

# Ronchi相移剪切干涉仪及其相位提取误差分析

吴飞斌<sup>1,2</sup> 唐 锋<sup>1</sup> 王向朝<sup>1,2</sup> 李 杰<sup>1,2</sup> 李 永<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在分析 Ronchi 相移剪切干涉仪典型系统参数的基础上, 系统研究了该干涉仪相位提取精度的主要影响因素。结合传统的五步相移算法, 采用所提出的八步与十步相移算法, 对 Ronchi 相移剪切干涉仪的相位提取误差进行理论分析和仿真计算。仿真结果说明, 八步和十步相移算法可以有效地消除多级衍射光寄生干涉对相位提取精度的影响, 且十步相移算法比八步相移算法具有更高的相位提取精度; 为了提高测量精度, 要求相移误差优于 2%; 探测器位数大于 10 位; 光栅周期误差小于 1%; 光源空间相干性低于 0.1。通过采用不同的相移算法、剪切率和光源空间相干性的三组对比实验, 对理论分析的正确性进行了验证。

**关键词** 测量; 干涉测量; Ronchi 相移剪切干涉仪; 波像差检测; 相位提取误差; 光刻投影物镜

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0612004

## Phase Retrieval Errors Analysis of Ronchi Phase-Shifting Shearing Interferometer

Wu Feibin<sup>1,2</sup> Tang Feng<sup>1</sup> Wang Xiangzhao<sup>1,2</sup> Li Jie<sup>1,2</sup> Li Yong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Based on analysis of the typical system parameters of Ronchi phase shifting shearing interferometer, the main phase retrieval error sources of the interferometer are systematically studied. Combined with the traditional five-frame algorithm, retrieval phase errors of Ronchi phase-shifting shearing interferometer are analyzed and simulated with the self-designed eight-frame and ten-frame phase-shifting algorithm. The simulation results show that the ten-frame phase-shifting algorithm has a better phase retrieval accuracy than the eight-frame phase-shifting algorithm and both the two algorithms can effectively eliminate negative effects of unwanted interference from the high order diffraction light, which limits the phase retrieval accuracy. In order to improve the measurement accuracy, the following conditions should be satisfied: the phase shifting error is better than 2%, at least 10-bit quantization detector is used, the grating period error is less than 1% and the spatial coherence of light is less than 0.1. The theoretical analysis is validated by three groups of comparison experiments with different phase retrieval algorithms, shear ratios and spatial coherence of light.

**Key words** measurement; interferometry measurement; Ronchi phase-shifting shearing interferometer; wave-front aberration measurement; phase retrieval errors; lithography projection lens

**OCIS codes** 120.2650; 120.3180; 220.1010; 050.5080; 110.5520

### 1 引言

根据国际半导体技术蓝图 ITRS2013, 193 nm 浸液光刻结合多图形技术是集成电路制造技术进入 1x nm 节点的主流技术<sup>[1]</sup>。随着产率的提高, 光刻机投影物镜热像差更加显著<sup>[2-3]</sup>, 高精度、高速原位波像差检测装置成

收稿日期: 2015-02-02; 收到修改稿日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61275207, 61205102, 61474129, 61405210)、上海市自然科学基金(14ZR1444900)

作者简介: 吴飞斌(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学干涉测量方面的研究。E-mail: feibinwu@163.com

导师简介: 唐 锋(1979—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事信息光电子技术方面的研究。E-mail: tangfeng@siom.ac.cn

为光刻机投影物镜装调的必要设备。Ronchi相移剪切干涉仪<sup>[4]</sup>是一种采用拓展光源调制空间相干性的干涉仪结构,具有共光路、零条纹检测、精度和灵敏度高等优点,ASML公司基于此技术开发了ILIAS、PARIS波前传感器<sup>[5-6]</sup>,已应用于193 nm浸液光刻机NXT平台<sup>[7]</sup>,其检测技术原理及算法均作为技术秘密,未对外公开。

