

一维相移剪切干涉仪的调制度函数分析

刘志祥^{1,2,3} 邢廷文¹ 蒋亚东² 吕保斌^{1,2,3}

¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

²电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了分析一维相移剪切干涉仪中调制度的变化规律和影响。研究了一维光栅相移剪切干涉仪的基本原理, 推导了干涉光强公式和光强调制度函数。通过将泽尼克单项像差代入到调制度函数因子, 分析了泽尼克像差、剪切比对调制度函数的影响, 发现测量范围主要受到高级球差和大剪切比限制。设计了一维相移剪切干涉仪的可见光实验装置, 在 632.8 nm 波长分别使用周期为 9 μm 、18 μm 一维光栅测量了一个 $NA=0.25$ 显微物镜的波像差, 实验结果表明: 光栅周期为 18 μm 时可以正确测量, 光栅周期为 9 μm 时, 调制度存在反转点, 像差超出测量范围, 并验证调制度函数分析结果的正确性。

关键词 测量; 相移剪切干涉仪; 调制度函数; 波像差

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.111202

Analysis of Modulation Function in the One-Dimensional Phase Shifting Lateral Shearing Interferometry

Liu Zhixiang^{1,2,3} Xing Tingwen¹ Jiang Yadong² Lü Baobin^{1,2,3}

¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

²University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to analyze the variation rule and influence of the modulation in the one-dimensional phase shifting lateral shearing interferometer (PS LSI). The principle of the PS LSI based on one-dimensional Ronchi grating is researched. The inference intensity formula and intensity modulation function are reduced. By substituting the each Zernike aberration into the modulation function factor, the influence due to Zernike aberration and shear ratio are analyzed. The measurement range is mainly limited by the high order spherical aberration and large shear ratio. Finally, an experimental setup is designed to measure the wavefront aberration of a $NA=0.25$ microscope objective at 632.8 nm wavelength, in which using two one-dimensional gratings with 9 μm and 18 μm period respectively. The results show that when grating period is 18 μm , the measurement result is correct; when grating period is 9 μm , the reversed points exist in the modulation, the aberration is beyond the measurement range, and the correctness of the modulation function analysis result is validated.

Key words measurement; phase-shifting lateral shearing interferometer; modulation function; wavefront aberration

OCIS codes 120.3940; 120.3180; 120.5060; 120.5050

1 引言

波像差是评价光刻投影物镜性能的一个重要指标, 直接影响光刻机整机的分辨率、临界尺寸、成像对比度、工艺窗口等。目前 45 nm 节点光刻投影物镜的波像差检测精度需要达到亚纳米量级, 而且要求能够实现在线检测。相位测量干涉法具有检测速度快、精度高、重复性好、易于集成等优点, 可以满足光刻物镜波像

收稿日期: 2015-06-15; 收到修改稿日期: 2015-06-25; 网络出版日期: 2015-09-24

作者简介: 刘志祥(1982—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: liuzx82@126.com

导师简介: 邢廷文(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学系统、光学仪器设计方面的研究。

E-mail: xingtw@ioe.ac.cn

差检测的精度和在线性要求。目前研究的相位测量干涉法主要有:点衍射干涉仪、线衍射干涉仪、哈特曼传感器、横向剪切干涉仪等^[1-4]。光栅横向剪切干涉仪具有共光路干涉、无需参考面、光源相干性要求低、对气流扰动和振动敏感度低、测量范围大等优点,特别适合于大数值孔径物镜和短波[如深紫外线(DUV)、远紫外线(EUV)、X射线]光学系统的波像差检测。

光栅横向剪切干涉仪按照剪切维数可以分为一维剪切干涉仪、二维剪切干涉仪和多维剪切干涉仪。由于朗奇光栅的结构简单、制备容易、易于实现相移,使用一组正交排列的朗奇光栅就可以分别实现两个正交方向的剪切,因此一维光栅相移剪切干涉仪是一种简单有效的波像差测量方法,而且可以为后续研究二维光栅相移剪切干涉仪提供理论和算法基础。

