图; (b)在非球面上的光线投影

Fig. 7 Interference of $(+3, -1)$ and $(-1, +3)$ orders diffraction rays.

(a) Light path diagram; (b) light projection diagram on asphere

通过减小 d_2 , 可以增加 CGH 的离焦载频, 从而实现不同衍射级次光线的分离。对于不同的 d_2 , $(+3, -1)$ 与 $(-1, +3)$ 级透射衍射光的鬼像如图 8 所示, 反射衍射光的鬼像如图 9 所示。结合图 8 与图 9 可以看出, 当 d_2 减小时, 衍射鬼像环在非球面上的光线投影逐步变大, 直至扩张到非球面的通光口径之外, 此时 CGH 的相位与空间频率如图 10 所示。通过对比图 6 与图 10 可以看出, 由于增加了空间载频, CGH 刻线变得密集了很多。因此, 在增加空间载频时, 只要可以避免非工作衍射级次干扰即可, 不要过量增加载频。对于当前的非球面, 即 $d_2 = 162$ mm 时, 恰好可以避免透射衍射光和反射衍射光的干扰, 此为最优选择参数。

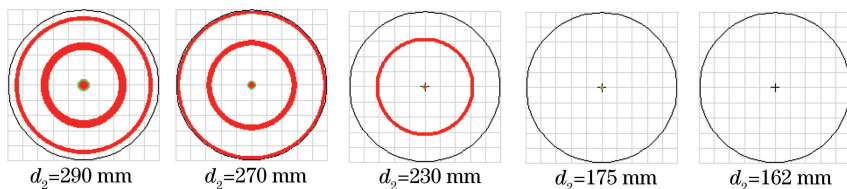


图 8 d_2 不同时 $(+3, -1)$ 和 $(-1, +3)$ 级衍射光的干扰

Fig. 8 Disturbance of $(+3, -1)$ and $(-1, +3)$ orders diffraction rays with different d_2

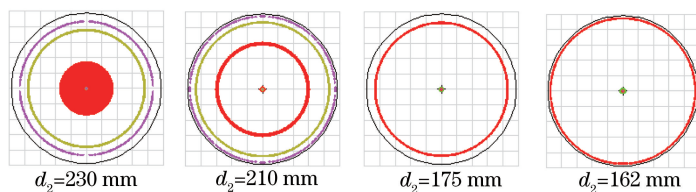


图 9 d_2 不同时反射衍射光的干扰

Fig. 9 Disturbance of reflection and diffraction rays with different d_2

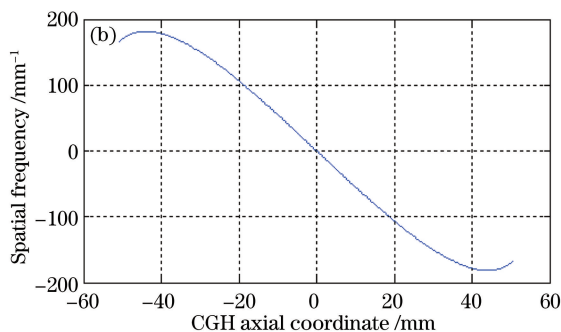
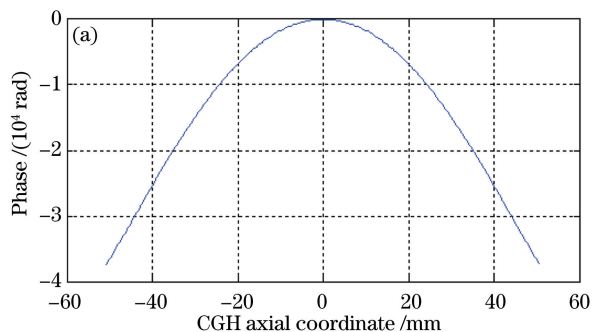


图 10 $d_2 = 162$ mm 时 CGH 的 (a) 相位与 (b) 空间频率

Fig. 10 (a) Phase and (b) spatial frequency of the CGH when $d_2 = 162$ mm

4 实验验证

针对表 1 中的非球面, 利用上述设计方法, 选择 $d_1 = 150$ mm, $d_2 = 162$ mm, 设计制作的 CGH 如图 11 (a) 所示。CGH 的刻蚀区分为两个部分, 中心区域用于零位补偿, 外围辅助调整区用于 CGH 的自准直调

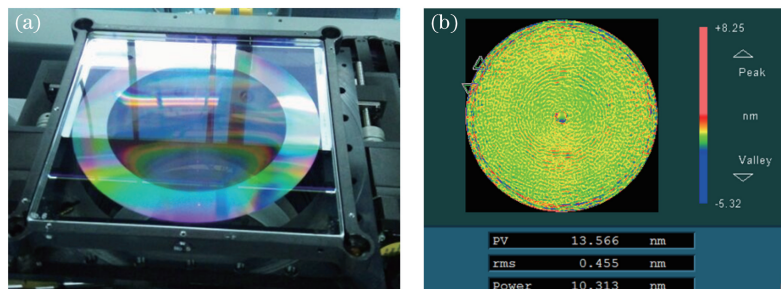


图 11 (a) CGH 的实物图; (b) 用 CGH 对非球面的检测结果

Fig. 11 (a) Physical image of the CGH; (b) asphere testing result detected by CGH

