

计算全息图案位置误差致波前误差的标定方法

张海涛^{1,2,3}, 徐乐², 谢常青^{1,3*}¹中国科学院微电子研究所微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029;²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, 吉林 长春 130033;³中国科学院大学集成电路学院, 北京 100049

摘要 通过对计算全息图检测非球面的误差进行分析,提出了一种用于计算全息图检测非球面过程中图案位置误差引入的波前误差的标定方法。该方法先设计检测过程中所需要的辅助波前和检测波前在计算全息基板上所对应的相位分布,再通过光场叠加的方式得到复合相位。辅助波前用于计算实际位置与设计位置的偏差,进而计算出位置畸变引起的检测误差,并将其从系统中消除。检测波前用于得到与非球面匹配的波前,进而对非球面面形进行检测,并提出了图案位置误差引入的非球面波前差的计算方法。为评估该方法的可行性,将复合相位所对应的计算全息图导入衍射计算软件中进行仿真,同时得到了平面、球面和非球面各个级次的衍射光斑,证明了该方法的正确性。

关键词 光学设计; 非球面; 复合相位; 计算全息; 图案位置误差; 绝对检测

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221897

1 引言

随着光学技术的发展,对光学系统性能的要求越来越高。光学非球面在各类光学系统中逐步替代传统球面的设计思路成为了革新光学成像的设计理念。光学非球面的检测技术直接制约了光学非球面的加工。为匹配快速迭代的非球面加工向高精度发展的趋势,目前非球面检测技术大体可以分为面形轮廓法^[1]、几何光线法^[2-4]和干涉测量法^[5-10]等。虽然面形轮廓法和几何光线法成本低、检测方法直观,但是检测精度较低,无法满足超高精度的非球面检测需求,故干涉测量法是目前高精度非球面检测的首选方案。干涉测量法可以分为零位检测和非零位检测。剪切干涉法和子孔径拼接法是非零位检测的两种主要方法^[11-13],这两种方法需要较为复杂的算法,虽然通用性较好,但是检测精度受到算法对数据处理结果的影响。因此,超高精度检测通常采用零位补偿检测。

零位补偿中计算全息图(CGH)检测因其灵活性和极高的极限检测精度受到了极大的关注,并被应用于各种场景中^[14-17]。从20世纪70年代开始Wyant等就提出了计算全息技术。2007年,Zhou等^[18]对CGH检测非球面引入的误差进行了较为全面的分析。2013年,高松涛等^[14]对误差进行标定后得到了0.48 nm(均方根,RMS)的超高精度。为了降低基板制造、相位加

工和检测过程中的误差,Reichelt等^[19]提出了Twin-CGH绝对检测方法。

CGH的设计制造步骤为:确定参考光的类型(如平面波、球面波),再根据非球面方程确定CGH上相位的图案;通过激光直写或者电子束光刻的方式将相位图加工到CGH基板上得到全息图^[20-22]。基于CGH的非球面检测系统包含三个模块,即菲佐干涉仪(包括标准镜头)、CGH和待测非球面,其中计算全息的制作误差对检测精度的影响是最大的。由制作CGH的过程可知,刻蚀在平面基底上的CGH在制作过程中引入的误差可以分为三类,即基底误差、图案加工误差和成像误差:基底误差包括基底面形误差、楔角误差和不均匀性误差等;图案加工误差包括图案误差、占空比误差、刻蚀深度误差和振幅误差等;成像误差主要为成像位置映射误差^[23],在用检测数据指导加工时需仔细考虑这一误差。基底误差可以标定并在数据处理时给与补偿。成像误差可以通过成像畸变矫正手段来进行矫正。图案加工误差尤其是图案位置不准确带来的误差尚无直接标定手段,该误差大小约为亚纳米量级,故若可以消除该误差的影响,则理论上检测误差可以优于0.1 nm(RMS)。为消除图案位置误差的影响,本文提出了一种同时产生辅助波前和检测波前的复合相位CGH的设计方法。

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-12-02; 录用日期: 2023-01-12; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 应用光学国家重点实验室开放基金(SKLAO2021001A05)

