

# 十三步光栅横向剪切干涉相位复原算法

方 超 向 阳

(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)

**摘要** 光栅横向剪切干涉仪能够实现超高精度检测光学系统的波像差,是当前光刻镜头研发的重要组成内容之一。零级串扰和相移误差是影响光栅剪切干涉仪检测精度的两个主要因素,为此,提出了一种十三步光栅剪切干涉相位复原算法,在消除零级串扰的同时,还能够极大地降低对相移误差的苛刻要求。分析表明,当相移误差不大于 $25^\circ$ 时,相位复原误差小于 $0.01^\circ$ (即 $2.8 \times 10^{-5} \lambda$ )。对于 $\lambda = 193.386 \text{ nm}$ ,相位复原误差小于 $0.005 \text{ nm}$ 。因此,通过系统误差校正,光栅剪切干涉仪检测光刻镜头系统波像差的精度能够达到亚纳米级。

**关键词** 测量;横向剪切干涉仪;相移算法;相位复原

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0508003

## A Thirteen-Step Phase Restoration Algorithm in Lateral Shearing Interferometry

Fang Chao Xiang Yang

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

**Abstract** Lateral shearing interferometer can achieve ultra-high-precision measurement of the optical system aberration. It is currently an important component content of the projection lens development. Two main factors affecting lateral shearing interferometry measurement accuracy are 0th order effect and phase shift error. Therefore, a thirteen-step phase restoration algorithm in phase shearing interferometry is proposed. It can 0th zeroth order effect and greatly reduce the phase shifting error demanding. Analysis shows that when the phase shift error is not more than  $25^\circ$  the phase restoration error is less than  $0.01^\circ$  ( $2.8 \times 10^{-5} \lambda$ ). For  $\lambda = 193.386 \text{ nm}$ , wavefront restoration error is less than  $0.005 \text{ nm}$ . Thus, by system error correction wavefront measurement of projection lens of phase shearing interferometer can achieve sub-nanometer accuracy.

**Key words** measurement; lateral shearing interferometer; phase shifting algorithm; phase shifting error

**OCIS codes** 120.3180; 120.5050; 050.5080

## 1 引 言

光刻镜头是光刻机的重要核心组件<sup>[1]</sup>。研发光刻镜头,必需得有相应的光刻镜头系统波像差检测(以下简称“波像差检测”)设备。利用波像差检测设备,不仅可以客观地评价光刻镜头的成像质量,而且可以提供光刻镜头精密装调和镜片精修的定量依据。

检测光刻镜头系统波像差的方法主要有光栅剪切干涉法<sup>[2-4]</sup>、Shark-Harmann 法<sup>[5-6]</sup>和点衍射干涉法<sup>[7-8]</sup>。对比研究表明,光栅剪切干涉法具有实

现容易、能够实现亚纳米级超高精度检测等特点,是一种发展潜力大和应用前景广的波像差检测方法。

在光栅剪切干涉检测中,零级衍射光总是会或多或少地到达探测器上,形成零级串扰,此外,移相器加工和装配误差也会在波像差移相过程中产生相移误差。所以,研究抗零级串扰和降低相移误差影响的剪切干涉图位相复原算法,对于研发超高精度光栅剪切干涉仪具有重要的理论意义和应用价值。

国内外所提剪切干涉相位复原算法,多数都没

收稿日期: 2013-09-29; 收到修改稿日期: 2013-12-11

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX02005)

作者简介: 方 超(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: ciompfangchao@126.com

\* 通信联系人。E-mail: xiangy@sklao.ac.cn

有考虑零级串扰的问题<sup>[9-10]</sup>,只有 Zhu 等<sup>[11]</sup>考虑到并提出九步相位复原算法加以解决,但是其算法只适用于零级串扰和相移误差都非常小的情况。