美国桑迪亚国家实验室和贝尔实验室早在20世纪90年代就开始研究使用一维光栅剪切干涉仪测量EUV光刻物镜的波像差,日本尼康公司在2003年开始开展了一维光栅相移剪切干涉技术研究,2005年测量了一个 $NA=0.2$ 的两反射镜EUV光刻物镜,测量精度为 0.81 nm [均方根(RMS)值],重复性为 0.043 nm (RMS值)^[5-8]。美国的劳伦斯伯克利国家实验室和日本尼康公司分别在2000年和2004年开始研究二维剪切干涉技术^[9-10]。国内的中国科学院光电技术研究所、北京理工大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所也开展相关器件、算法和误差分析的研究^[11-15]。

对于一维相移剪切干涉仪的调制度影响和测量范围目前还没有得到过详细分析,本文从一维光栅相移剪切干涉基本原理出发,对干涉光强公式和光强调制度函数进行推导,分析泽尼克像差、剪切比对调制度函数的影响及对测量范围的限制,并设计剪切干涉实验进行验证。

2 一维光栅相移剪切干涉仪

2.1 基本原理

一维光栅相移剪切干涉仪的基本结构如图1所示,主要由照明针孔、被测物镜、剪切光栅和探测器组成。照明针孔放置在被测物镜的物面,剪切光栅位于被测物镜的像面,探测器位于剪切光栅后方。相移剪切干涉仪的基本原理是通过照明针孔衍射产生一个近似理想的球面波,该球面波通过被测物镜后将携带有被测物镜的波像差信息,然后通过一维朗奇光栅将被测波前分解到多个衍射级上,各衍射之间横向错开一定距离,并相互干涉形成剪切干涉图。由于光栅衍射存在多个衍射级,为了提取出一级衍射的剪切干涉信息,采用光栅横向移动对干涉图各点光强进行相移调制,通过特殊设计的相移算法分离出一级衍射信息,从而求解出剪切方向的波前斜率。由于一维光栅只能产生一维衍射,只能得到一维方向的波前斜率,一个完整的二维波前的重构至少需要两个正交方向的波前斜率,因此采用一组正交的一维光栅分别在 X 、 Y 方向进行相移剪切干涉测量。

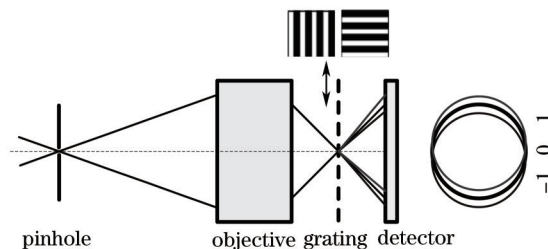


图1 一维光栅相移剪切干涉仪的基本结构

Fig.1 Sketch of phase shifting lateral shearing interferometer based on one-dimensional grating

2.2 干涉光强公式

被测波前经过一维朗奇光栅后被分成零级和多个奇数级衍射波前,各波前相互重叠形成多个剪切区域,为了提取有效的剪切干涉信息,需要对相移过程中不同剪切区域的干涉光强进行分析。

考虑到光栅高级衍射的影响和剪切干涉光强公式的复杂性,这里仅分析存在0级、 ± 1 级和 ± 3 级衍射时的干涉光强公式,假设 m 级衍射的振幅为 A_m , m 级衍射的相移量为 δ_m , X 方向剪切时 m 级衍射的波动公式可以表示为

$$E_m = A_m \cos\{\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r} - \omega_m t + [2\pi \cdot W(x + ms, y) + \delta_m]\}, \quad (1)$$

式中 $W(x+ms, y)$ 为 X 方向 m 级衍射波前, m 级衍射的相移量 $\delta_m = 2\pi m \Delta x / p$ 。

不失一般性, 这里仅给出一维光栅沿 X 方向相移时, 0 级与 ± 1 级、 ± 3 级五光束干涉光强公式:

$$\begin{aligned}
 I = & \left\langle (E_0 + E_{+1} + E_{-1} + E_{+3} + E_{-3}) \cdot (E_0 + E_{+1} + E_{-1} + E_{+3} + E_{-3}) \right\rangle = \\
 & A_0^2 + 2A_1^2 + 2A_3^2 + \\
 & 4A_0A_1 \cos \left\{ 2\pi \cdot \left[\frac{W(x+s, y) + W(x-s, y) - 2W(x, y)}{2} \right] \right\} \cos \left\{ 2\pi \cdot \left[\frac{W(x+s, y) - W(x-s, y)}{2} \right] + \delta \right\} + \\
 & 2A_1^2 \cos \left\{ 2\pi \cdot [W(x+s, y) - W(x-s, y)] + 2\delta \right\} + 2A_0A_3 \cos \left\{ 2\pi \cdot [W(x+3s, y) - W(x, y)] + 3\delta \right\} + \\
 & 2A_0A_3 \cos \left\{ 2\pi \cdot [W(x, y) - W(x-3s, y)] + 3\delta \right\} + 2A_1A_3 \cos \left\{ 2\pi \cdot [W(x+3s, y) - W(x+s, y)] + 2\delta \right\} + \\
 & 2A_1A_3 \cos \left\{ 2\pi \cdot [W(x+3s, y) - W(x-s, y)] + 4\delta \right\} + 2A_1A_3 \cos \left\{ 2\pi \cdot [W(x+s, y) - W(x-3s, y)] + 4\delta \right\} + \\
 & 2A_1A_3 \cos \left\{ 2\pi \cdot [W(x-s, y) - W(x-3s, y)] + 2\delta \right\} + 2A_3^2 \cos \left\{ 2\pi \cdot [W(x+3s, y) - W(x-3s, y)] + 6\delta \right\}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中存在唯一的相移频率为 1 的一阶项, 以及多个相移频率的高阶项。使用相同方法推导 X 方向剪切的其它 0 级与 ± 1 级干涉区域(三光束、四光束干涉)的光强公式, 都存在相同的相移频率一阶项, 因此, X 方向剪切的求解项为 $W(x+s, y) - W(x-s, y)$ 。同理, Y 方向剪切的求解项为 $W(x, y+s) - W(x, y-s)$ 。

2.3 相移算法及干涉图处理算法

由于光栅存在多级衍射, 相移剪切干涉仪的光强公式中除了待求解的相移频率一阶项, 还存在高阶干扰项, 需要选择合适的相移算法或者滤波算法提取出有效的一级衍射信息。

通过分析各类相移算法, 选择对相移频率高阶项不太敏感的最小二乘相移算法, 其相位求解公式为^[16]

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[\frac{-\sum I_i \sin(\delta_i)}{\sum I_i \cos(\delta_i)} \right], \quad \delta_i = (i-1) \cdot 2\pi/N, \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

使用一维相移剪切干涉仪进行测量, 首先选择 X 方向剪切光栅, 沿 X 方向相移并采集一系列剪切干涉图, 然后根据相移算法进行相位求解, 再使用相位解包算法得到 X 方向的波前斜率。同理, 选择 Y 方向剪切光栅进行相移得到 Y 方向的波前斜率。

得到两个正交方向的波前斜率后, 选择差分泽尼克多项式拟合法进行波前重构。将被测波前斜率用差分泽尼克多项式的线性组合表示, 其关系式为

$$\Delta \mathbf{W} = \Delta \mathbf{Z} \times \mathbf{c}, \quad (4)$$

式中 $\Delta \mathbf{W} = \begin{pmatrix} \Delta W_x \\ \Delta W_y \end{pmatrix}$, $\Delta \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \Delta Z_x \\ \Delta Z_y \end{pmatrix}$, ΔW_x 、 ΔW_y 分别为 X 、 Y 方向的波前斜率, ΔZ_x 、 ΔZ_y 为 X 、 Y 方向的差分泽尼克多项式。

使用最小二乘拟合算法, 计算出被测波前的泽尼克系数:

$$\mathbf{c} = (\Delta \mathbf{Z}^T \Delta \mathbf{Z})^{-1} \Delta \mathbf{Z}^T \Delta \mathbf{W}. \quad (5)$$

3 调制度函数分析

从干涉光强公式(2)式可以看到, 待求解项还受到一个 \cos 函数的调制, X 、 Y 方向剪切的光强调制度函数分别为

$$M_x(x, y) = 4A_0A_1 \cos \left\{ 2\pi \cdot \left[\frac{W(x+s, y) + W(x-s, y) - 2W(x, y)}{2} \right] \right\}, \quad (6)$$

$$M_y(x, y) = 4A_0A_1 \cos \left\{ 2\pi \cdot \left[\frac{W(x, y+s) + W(x, y-s) - 2W(x, y)}{2} \right] \right\}. \quad (7)$$