通信作者: *xiechangqing@ime.ac.cn

2 图案位置误差分析

图案位置误差是由 CGH 制作设备的定位误差导致制作出的 CGH 上实际条纹位置偏离理想位置引起的。图案位置影响到所有非零衍射级次的出射波前,如图 1 所示。

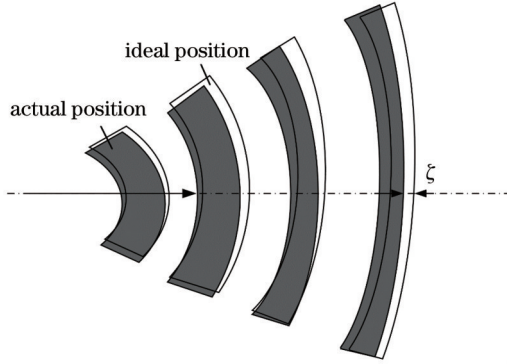


图 1 图案位置误差图

Fig. 1 Diagram of pattern place error

由图案位置误差导致的波像差为

$$W_{PD} = -m\lambda\zeta(x, y)v(x, y), \quad (1)$$

式中: m 为衍射级次; λ 为检测波长; $\zeta(x, y)$ 为图案扭曲方向向量; $v(x, y)$ 为空间频率向量。

因为在垂直于波矢方向上的分量不会将其误差引入检测结果,故只需要考虑波矢传播方向上的误差,可简化为

$$W_{PD} = -m\lambda\zeta_N(x, y)v_N(x, y), \quad (2)$$

式中: $\zeta_N(x, y)$ 为图案沿法线方向上的扭曲; $v_N(x, y)$ 为法线方向上的空间频率。

因此,标定该误差至少需要两个正交的波前,并且该波前的偏差是可以通过其他方法得到的。本文设计了同时出射多个波前的 CGH,分别为沿 X 方向的平面波前、沿 Y 方向的平面波前、球面波前和非球面波前。 X 方向的平面波前、 Y 方向的平面波前和球面波前为辅助波前,非球面波前为与待测非球面匹配的检测波前。复合相位 CGH 的设计思路为先分别设计出各个波前的相位分布,再将辅助波前与检测波前的相位叠加起来,进而得到复合相位 CGH 的图案。

3 CGH 面相位计算

3.1 平面相位计算

假设入射光在 xz 平面与 CGH 的法向 $(0, 0, -1)$ 存在夹角 θ_2 ,如图 2 所示。CGH 折射率为 n_g ,空气折射率为 n_a ,入射光通过 CGH 第一个面后折射角度为 θ_1 ,通过第二个面衍射后出射角度为 θ_0 ,称该出射光为 X 方向平面波。设 CGH 中 xy 平面上坐标 $(0, 0)$ 点为相位零点,此时入射光在 xy 平面上的光程差分布为 $-n_a x \sin \theta_2$ 。

同理,可以确定出射光程差,当光从第二个面出射后形成的平行光打到平面反射镜上时,所有光的相位差均为 0,即 CGH 形成零位补偿,故可以得到 CGH 上的补偿相位分布为

$$\varphi_x(x, y) + n_a x \sin \theta_2 = \varphi(0, 0) + n_a x \sin \theta_2, \quad (3)$$

式中: $\varphi_x(x, y)$ 为 CGH 面上的相位分布; $\varphi(0, 0)$ 为 CGH 上 $(0, 0)$ 点的相位值。由于相位差为相对量,故可以设 CGH 上 $(0, 0)$ 点的相位为 0,故可以得到

$$\varphi_x(x, y) = n_a x \sin \theta_0 - n_a x \sin \theta_2. \quad (4)$$

折射定律为

$$n_a \sin \theta_0 = n_g \sin \theta_1, \quad (5)$$

光栅方程为

$$n_a \sin \theta_0 - n_g \sin \theta_1 = \frac{M\lambda}{d}, \quad (6)$$

式中: d 为光栅周期; M 为衍射级次。在确定 x 方向 +1 级衍射方向角 θ_0 后通过式 (4)~(6) 确定相位分布 $\varphi_x(x, y)$ 。同理,可以确定 y 方向平面波所对应的相位分布 $\varphi_y(x, y)$ 。

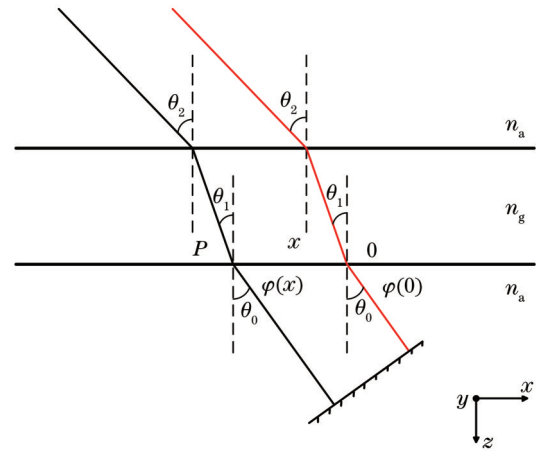


图 2 平面波前光程差示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical path difference of plane wavefront

3.2 非球面相位计算

球面可以理解为二次项系数为 K 和所有高次项均为 0 的非球面,故本文只对非球面进行介绍。如图 3 所示,其上任意不关于光轴对称的点的曲率半径均不相同,故无法像球面一样求出每一点的法向量。因此,采用如下方法进行求解。

假设已知 $P_0(x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0})$, 并且非球面方程为

$$z_{P_0} = f(x_{P_0}, y_{P_0}), \quad (7)$$

则非球面在空间上的曲面可以表示为

$$F(x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0}) = f(x_{P_0}, y_{P_0}) - z_{P_0}, \quad (8)$$