本文根据应用需求,从理论上研究了抗零级串扰的原理和消除相移误差的途径,从而得到了一种兼顾抗零级串扰和大相移误差的十三步相位复原算法。

## 2 十三步位相复原算法

这里采用的波像差光栅剪切干涉检测方案如图 1 所示。

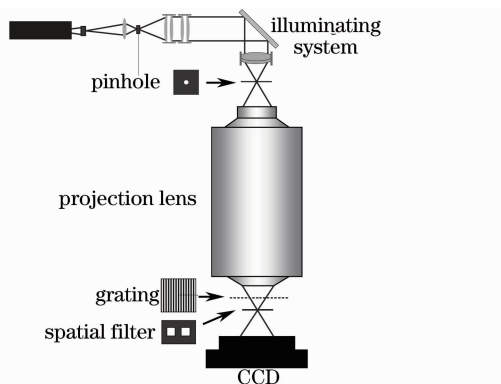


图 1 光栅剪切干涉仪原理图

Fig. 1 Block diagram of grating lateral shearing interferometer

来自激光器的相干光束经照明系统后,会聚在针孔上;会聚相干光束透过针孔,在针孔另一侧形成“理想”球面波;理想球面波经过被测光刻镜头后,成为携带光刻镜头系统波像差的检测光束;光栅将入射的一束检测光束,分解成沿不同方向传播的多束

检测光束;利用空间滤波器,仅使±1级衍射光束通过并进行干涉,形成表征系统波像差的横向剪切干涉图;采用压电陶瓷(PZT)作为微位移驱动器,结合柔性铰链组成移相器<sup>[12]</sup>,在计算机控制下对剪切干涉进行位相调制。

将+1、-1和0级光分别表示为

$$E_1 = a_1 \exp(kW_1), \quad (1)$$

$$E_{-1} = a_{-1} \exp(kW_{-1}), \quad (2)$$

$$E_0 = a_0 \exp(kW_0), \quad (3)$$

式中  $E_1$ 、 $E_{-1}$  和  $E_0$  分别是+1、-1和0级光的复振幅,  $W_1$ 、 $W_{-1}$  和  $W_0$  分别是+1、-1和0级光的波前,  $a_1$ 、 $a_{-1}$  和  $a_0$  分别为+1、-1和0级光的振幅,  $k$  是波数。

在理想情况下,第  $j$  步位相调制剪切干涉图为

$$I_j = a_1^2 + a_{-1}^2 + 2a_1 a_{-1} \cos[k(W_1 - W_{-1}) + \phi_j]. \quad (4)$$

(4)式中相移量  $\phi_j$  为

$$\phi_j = \frac{4\pi x}{p}, \quad (5)$$

式中  $x$  是光栅的位移量,  $p$  是光栅常数。

如图 2 所示,当存在零级串扰<sup>[13]</sup>时,则第  $j$  步

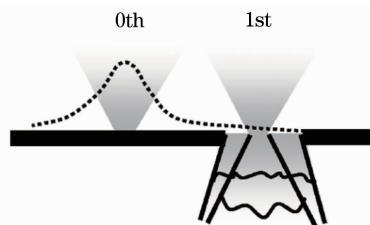


图 2 零级串扰光影响测量示意图

Fig. 2 Measurement is disturbed by 0th order beam 相移干涉图强度  $I_j$  为

$$I_j = a_0^2 + a_1^2 + a_{-1}^2 + 2a_0 a_1 \cos[k(W_1 - W_0) + \phi_j/2] + 2a_0 a_{-1} \cos[k(W_0 - W_{-1}) + \phi_j/2] + 2a_1 a_{-1} \cos[k(W_1 - W_{-1}) + \phi_j], \quad (6)$$

式中  $k(W_1 - W_{-1})$  表示所需复原的相位,记为  $\theta_1$ ,  $k(W_1 - W_0)$  和  $k(W_0 - W_{-1})$  表示所需消除的0级串扰剪切相位,分别记为  $\theta_2$  和  $\theta_3$ 。令  $Q = a_0^2 + a_1^2 + a_{-1}^2$ ,  $V_1 = 2a_1 a_{-1}$ ,  $V_2 = 2a_0 a_1$ ,  $V_3 = 2a_0 a_{-1}$ , 则(6)式可改写为

$$I_j = Q + V_1 \cos(\theta_1 + \phi_j) + V_2 \cos(\theta_2 + \phi_j/2) + V_3 \cos(\theta_3 + \phi_j/2). \quad (7)$$