干涉图上各点的调制系数与被测波前和剪切量有关, 并且在相移过程中保持恒定。如果在干涉图上某些点调制度发生反转, 会造成干涉条纹亮暗的反转, 进行相位求解时导致相位跳变, 最终导致测量结果错误。因此为了得到正确的测量结果, 还需要对光强调制度函数进行分析。

定义X、Y方向剪切的调制函数因子 mz_x 、 mz_y 分别为

$$mz_x(x,y) = \frac{W(x+s,y) + W(x-s,y) - 2W(x,y)}{2}, \tag{8}$$

$$mz_y(x,y) = \frac{W(x,y+s) + W(x,y-s) - 2W(x,y)}{2}. \tag{9}$$

为了防止干涉条纹亮暗的反转,要求调制函数在0级与±1级干涉区域上所有点不变号,如果调制函数恒为正,则要求调制函数因子的绝对值在整个剪切区域内小于0.25,这就对剪切干涉仪本身的测量范围提出了限制。

下面通过调制函数因子分析泽尼克单项像差的影响及测量范围,将泽尼克单项像差的表达式逐个代入调制函数因子,可以得到各泽尼克单项像差的调制函数因子。表1列出部分泽尼克像差的调制函数因子 mz_x 和 mz_y , s 为归化后的剪切量。

表1 不同剪切方向上泽尼克像差的调制函数因子

Table 1 Modulation function factor of Zernike aberration in different shearing directions

n	m	$mz_x(x,y)$	$mz_y(x,y)$
0	0	0	0
1	1	0	0
1	-1	0	0
2	0	$2s^2$	$2s^2$
2	2	s^2	$-s^2$
2	-2	0	0
3	1	$9s^2x$	$3s^2x$
3	-1	$3s^2y$	$9s^2y$
4	0	$6s^4+36s^2x^2+12s^2y^2-6s^2$	$6s^4+12s^2x^2+36s^2y^2-6s^2$
3	3	$3s^2x$	$-3s^2x$
3	-3	$3s^2y$	$-3s^2y$
4	2	$4s^4+24s^2x^2-3s^2$	$-4s^4-24s^2x^2y^2+3s^2$
4	-2	$24s^2xy$	$24s^2xy$
5	1	$50s^4x+100s^2x^3+60s^2xy^2-36s^2x$	$10s^4x+20s^2x^3+60s^2xy^2-12s^2x$
5	-1	$10s^4y+60s^2x^2y+20s^2y^3-12s^2y$	$50s^4y+60s^2x^2y+100s^2y^3-36s^2y$
6	0	$20s^6+300s^4x^2+60s^4y^2-30s^4+300s^2x^4+360s^2x^2y^2-360s^2y^2+12s^2$	$20s^6+60s^4x^2+300s^4y^2-30s^4+60s^2x^4+360s^2x^2y^2-360s^2y^2+12s^2$

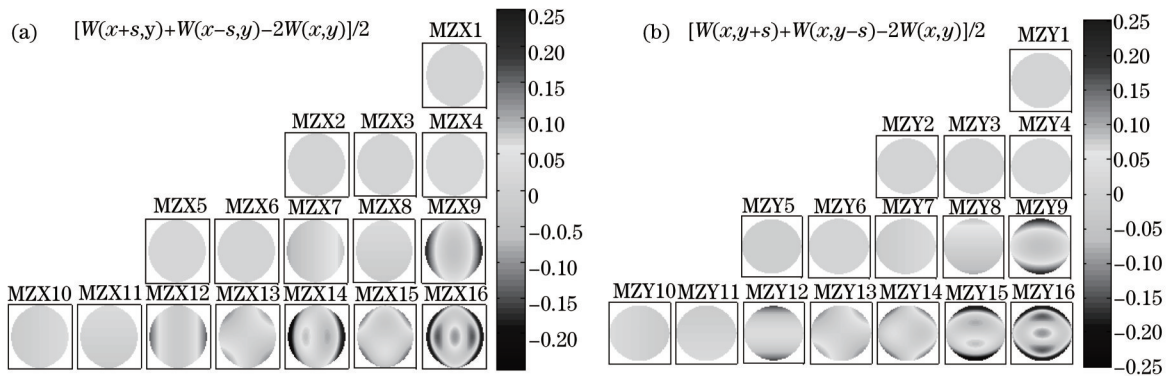


图2 归化剪切量为0.1时,泽尼克单项像差的调制函数因子。(a) X方向剪切时的调制函数因子; (b) Y方向剪切时的调制函数因子

Fig.2 When normalized shear amount is 0.1, the modulation function factor of Zernike aberration.