故可以求出点 $P_0(x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0})$ 的法向量

$$F(x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0}) = \nabla F(x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0}). \quad (9)$$

非球面上任意一点 $P_0(x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0})$ 通过旋转矩阵 R_M 旋转后可以得到点 $P_L(x_0, y_0, z_0)$, 满足

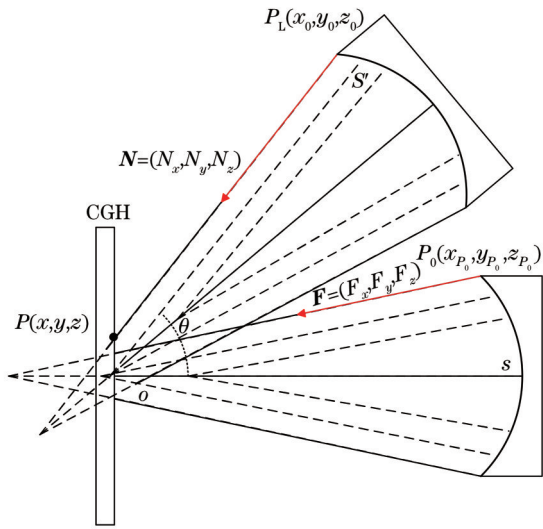


图 3 非球面波前光程差示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optical path difference of aspherical wavefront

$$\begin{bmatrix} x_{P_0} & y_{P_0} & z_{P_0} \end{bmatrix}^T = R_M \cdot \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \end{bmatrix}^T, \quad (10)$$

$P_0(x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0})$ 点的法向量旋转后为

$$N = R_M \cdot F, \quad (11)$$

故在 CGH 上的对应点为

$$\begin{cases} \frac{x' - x_0}{N_x} = \frac{y' - y_0}{N_y} = \frac{z - z_0}{N_z}, \\ z = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

从而求得光程差为

$$\psi(x', y') = n_a L_0 - n_a L_{xy}(x', y') - n_a x' \sin \theta_{20}. \quad (13)$$

此时, 可以求出 $P'(x', y')$ 。 $P'(x', y')$ 在 xy 平面上并非均匀分布。由于计算出的结果为非均匀分布的相位离散点, 故后续与平面和球面进行相位叠加时无法使用。因此, 需要对计算的离散点进行拟合。拟合采用 B 样条曲面拟合。

B 样条曲面拟合的基函数的 deBoox-Cox 递推公

式为

$$B_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k-1} - u_i} B_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k} - u}{u_{i+k} - u_{i+1}} B_{i+1,k-1}(u) = \begin{cases} 1, & u_i < u < u_{i+1} \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (14)$$

通常采用三次均匀 B 样条曲面拟合, 已知的是在 CGH 上的型值点, 故需要反算出控制点。控制点计算方法如下:

1) 保证数据点坐标 $\{Q_{i,j}\}_{n \times m}$ X 方向的 m 组数据向量不变, 对 Y 方向的 n 组数据向量进行反算, 此时增加两个边界条件, 即边界控制点分别等于相邻的其他三个控制顶点所确定的抛物线的平均值和反向延伸直线的平均值;

2) 保证第一次反算得到的 $\{P'_{i,j}\}_{(n+2) \times m}$ Y 方向的 $n+2$ 组数据向量不变, 对 X 方向的 m 组数据向量进行反算, 此时采用与步骤 1) 相同的边界条件;

3) 得到最终的控制点 $\{P_{i,j}\}_{(n+2) \times (m+2)}$

对于均匀三次 B 样条, 其基函数为

$$\begin{cases} B_{1,4}(u) = \frac{1}{6} (1 - 3u + 3u^2 - u^3) \\ B_{2,4}(u) = \frac{1}{6} (4 - 6u^2 + 3u^3) \\ B_{3,4}(u) = \frac{1}{6} (1 + 3u + 3u^2 - 3u^3) \\ B_{4,4}(u) = \frac{1}{6} u^3 \end{cases}, \quad (15)$$

则由控制顶点 $\{P_{i,j}\}_{(n+2) \times (m+2)}$ 构成的均匀双三次 B 样条拟合面为

$$F(u, v) = \frac{1}{36} [1 \ u \ u^2 \ u^3] C_B P C_B^T [1 \ v \ v^2 \ v^3]^T. \quad (16)$$

针对某一反射镜的参数, 可以计算出离散点与 B 样条拟合相位分布, 如图 4(a) 和 4(b) 所示。同时, 可以计算出拟合残差小于 $10^{-8} \mu\text{m}$, 表明该拟合精度满足