对于十三步相移,  $j = -6, -5, \dots, 0, \dots, 5, 6$ 。采用的组合规则为

$$32(I_1 - I_{-1}) - 26(I_3 - I_{-3}) + 6(I_5 - I_{-5}) = -128V_1 Q \sin \theta_1, \quad (8)$$

$$31(I_2 + I_{-2}) - 16(I_4 + I_{-4}) + (I_6 + I_{-6}) - 32I_0 = -128V_1 Q \cos \theta_1, \quad (9)$$

结合(8)~(9)式,可得到

$$\theta_1 = \arctan \left[ \frac{32(I_1 - I_{-1}) - 26(I_3 - I_{-3}) + 6(I_5 - I_{-5})}{31(I_2 + I_{-2}) - 16(I_4 + I_{-4}) + (I_6 + I_{-6}) - 32I_0} \right]. \quad (10)$$

由(10)式可见,在不存在相移误差的情况下,复原相位  $\theta_1$  与  $\theta_2$  和  $\theta_3$  无关,即复原相位不受零级串扰

光的影响。

### 3 相移误差分析

这里所提十三步相移算法,每步相移量是相同的,都是 $\pi/2$ 。当考虑到相移误差时,第 $j$ 步相移量 $\phi_j$ 可表示为

$$\phi_j = j \cdot \frac{\pi}{2} + j \cdot \epsilon. \quad (11)$$

对(10)式的分子部分(记为 $A$ )进行泰勒级数展开,略去高阶小量,得

$$A = V_1 \left( -128 + 416\epsilon^2 - \frac{1472}{3}\epsilon^4 + \frac{14092}{45}\epsilon^6 \right) \sin \theta_1 + \frac{V_2}{V_1} [-40\sqrt{2}\epsilon + O(\epsilon^2)] \sin \theta_2 + \frac{V_3}{V_1} [-40\sqrt{2}\epsilon + O(\epsilon^2)] \sin \theta_3. \quad (12)$$

鉴于零级串扰光相对于检测光强是小量( $V_2/V_1$ 和 $V_3/V_1$ 是小量),同时相移误差 $\epsilon$ 是小量,有

$$A = V_1 \left( -128 + 416\epsilon^2 - \frac{1472}{3}\epsilon^4 + \frac{14092}{45}\epsilon^6 \right) \sin \theta_1. \quad (13)$$

同理,对于(10)式的分母部分(记为 $B$ ),有

$$B = V_1 \left( -128 + 416\epsilon^2 - \frac{1472}{3}\epsilon^4 + \frac{14272}{45}\epsilon^6 \right) \cos \theta_1. \quad (14)$$

由(13)式和(14)式可见,在存在相移误差的情况下,所提算法中与零级串扰光相关的剪切相位 $\theta_2$ 和 $\theta_3$ 影响可以忽略,即所提算法可以很好地实现抗零级串扰。

将(13)式和(14)式代入(10)式,得到包含相移误差 $\epsilon$ 的复原相位表达式

$$\tan \beta_1 \approx \left( 1 + \frac{\epsilon^6}{32} \right) \tan \theta_1. \quad (15)$$

十三步算法的相位复原误差函数 $\Delta\theta_1$ 表示为

$$\Delta\theta_1 = \beta_1 - \theta_1 \approx \tan(\beta_1 - \theta_1) = \frac{\epsilon^6}{64} \sin 2\theta_1. \quad (16)$$

而对于九步移相算法,相位复原可表示为<sup>[11]</sup>

$$\theta'_1 = \arctan \left[ \frac{2(I_3 - I_{-3}) - 2(I_1 - I_{-1})}{(I_4 + I_{-4}) - 2(I_2 + I_{-2}) + 2I_0} \right]. \quad (17)$$

同样按照上述分析方法分析(17)式,其包含误差 $\epsilon$

的相位 $\beta'_1$ 复原为

$$\tan \beta'_1 = \left( 1 + \frac{\epsilon^2}{2 - 6\epsilon^2} \right) \tan \theta'_1 = \left( 1 + \frac{\epsilon^2}{2} \right) \tan \theta'_1. \quad (18)$$

九步算法的相位复原误差函数 $\Delta\theta'_1$ 表示为

$$\Delta\theta'_1 = \beta'_1 - \theta'_1 = \tan(\beta'_1 - \theta'_1) = \frac{\epsilon^2}{4} \sin 2\theta'_1. \quad (19)$$