(a) Modulation function factor when X shearing; (b) modulation function factor when Y shearing

将归化后的剪切量 $s=0.1$ (即剪切比为0.05)代入表1的公式,计算出前16项的调制函数因子,如图2所示,可以看出:泽尼克像差的级数越高对调制函数因子影响越大,相同像差级数时,球差影响最大、其次为彗差。

如果要求调制函数因子的绝对值在整个剪切区域小于0.25,可以得到不同剪切比时各项泽尼克像差的测量范围,表2列出前16项泽尼克像差的测量范围。

表2 不同剪切比时,泽尼克像差的测量范围

Table 2 Measurement range of Zernike aberration using different shear ratios

s	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7, Z_8	Z_9	Z_{10}, Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	Z_{14}, Z_{15}	Z_{16}
0.04	78.125	156.25	-	18.084	5.747	52.345	8.170	13.875	2.894	1.542
0.1	12.5	25	-	3.086	1.077	8.418	1.517	2.428	0.611	0.384
0.2	3.125	6.25	-	0.868	0.362	2.137	0.499	0.716	0.260	0.239

从表2可以看出,球差的测量范围最小,其次为彗差;剪切比越大,泽尼克像差的测量范围越小。当被测物镜的波像差超出相移剪切干涉仪的测量范围时,可以合理选择大周期光栅,减小剪切比,使剪切区域内的光强调制度保持同号。

4 相移剪切干涉仪的可见光实验

为了验证一维相移剪切干涉仪的原理,设计了一个物镜波像差测量实验装置,在该实验装置上可以验证调制函数分析方法的正确性。实验装置如图3所示,主要由He-Ne激光器、针孔、准直镜、被调显微物镜、二维电动平台、剪切光栅和探测器组成。其中准直镜用于产生平行入射光,显微物镜的NA为0.25,一维朗奇光栅安装在二维电动平台上,剪切光栅通过在1.5 mm厚度的石英掩模板上刻蚀得到,掩模板上镀有200 nm厚铬层,可见光光密度大于OD4,光栅周期为9 μm 和18 μm 。