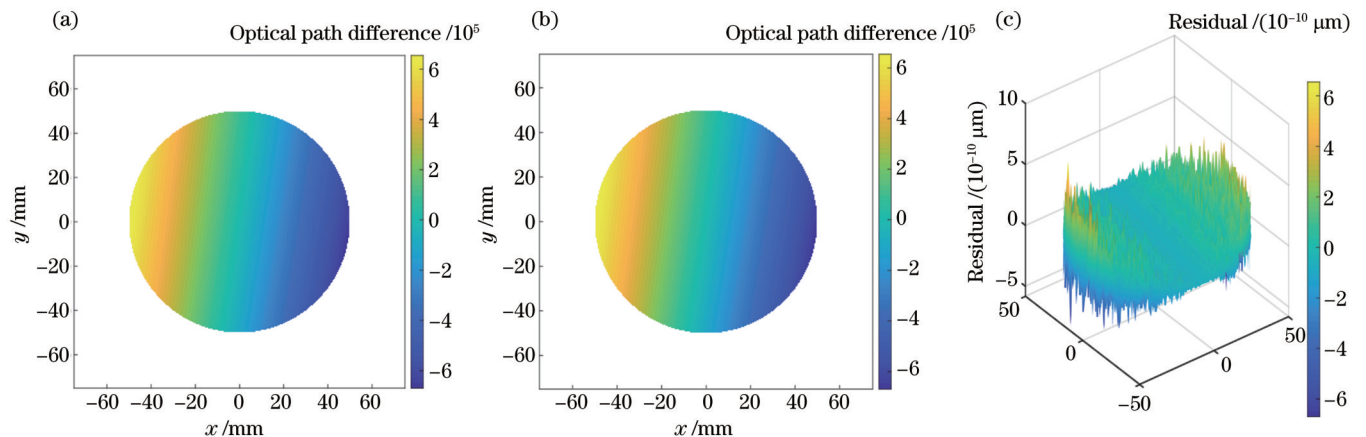


图 4 非球面相位拟合。(a) 非均匀非球面相位; (b) 三次 B 样条拟合相位; (c) 拟合残差分布

Fig. 4 Aspheric phase fitting. (a) Non-uniform aspheric phase; (b) cubic B-spline fitting phase; (c) fitting residual distribution

误差要求,如图 4(c)所示。通过三次 B 样条插值可以求出均匀分布下的相位分布 $P(x, y)$ 和光程差分布 $\psi(x, y)$ 。

4 复合相位叠加

通过第 3 章的方法可以分别计算出任意一个单一波前的相位函数,复合型 CGH 面可以理解为不同 CGH 在同一位置的叠加。以平行光入射为例,平行光通过 CGH 第一个面时产生 0 级和 1 级衍射光,这些衍射光再通过第二个 CGH 面,两个 CGH 面之间的距离为 0。将各个波前所对应的振幅代入方程则可以得到最终的复合相位 CGH。

作假设: x 方向 +1 级平面衍射波前为 $\varphi_{x+1}^p(x, y)$, 所占比例即振幅 a_1 ; y 方向 +1 级平面衍射波前为 $\varphi_{y+1}^p(x, y)$, 所占比例即振幅 a_2 ; +1 级非球面衍射波前 $\varphi_{+1}^{As}(x, y)$, 所占比例即振幅 a_3 。三者满足

$$a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1. \quad (17)$$

两个点 S_1 和 S_2 发出的单色波在空间上点 P 处产生的振动分别为

$$\begin{cases} E_1 = a_1 \exp[i(\alpha_1 - \omega t)] \\ E_2 = a_2 \exp[i(\alpha_2 - \omega t)] \end{cases} \quad (18)$$

合振动可以表示为

$$E = E_1 + E_2 = [a_1 \exp(i\alpha_1) + a_2 \exp(i\alpha_2)] \exp(-i\omega t), \quad (19)$$

式中: α_1 和 α_2 为初始相位; ω 为频率; t 为时间。

假设 $t=0$ 时刻有

$$A \exp(i\alpha) = E_1 + E_2 = a_1 \exp(i\alpha_1) + a_2 \exp(i\alpha_2), \quad (20)$$

由共轭关系可得

$$A^2 = [a_1 \exp(i\alpha_1) + a_2 \exp(i\alpha_2)] \times [a_1 \exp(i\alpha_1) + a_2 \exp(i\alpha_2)]^*, \quad (21)$$

根据欧拉公式

$$\exp(i\varphi) = \cos \varphi + i \sin \varphi, \quad (22)$$

可以确定

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(a_2 - a_1), \quad (23)$$

进而确定相位为

$$\alpha = \arctan \frac{a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_2}{a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2}, \quad (24)$$

式中: α 为合成相位。又因为 $a_2 - a_1$ 为实数域任意数, 而在式(24)中无论相位角如何取值都属于 $\pm\pi$, 故可以将相位角通过 $a_2 - a_1$ 演化到任意实数域中。定义符号函数 $\text{sign}(x)$ 为