整。为了避免反射光的干扰,基底上表面镀 632.8 nm 波长的增透膜,下表面刻蚀零位补偿 CGH 和辅助调整 CGH(零位补偿区范围 $0 < r < 50$ mm,辅助调节区范围 $50 \text{ mm} < r < 70$ mm)。用此 CGH 对非球面进行检测,并将检测结果反馈给离子束精修设备进行面形精修^[21];经过多轮加工检测迭代,最终非球面的检测结果如图 11(b)所示,非球面的收敛精度的均方根(RMS)达到了 0.46 nm。

5 结 论

针对高 NA 投影光刻物镜中的一偶次高次非球面,首先论述了 CGH 相位与空间频率的关系,以及相位与空间频率的计算方法;然后采用点光源照明模式,详细分析了 CGH 设计时关键参数的选择方法和避免 CGH 非工作衍射级次的干扰的方法;最后采用所选定的设计参数,加工制作了 CGH,并用此 CGH 完成了对非球面的高精度检测。经过多轮加工检测迭代,最终非球面的收敛精度 RMS 达到了 0.46 nm。

参 考 文 献

- 1 Matsuyama T, Ohmura Y, Williamson D M. The lithographic lens: its history and evolution[C]. SPIE, 2006, 6154: 24-37.
- 2 Webb J E, Benley J, Michaloski P F, *et al.* Optical design forms for DUV and EUV microlithographic processes[C]. SPIE, 2001, 4346: 566-567.
- 3 Webb J E, Denes L. Immersion lithography objectives[C]. SPIE, 2004, 5377: 788-797.
- 4 Burge J H. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics[C]. SPIE, 1995, 2576: 258-269.
- 5 Tiziani H J, Reichelt S, Pruss S, *et al.* Testing of aspheric surfaces[C]. SPIE, 2001, 4440: 109-119.
- 6 Küchel M F. Interferometric measurement of rotationally symmetric aspheric surfaces[C]. SPIE, 2009, 7389: 738916.
- 7 Murphy P, Fleig J, Forbes G, *et al.* Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres[C]. SPIE, 2006, 6293: 62930J.
- 8 Malacara D. Optical shop testing[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- 9 Offner A. A null corrector for paraboloidal mirrors[J]. Applied Optics, 1963, 2(2): 153-155.
- 10 Kim Y S, Kim B Y, Lee Y W. Design of null lenses for testing of elliptical surfaces[J]. Applied Optics, 2001, 40(19): 3215-3219.
- 11 Zhu Deyan, Zhang Xuejun. Design of high-precision phase computer-generated hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0712002.
朱德燕, 张学军. 高精度位相型计算全息图的设计[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0712002.
- 12 Gao Songtao, Wu Dongcheng, Peng Shijun, *et al.* Self-compensating effect analysis in testing asphere with computer-generated hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1112002.
高松涛, 武东城, 彭石军, 等. 用计算全息图检测非球面时的自补偿效应分析[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1112002.
- 13 Gao Songtao, Sui Yongxin, Yang Huaijiang. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612003.
高松涛, 隋永新, 杨怀江. 用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612003.
- 14 Li Ming, Luo Xiao, Xue Donglin, *et al.* Design of CGH for testing large off-axis asphere by considering mapping distortion[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1246-1253.
李明, 罗霄, 薛东林, 等. 考虑投影畸变设计大口径离轴非球面检测用计算全息图[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1246-1253.
- 15 Gao Songtao, Wang Gaowen, Zhang Jian, *et al.* The distortion correction of asphere testing with computer-generated hologram[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(8): 1929-1935.
高松涛, 王高文, 张健, 等. 用计算全息图校正非球面的畸变[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 1929-1935.
- 16 Huang Ya, Ma Jun, Zhu Rihong, *et al.* Investigation of measurement uncertainty of optical freeform surface based on computer-generated hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1112007.
黄亚, 马俊, 朱日宏, 等. 基于计算全息的光学自由曲面测量不确定度分析[J]. 光学学报, 2015, 35(11):

1112007.

- 17 ZEMAX Optical Design Program User's Guide[Z]. 2009.
 - 18 Zhou P. Error analysis and data reduction for interferometric surface measurements [D]. Tucson: the University of Arizona, 2009.
 - 19 Jing X F, Jin Y X. Transmittance analysis of diffraction phase grating[J]. Applied Optics, 2011, 50(9): C11-C18.
 - 20 Zhou P, Burge J H. Fabrication error analysis and experimental demonstration for computer-generated holograms [J]. Applied Optics, 2007, 46(5): 657-663.
 - 21 Wu Jianfen, Lu Zhenwu, Zhang Hongxin, *et al.* Mode of ion beam figuring in aspheric optics and its error control [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2678-2683.
- 武建芬, 卢振武, 张红鑫, 等. 光学非球面离子束加工模型及误差控制 [J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2678-2683.