由(16)式可见,相位复原误差与相移误差成6次方的关系,与剪切相位成正弦关系,最大相位复原误差出现在相位角为 $\pm 45^\circ$ 处。根据(16)式,计算分析了相移误差与复原相位误差之间的定量关系曲线,图3是当相移误差分别是 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 和 $25^\circ$ 情况下,相移误差与相位复原误差之间的关系曲线。由图可见,在相移误差不超过 $25^\circ$ 的情况下,相位复原误差在整个周期内小于 $0.01^\circ$ ,对应长度量为 $2.8 \times 10^{-5} \lambda$ 。对于 $\lambda = 193.386 \text{ nm}$ ,波前复原误差小于 $0.005 \text{ nm}$ 。由此可见所提算法对相移误差不敏感,具有很强的适应性。

根据(16)式,计算了剪切相位 $45^\circ$ 处,相移误差与相位复原误差的关系曲线,如图4所示。由图4可见,复原误差以 $y$ 轴为对称轴对称分布,随着相移误差 $\epsilon$ 绝对值的增大而增大。当相移误差在 $\pm 10^\circ$ 以内时,相位复原误差很小,并且变化十分平缓。

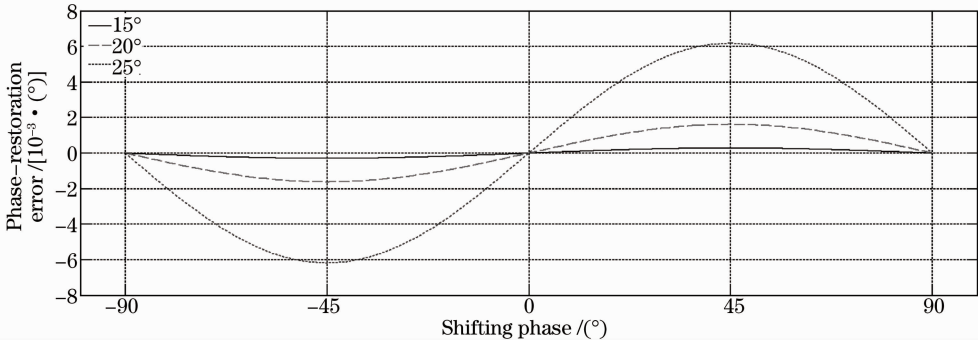


图3 相位复原误差与剪切相位之间的关系

Fig. 3 Relationship between phase-restoration error and shearing phase

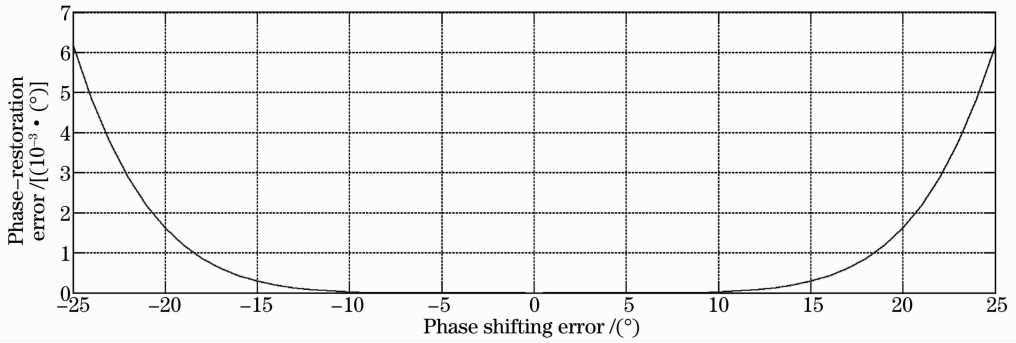


图 4 相位复原误差与相移误差的关系

Fig. 4 Relationship between phase-restoration error and phase shearing error

根据(16)式和(19)式,计算了剪切相位  $45^\circ$ 处, 关系,如图 5 所示。当相移误差在  $\pm 25^\circ$ 以内时,十三步和九步两种算法相移误差与相位复原误差的 十三步算法的复原误差远小于九步算法。