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (25)$$

令 $b = (a_2 - a_1) \times 180/\pi$, 则 $b \in (-\infty, \infty)$, 并对 b 中元素进行更改。

当 $b_i = \frac{\pi}{2}(2j+1)$ 时, 令

$$b_i = b_i + \text{sign}(b_i) \times 180, \quad (26)$$

故可以得到角度补偿变化方程

$$\Delta\phi = \text{fix} \left\{ \left[b + \text{sign}(b) \times 90 \right] / 180 \right\} \times 180, \quad (27)$$

式中: $\text{fix}(x)$ 为向下取整函数。根据式(24)可确定实数区间上的相位分布。

5 仿真

为验证该方法的正确性,采用衍射光学计算软件进行物理模型仿真。仿真采用的平面、球面和非球面参数如表 1 所示,其中 R 为非球面顶点球曲率半径, K 为二次项系数, $A_4 \sim A_8$ 为非球面高阶项系数。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Plane	Spherical	Non-spherical
Inclination angle / ($^\circ$)	4	0	0
R / mm		-900	-418.212
K			-1.357×10^{-10}
A_4			-8.954×10^{-16}
A_6			-6.591×10^{-21}
A_8			7.625×10^{-27}

受到计算机和 VirtualLab 对数据量的限制,本文采用口径为 10 mm 的复合相位 CGH 进行仿真。根据前文所述和表 1 的各个参数,可以计算出复合相位 CGH 上的图案,如图 5 所示。

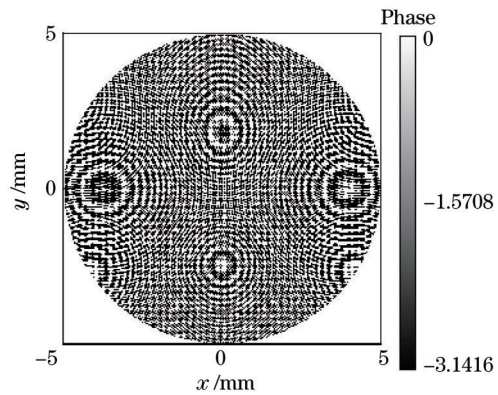


图 5 复合相位 CGH 上的图案

Fig. 5 Pattern on complex phase CGH

由第 4 章可知 +1 级衍射光的衍射效率与其振幅比值有关,为确定其正确性,通过 VirtualLab 进行了定性分析。通过图 6 可以确定当球面、非球面波前振幅增大时衍射光强增强。由此可见,衍射效率与振幅成正比,说明相位叠加方法有效。

6 非球面检测波前误差标定

如图 7 所示,检测过程中的系统误差主要包含干涉仪内误差与标准镜的制造误差 W_{PLAN} 、CGH 基板的刻蚀误差 W_{PD} 和 CGH 的基板误差 W_{PASS} 。在非球面检测波前位置畸变标定前需要准备一个平面,通过同一

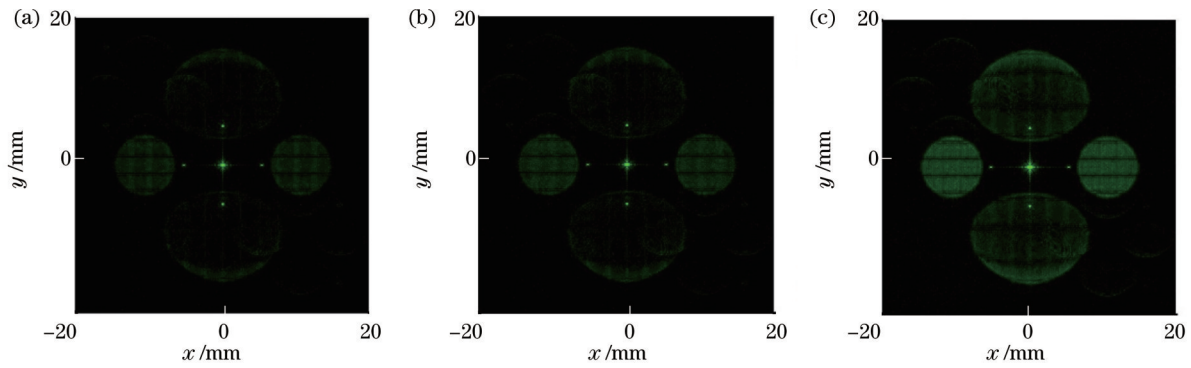


图 6 4 种波前振幅比例所对应的衍射光强分布。(a) 4 种波前振幅比例为 1:1:2.33:2.33; (b) 4 种波前振幅比例为 1:1:3:3; (c) 4 种波前振幅比例为 1:1:8:8

Fig. 6 Diffraction intensity distribution corresponding to amplitude proportion of 4 wavefronts. (a) Amplitude proportion of 4 wavefronts of 1:1:2.33:2.33; (b) amplitude proportion of 4 wavefronts of 1:1:3:3; (c) amplitude proportion of 4 wavefronts of 1:1:8:8