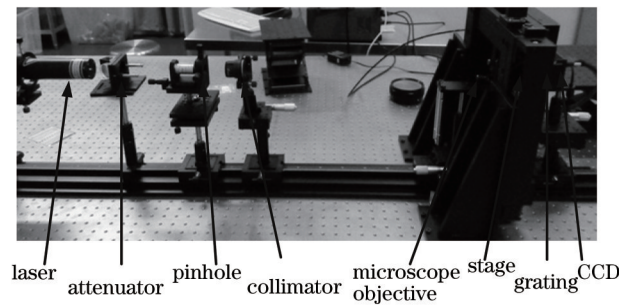


图3 实验装置图

Fig.3 Photograph of the experimental setup

4.1 光栅周期为18 μm 的剪切干涉实验

首先,选择光栅周期为18 μm 的X方向一维光栅,此时剪切比为0.07,调整该实验装置使探测器上得到

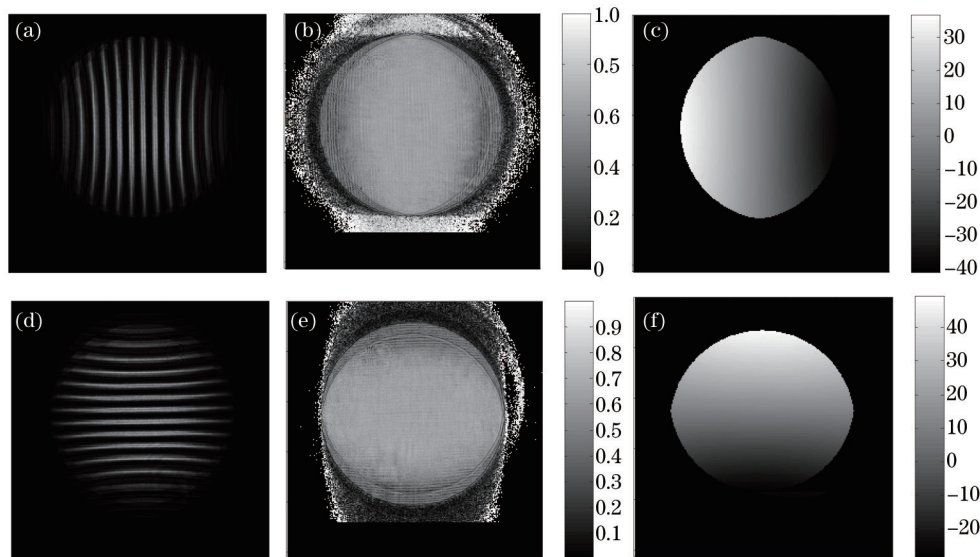


图4 光栅周期为18 μm 时,剪切干涉图的处理结果。(a) X方向剪切干涉图;(b) X方向剪切时的调制度;(c) X方向的波前斜率;(d) Y方向剪切干涉图;(e) Y方向剪切时的调制度;(f) Y方向的波前斜率

Fig.4 Processed result of shearing interferogram when grating period is 18 μm . (a) Shearing interferogram in X direction; (b) modulation in X direction; (c) wavefront slope in X direction; (d) shearing interferogram in Y direction; (e) modulation in Y direction; (f) wavefront slope in Y direction

清晰的干涉图;控制电动平台在光栅平面沿 X 方向进行相移,采集相移剪切干涉图;根据剪切干涉图计算干涉图的调制度,确定 ± 1 级剪切区域;使用相移算法和相位解包算法求解 X 方向的波前斜率(如图4所示)。然后,选择光栅周期为 $18\ \mu\text{m}$ 的 Y 方向一维光栅,使用同样方法得到 Y 方向的剪切干涉图、调制度和波前斜率。

通过计算的调制度可以看出:当使用 $18\ \mu\text{m}$ 光栅时,在剪切干涉区域内不存在调制度反转点。使用差分泽尼克多项式进行重构,去除 $Z_1\sim Z_4$ 项后,重构出被测显微物镜波像差的峰谷(PV)值为 $0.772\ \lambda$,RMS值为 $0.172\ \lambda$ (如图5所示)。

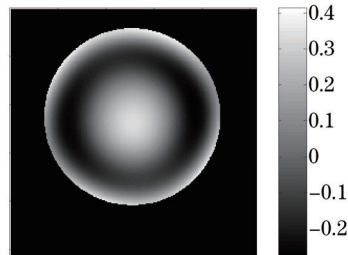


图5 光栅周期为 $18\ \mu\text{m}$ 时,波前重构结果

Fig.5 Wavefront reconstruction result when grating period is $18\ \mu\text{m}$

4.2 光栅周期为 $9\ \mu\text{m}$ 的剪切干涉实验

控制电动平台将周期为 $9\ \mu\text{m}$ 的一组一维光栅移动到被测物镜焦面附近,调整实验装置使探测器上得到清晰的干涉图。首先,选择光栅周期为 $9\ \mu\text{m}$ 的 X 方向一维光栅,此时剪切比为 0.14 ,采集相移剪切干涉图,计算出 X 方向的调制度和波前斜率(如图6所示)。然后,选择光栅周期为 $9\ \mu\text{m}$ 的 Y 方向一维光栅,得到 Y 方向的剪切干涉图、调制度和波前斜率。