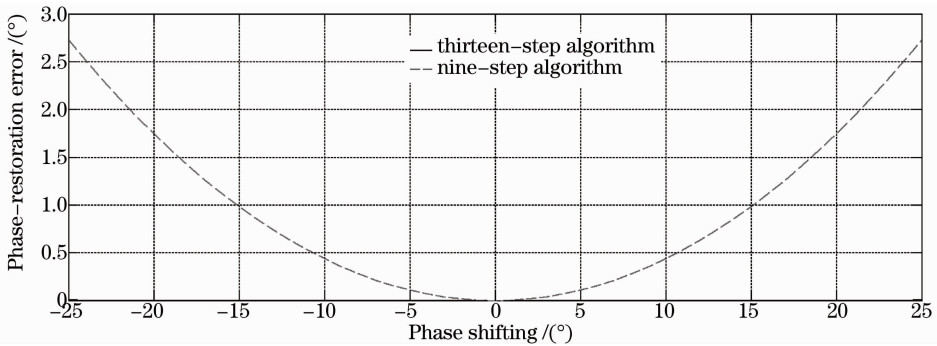


图 5 十三步和九步算法复原误差和相移误差的关系

Fig. 5 Relationship between phase-restoration error and phase shearing error with thirteen-step and nine-step frame algorithms

## 4 结 论

本文针对光栅剪切干涉仪,为了克服零级串扰对复原相位的影响,并降低相移误差对相位复原精度的严重影响,提出了十三步剪切位相复原算法,其复原误差与相移误差的 6 次方成正比,因而能够有效地抑制相移误差的影响,同时还能够克服零级串扰光的影响。计算分析表明:对于相移误差不超过  $25^\circ$ 的情况,相位复原误差在整个  $2\pi$  周期内小于  $0.01^\circ$ ,其对应的长度为  $2.8 \times 10^{-5} \lambda$ 。

### 参 考 文 献

- 1 T Osada, M Godwin. International Technology Roadmap for Semiconductors[OL]. [http://www.itrs.net/links/1999\\_Sumer/DRT799pdf](http://www.itrs.net/links/1999_Sumer/DRT799pdf). [2014-02-21].
- 2 M Takeda, S Kobayashi. Lateral aberration measurements with a digital Talbot interferometer[J]. Appl Opt, 1984, 23(11): 1760-1764.
- 3 M Hasegawa, C Ouchi, T Hasegawa, et al.. Recent progress of EUV wave-front metrology in EUVA[C]. SPIE, 2004, 5533: 27-36.
- 4 H Schreiber, J Schwider. Lateral shearing interferometer based on two Ronchi gratings in series[J]. Appl Opt, 1997, 36(22): 5321-5324.
- 5 J Bueno, E Acosta, C Schwarz, et al.. Wavefront measurements

- of phase plates combining a point-diffraction interferometer and a Hartmann-Shack sensor[J]. Appl Opt, 2010, 49(3): 450-456.
- 6 Yu Yuhua, Dong Wende, Xu Zhihai, et al.. Method for blurred image restoration based on Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0828005.
- 余玉华, 董文德, 徐之海, 等. 基于哈特曼夏克波前传感器的模糊图像复原方法[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0828005.
- 7 C Ouchi, S Katoa, M Hasegawa. EUV wavefront metrology at EUVA[C]. SPIE, 2006, 6152: 61522O.
- 8 Yu Changsong, Xiang Yang. Research progress of pinhole mask technology of point diffraction interferometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030004.
- 于长淞, 向阳. 点衍射干涉仪小孔掩模技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030004.
- 9 P Hariharan, B Oreb, T Eiju. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. Appl Opt, 1987, 26(13): 2504-2506.
- 10 P de Groot. Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window[J]. Appl Opt, 1995, 34(22): 4723-4730.
- 11 Y Zhu, K Sugisakia, C Ouchia, et al.. Lateral shearing interferometer for EUVL: theoretical analysis and experiment[C]. SPIE, 2004, 5374: 824-832.
- 12 K Y Cheng, Y Y Su, Y L Chen, et al.. Fiber optic interferometric sensors for micro-positioning applications[C]. SPIE, 2005, 5852: 921-925.
- 13 Y Zhu, K Sugisaki, M Okada, et al.. Wavefront measurement interferometry at the operational wavelength of extreme-ultraviolet lithography[J]. Appl Opt, 2007, 46(27): 6783-6792.

栏目编辑:何卓铭