个干涉仪对该平面进行绝对检测^[24], 并得到面形 W_{P0} 。将绝对标定检测的平面放置在复合相位 CGH 的 x 方向平面 +1 级衍射波前 ($W_{PD,x,+1}$) 出射方向上的特定位置, 让反射光再次通过 CGH 和标准镜后再次回到干涉仪, 得到干涉图像 W_1 , 如图 7(a) 所示。 W_1 可以表示为

$$W_1 = W_{PLAN} + W_{pass} + W_{PD,x,+1} + W_{P0} \quad (28)$$

然后, 将平面镜放置在复合相位 CGH 的 x 方向平面 -1 级衍射波前 ($W_{PD,x,-1}$) 出射方向上的特定位置, 得到干涉图像 W_2 , 如图 7(b) 所示。 W_2 可以表示为

$$W_2 = W_{PLAN} + W_{pass} + W_{PD,x,-1} + W_{P0} \quad (29)$$

同理, 可以得到 y 方向的干涉图像 W_3 和 W_4 , 如图 7(c) 和图 7(d) 所示。 W_3 和 W_4 可以表示为

$$W_3 = W_{PLAN} + W_{pass} + W_{PD,y,+1} + W_P, \quad (30)$$

$$W_4 = W_{PLAN} + W_{pass} + W_{PD,y,-1} + W_P, \quad (31)$$

式中: $W_{PD,y,+1}$ 和 $W_{PD,y,-1}$ 为复合相位 CGH y 方向平面 +1 级和 -1 级衍射波前。

以 x 方向为例, ± 1 级衍射光是同一刻蚀条纹衍射出来的, 故 $W_{PD,x,+1} = -W_{PD,x,-1}$, 由式 (29) ~ (31) 可得

$$\begin{cases} W_{PD,x,+1} = \frac{1}{2} (W_1 - W_2) \\ W_{PD,y,+1} = \frac{1}{2} (W_3 - W_4) \end{cases}, \quad (32)$$

根据式 (2) 可以计算出 CGH 刻蚀条纹在 x 方向和 y 方向上图案的形变误差

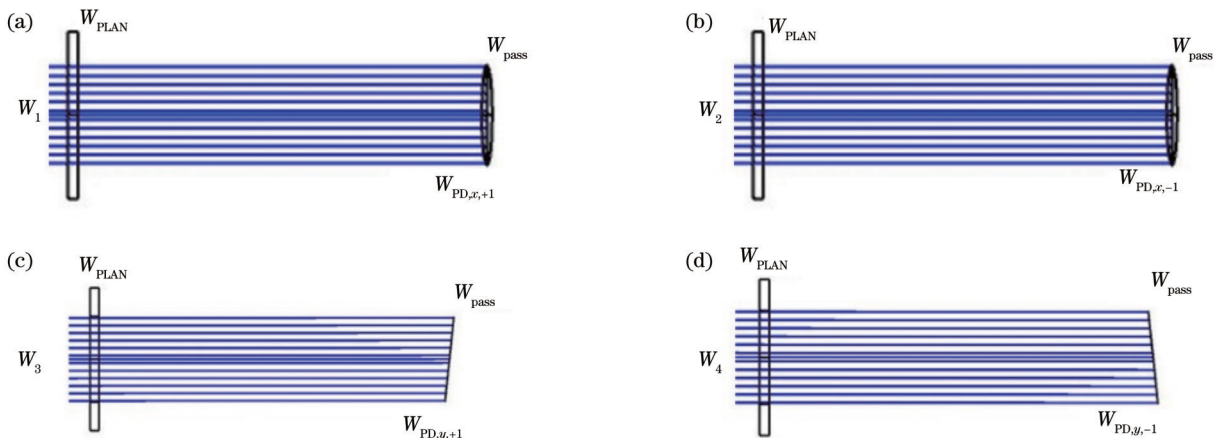


图 7 标定图案位置误差引入的非球面检测波前误差方法。(a) X 方向 +1 级平面波出射方向放置反射镜; (b) X 方向 -1 级平面波出射方向放置反射镜; (c) Y 方向 +1 级平面波出射方向放置反射镜; (d) Y 方向 -1 级平面波出射方向放置反射镜

Fig. 7 Aspheric detection wavefront error method for calibration of pattern place error. (a) Mirror placed in emission direction of +1st plane wave along x direction; (b) mirror placed in emission direction of -1st plane wave along x direction; (c) mirror placed in emission direction of +1st plane wave along y direction; (d) mirror placed in emission direction of -1st plane wave along y direction

$$\begin{cases} \zeta_x = \frac{W_1 - W_2}{2m\nu_x} \\ \zeta_y = \frac{W_3 - W_4}{2m\nu_y} \end{cases} \quad (33)$$