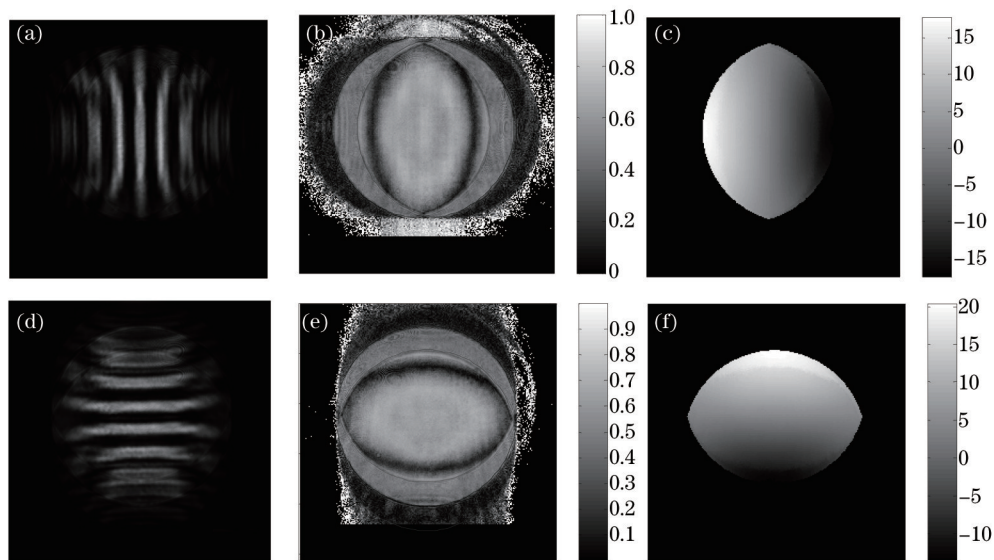


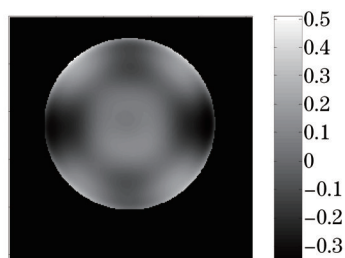
图6 光栅周期为 $9\ \mu\text{m}$ 时,剪切干涉图的处理结果。(a) X 方向剪切干涉图;(b) X 方向剪切时的调制度;(c) X 方向的波前斜率;(d) Y 方向剪切干涉图;(e) Y 方向剪切时的调制度;(f) Y 方向的波前斜率

Fig.6 Processed result of shearing interferogram when grating period is $9\ \mu\text{m}$. (a) Shearing interferogram in X direction; (b) modulation in X direction; (c) wavefront slope in X direction; (d) shearing interferogram in Y direction; (e) modulation in Y direction; (f) wavefront slope in Y direction

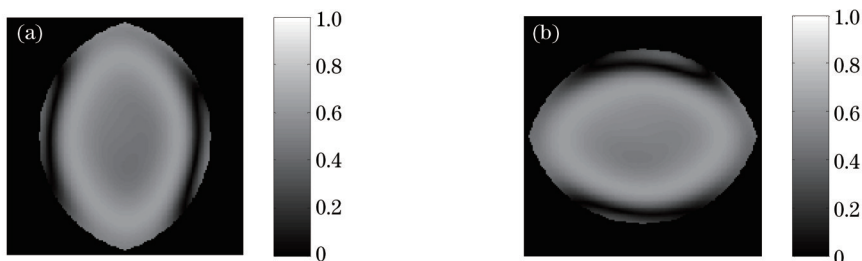
通过计算的调制度可以看出:当使用 $9\ \mu\text{m}$ 光栅时,由于被测物镜像差超出测量范围,在剪切干涉区域内存在调制度为 0 的反转点,进一步求解的波前斜率存在明显的跳变,最终导致波前重构结果错误(如图7所示)。

4.3 调制度函数分析结果确认

通过实验发现,当光栅周期为 $18\ \mu\text{m}$ (剪切比为 0.07)时,一维相移剪切干涉可以准确测量出被测物镜波像差;当光栅周期为 $9\ \mu\text{m}$ (剪切比为 0.14)时,由于存在调制度反转,导致波前斜率求解错误,波像差测量结果不准确。

图7 光栅周期为 $9\ \mu\text{m}$ 时,波前重构结果Fig.7 Wavefront reconstruction result when grating period is $9\ \mu\text{m}$

将光栅周期为 $18\ \mu\text{m}$ 时的波像差测量值代入调制度函数公式,计算出光栅周期为 $9\ \mu\text{m}$ 时剪切干涉区域的光强调制函数,为了方便比较,这里取其绝对值。

图8 光栅周期为 $9\ \mu\text{m}$ 时,调制度函数计算结果。(a) X方向剪切时的调制度;(b) Y方向剪切时的调制度Fig.8 Modulation function calculating result when grating period is $9\ \mu\text{m}$. (a) Modulation in X direction; (b) modulation in Y direction