式中： ν_x 和 ν_y 为 x 方向和 y 方向的频率分量。

图案变形矢量可表述为

$$\zeta(x, y) = \zeta_x(x, y)\mathbf{i} + \zeta_y(x, y)\mathbf{j}, \quad (34)$$

式中： \mathbf{i} 和 \mathbf{j} 为 x 方向和 y 方向的单位向量。

根据式(24)可以求出非球面波前在 x 方向和 y 方向上的空间频率 $\mathbf{v}_{AS}(x, y)$,则根据式(2)可以计算出图案位置误差导致的非球面波像差为

$$W_{PDAS} = -m\lambda\zeta(x, y)\mathbf{v}_{AS}(x, y). \quad (35)$$

7 结 论

在光学非球面超高精度检测过程中需要对系统中各种误差进行标定。通常采用的方法为回转对称标定方法,该方法可以将非球面的检测精度提高到 1 nm (RMS)以下,但剩余的回转对称误差无法标定。若检测需求高于这个精度,则该方法将无法实现,其中最明显的是图案位置误差。因此,提出了一种用于标定图案位置误差的复合相位 CGH 检测方法。

首先,计算需要的辅助波前(包括 X 方向和 Y 方向正交的平面波前、球面波前)和检测波前(非球面波前)在 CGH 处对应的相位。然后,通过波前叠加的方式得到 CGH 上应该呈现的连续复合相位。最终,将得到的复合相位图案导入 VirtualLab 中进行仿真,得到设计的各个波前。同时,可以根据各个波前的振幅调制各自出射波前的光强。研究结果证明了复合相位同时出射辅助波前和检测波前的可行性,以及设计方法的正确性。

参 考 文 献

- [1] Yoshizumi K, Murao T, Masui J, et al. Ultrahigh accuracy 3-D profilometer[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(9): 1647-1653.
- [2] Rocktäschel M, Tiziani H J. Limitations of the Shack-Hartmann sensor for testing optical aspherics[J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(8): 631-637.
- [3] D. 马拉卡拉. 光学车间检测[M]. 万勇建, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012: 435-497.
- [4] Malacara D. Optical shop testing[M]. Wan Y J, Transl. Beijing: China Machine Press, 2012: 435-497.
- [5] Pfund J, Lindlein N, Schwider J. Non-null testing of aspherical surfaces by using a Shack-Hartmann Sensor[C]//*Optical Fabrication & Testing 2000*, June 18, 2000, Québec City, Canada. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2000: OTuC5.
- [6] Wyant J C. Optical testing and testing instrumentation[M]. Arizona: University of Arizona, 2008.
- [7] Yatagai T, Kanou T. Aspherical surface testing with shearing interferometer using fringe scanning detection method[J]. *Optical Engineering*, 23(4): 1984: 234357.

- [7] 王月珠,田义,李洪玉,等. 环形孔径拼接干涉检测非球面的建模与实验[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3082-3087.
- [8] Wang Y Z, Tian Y, Li H Y, et al. Modeling and experiment of testing asphere by annular subaperture stitching interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3082-3087.
- [9] He Y W, Hou X, Wu F, et al. Analysis of spurious diffraction orders of computer-generated hologram in symmetric aspheric metrology[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20556-20572.
- [10] Burge J H, Zhao C Y, Dubin M. Measurement of aspheric mirror segments using Fizeau interferometry with CGH correction[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7739: 773902.
- [11] 邱宏伟,金春水,于杰,等. 变步长搜索的计算全息图编码方法[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 368-374.
- [12] Qiu H W, Jin C S, Yu J, et al. CGH encoding with variable step size search[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 368-374.
- [13] Thunen J G, Kwon O Y. Full aperture testing with subaperture test optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 1983, 0351: 19-27.
- [14] Chow W W, Lawrence G N. Method for subaperture testing interferogram reduction[J]. *Optics Letters*, 1983, 8(9): 468-470.
- [15] Stuhlinger T W. Subaperture optical testing: experimental verification[J]. *Proceedings of SPIE*, 1986, 0656: 350-359.
- [16] 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.
- [17] Gao S T, Sui Y X, Yang H J. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612003.
- [18] Sando Y, Satoh K, Barada D, et al. Holographic augmented reality display with conical holographic optical element for wide viewing zone[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 12.
- [19] Blinder D, Birbaum T, Ito T, et al. The state-of-the-art in computer generated holography for 3D display[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(3): 35.
- [20] 张海东,王孝坤,薛栋林,等. 一种针对超大口径凸非球面的面形检测方法[J]. *中国光学*, 2019, 12(5): 1147-1154.
- [21] Zhang H D, Wang X K, Xue D L, et al. Surface testing method for ultra-large convex aspheric surfaces[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1147-1154.
- [22] Zhou P, Burge J H. Fabrication error analysis and experimental demonstration for computer-generated holograms [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(5): 657-663.
- [23] Reichelt S, Tiziani H J. Twin-CGHs for absolute calibration in wavefront testing interferometry[J]. *Optics Communications*, 2003, 220(1/2/3): 23-32.
- [24] Arnold S M. Electron beam fabrication of computer-generated holograms[J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(5): 245803.
- [25] Wyant J C, Bennett V P. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(12): 2833-2839.
- [26] Wyant J C, O'Neill P K. Computer generated hologram; null lens test of aspheric wavefronts[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(12): 2762-2765.
- [27] 冯婕. 基于 CGH 高精度非球面检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2014.
- [28] Feng J. Highly accuracy aspheric surface testing based on computer-generated hologram[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [29] 苗二龙,苏东奇,彭石军. 高精度平面绝对标定[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 051203.
- [30] Miao E L, Su D Q, Peng S J. High precise absolute flat calibration[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 051203.