通过比较调制度实测值和分析公式计算值,两者出现反转点的位置基本一致,验证了调制度函数分析方法的正确性。

5 结 论

通过分析一维光栅相移剪切仪中单项泽尼克像差对调制度函数影响,可以知道:剪切比越大,像差的测量范围越小;同级像差中,球差的测量范围最小;进行波像差测量时需合理选择剪切比,使剪切区域内的光强调制度保持同号。使用光栅周期为 $18\ \mu\text{m}$ 和 $9\ \mu\text{m}$ 的一维光栅对 $NA=0.25$ 的显微物镜波像差进行实际测量,可知:小剪切比时像差测量范围大,可以准确测量出被测物镜波像差;大剪切比时像差测量范围小,被测物镜像差超出测量范围,导致干涉图调制度反转,而且反转点位置与调制度函数分析计算结果基本一致。通过分析和实验证明了一维光栅相移剪切干涉仪调制度函数分析方法的正确性,为后续研究二维相移剪切干涉仪的研制提供了有用的分析方法。

参 考 文 献

- 1 Liu Ke, Li Yanqiu. At-wavelength interferometry of projection optics for extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s2): 257-262.
刘 克, 李艳秋. 极紫外光刻投影物镜波像差在线检测技术[J]. 中国激光, 2009, 36(s2): 257-262.
- 2 K A Goldberg, E Tejnil, Sang Hun Lee, *et al.*. Characterization of an EUV Schwarzschild objective using phase-shifting point diffraction interferometry[C]. SPIE, 1997, 3048: 264-270.
- 3 Y Ohsaki, T Mori, Y Koga, *et al.*. A new on-machine measurement system to measure wavefront aberrations of projection optics with hyper-NA[C]. SPIE, 2006, 6154: 615424.
- 4 T Fujii, J Kougo, Y Mizuno, *et al.*. Portable phase measuring interferometer using Shack-Hartmann method[C]. SPIE, 2003, 5038: 726-732.
- 5 A K Ray-Chaudhuri, K D Krenz, R P Nissen, *et al.*. Initial results from an extreme ultraviolet interferometer operating with a compact laser plasma source[J]. J Vac Sci Technol B, 1996, 14(6): 3964-3968.
- 6 A A MacDowell, O R Wood, J E Bjorkholm. Interferometric testing of EUV lithography cameras[C]. SPIE, 1997, 3152: 202-210.

- 7 K Murakami, J Saito, K Ota, *et al.*. Development of an experimental EUV interferometer for benchmarking several EUV wavefront metrology schemes[C]. SPIE, 2003, 5037: 257-264.
- 8 K Sugisaki, M Okada, Z Yucong, *et al.*. Comparisons between EUV at-wavelength metrological methods[C]. SPIE, 2005, 5921: 59210D.
- 9 P P Naulleau, K A Goldberg, J Bokor. Extreme ultraviolet carrier-frequency shearing interferometry of a lithographic four-mirror optical system[J]. J Vac Sci Technol B, 2000, 18(6): 2939-2943.
- 10 M Hasegawa, C Ouchi, T Hasegawa, *et al.*. Recent progress of EUV wavefront metrology in EUVA[C]. SPIE, 2004, 5533: 27-36.
- 11 Zhixiang Liu, Tingwen Xing, Yadong Jiang, *et al.*. Two-dimension lateral shearing interferometry for microscope objective wavefront metrology[C]. SPIE, 2014, 9272: 92721B.
- 12 Hai Wang, Yanqiu Li, Ke Liu. Approach to characterize manufacture tolerances of two-dimensional cross-phase grating [J]. Opt Eng, 2013, 52(10): 104101.
- 13 He Xu, Xiang Yang. Phase-shifting technology of digital lateral shearing interferometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(9): 2245-2251.
何 煦, 向 阳. 数字横向剪切干涉仪相移技术[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(9): 2245-2251.
- 14 Fang Chao, Xiang Yang. A thirteen-step phase restoration algorithm in lateral shearing interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508003.
方 超, 向 阳. 十三步光栅横向剪切干涉相位复原算法[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508003.
- 15 Li Jie, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.*. System errors analysis of grating lateral shearing interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508006.
李 杰, 唐 锋, 王向朝, 等. 光栅横向剪切干涉仪及其系统误差分析[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508006.
- 16 D Malacara. Optical Shop Testing[M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons Press, 2007: 122-126.

栏目编辑: 何卓铭