Calibration Method of Pattern Place Error-Induced Wavefront Distortion with Complex-Phase Computer-Generated Holograms

Zhang Haitao^{1,2,3}, Xu Le², Xie Changqing^{1,3*}

¹Key Laboratory of Microelectronic Devices & Integrated Technology, Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

²State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

³School of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective The pattern place error is one of the main factors that influence the accuracy in the metrology of aspheric surfaces based on computer-generated holograms (CGHs). This error is difficult to calibrate with traditional methods. Hence, a new method for calibrating the wavefront distortion introduced by the pattern place error on the basis of the complex phase is proposed. According to the design and manufacturing process of CGHs, the main errors consist of the substrate error, pattern processing error, and imaging distortion. The substrate error includes the surface figure error, surface wedge angle error, and refractive index inhomogeneity of the substrate material. The pattern processing error includes the pattern place error, duty cycle error, and etching depth error. The imaging distortion mainly affects the mapping error of the imaging place, which should be carefully considered when the measurement data is used to process the surface. Of these errors, the substrate error can be well calibrated and compensated during data processing, and the imaging distortion can be corrected by means of image distortion processing. However, there is no way to calibrate the pattern processing error, especially the error caused by the pattern place error. The wavefront distortion induced by the pattern place error maintains a level around the sub-nanometer. Therefore, if the impact of this error can be eliminated, the measurement accuracy can be better than 0.1 nm (root mean square, RMS) theoretically. To this end, a calibration method using the complex-phase CGH which generates the auxiliary wavefront and test wavefront simultaneously is proposed in this paper.

Methods The CGH which can generate multiple wavefronts simultaneously is designed in this paper. The wavefronts include the plane wavefront along the x direction, the plane wavefront along the y direction, the spherical wavefront, and the aspherical wavefront. The plane wavefront and spherical wavefront are auxiliary wavefronts, and the aspherical wavefront is the test wavefront which can match the aspheric surface to be tested. In this design method, the auxiliary wavefront is designed, which inversely propagates to the CGH surface first, and the test wavefront also inversely propagates to the CGH surface. The complex phase is obtained through the coherent superposition of multi-wavefronts. The auxiliary wavefront is used to calculate the pattern place error which is defined as the deviation between the actual pattern position and the design position, and then calculate the test wavefront error caused by the pattern place error. If the error can be calculated, it can be eliminated from the measurement result. The test wavefront is used to obtain the wavefront which matches the aspheric surface to be tested.

Results and Discussions According to the aspheric surface parameters given in Table 1, a complex-phase CGH is designed to verify the proposed method in this paper, and the calibration process of the system error is described for this CGH. Using the calibration steps shown in Fig. 7, we can determine and calibrate the impact of the CGH's pattern place error-induced wavefront distortion. The calibration method contains four steps. Firstly, measuring the +1 order diffraction wavefront in the x direction. Secondly, measuring the -1 order diffraction wavefront in the x direction. Thirdly, measuring the +1 order diffraction wavefront in the y direction. Fourthly, measuring the -1 order diffraction wavefront in the y direction. Finally, the pattern place error-induced wavefront distortion is calculated through Eqs. (28)–(34).

Conclusions Different kinds of errors need to be calibrated in the process of ultra-high precision testing of optical aspheric surfaces. To calibrate the pattern place error-induced wavefront distortion, this paper uses a complex-phase encoding CGH and proposes a method based on this CGH. In this method, the auxiliary wavefront (including plane wavefront in the orthogonal x and y directions) and the test wavefront (aspherical wavefront) are designed, which inversely propagate to the

CGH surface, and the continuous complex phase on the CGH surface is obtained by coherent superposition of wavefronts. The complex-phase pattern is imported into the diffractive simulation software to calculate the wavefront, and the result shows that each wavefront can be obtained, and the light intensity of each wavefront can be modulated according to the amplitude. The simulation proves the feasibility of this method.

Key words optical design; aspheric surface; complex phase; computer-generated hologram; pattern place error; absolute metrology