对于典型的Ronchi相移剪切干涉仪,影响测量精度的相位提取误差源主要包括相移误差、探测器误差、振动误差、光栅周期误差和光源空间相干性误差等<sup>[8]</sup>;由于Ronchi相移剪切干涉存在多级衍射寄生干涉的影响<sup>[9-10]</sup>,相移算法的相位提取误差也是影响Ronchi相移剪切干涉测量精度的重要因素。在环境控制与器件性能控制之外,高性能的相移相位提取算法能够在一定程度上降低上述误差源的影响,对提高Ronchi相移剪切干涉仪检测精度至关重要。

本文分析了Ronchi相移剪切干涉仪的典型系统参数及其相位提取精度的主要影响因素,提出了两种新的相移算法——八步相移算法和十步相移算法,消除衍射级次寄生干涉对相位提取精度的影响,提高Ronchi相移剪切干涉仪测量精度。结合传统的五步相移算法,采用所提出八步和十步相移算法对相移误差、探测器响应非线性、振动、光栅制造工艺误差和光源空间相干性等误差源的敏感性进行定量分析,对比了不同相移算法下Ronchi相移剪切干涉仪的相位提取误差。通过采用不同的相移算法、剪切率、光源空间相干性的三组对比实验,对理论分析的正确性进行了验证。

## 2 工作原理及相移算法

Ronchi相移剪切干涉仪的结构如图1所示,在被测光学系统的物面和像面分别放置一维Ronchi光栅和棋盘光栅<sup>[7]</sup>。物面光栅调制光场空间相干性,并使投影物镜的光瞳被均匀照明;像面光栅作为分光元件使各衍射级次互相平移错位,0级与其他奇数级次衍射光干涉后在电荷耦合器件(CCD)上形成干涉图像,其他衍射级次之间不发生干涉<sup>[11]</sup>。像面光栅安装在位移台上,通过移动像面光栅引入相移,采用相移算法求解剪切方向正交的两组干涉图获得差分波前,波前重建求得被测投影物镜的波像差<sup>[12]</sup>。

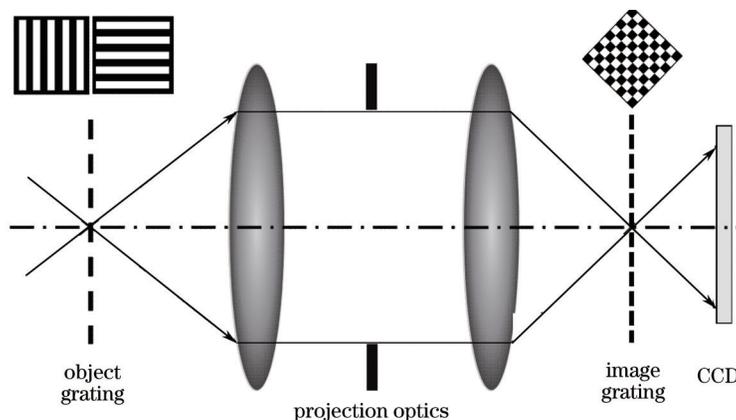


图1 Ronchi相移剪切干涉仪工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of Ronchi shearing interferometer

棋盘光栅放置成透光单元和遮光单元的对角线方向平行于 $x$ 轴和 $y$ 轴方向的状态,沿 $x$ 和 $y$ 方向看都是Ronchi光栅,沿 $x$ 或 $y$ 方向移动棋盘光栅可以在正交的两个方向内引入相移。物面光栅周期 $p_o$ 等于像面光栅周期 $p_i$ 与被测物镜成像放大比 $r$ 的乘积,即 $p_o = p_i \times r$ 。而剪切率 $s$ 与光源波长 $\lambda$ 、被测物镜数值孔径 $NA$ 、像面光栅周期 $p$ 之间满足如下关系:

$$s = \frac{\lambda}{2 \cdot NA \cdot p_i} \quad (1)$$

通常对于相移干涉仪,剪切率一般控制在1%~5%之间,改变光栅周期可以对剪切率进行调节。Ronchi相移剪切干涉仪相移干涉测量时,像面光栅多级衍射光所形成的干涉场的光强分布可以表示为

$$I_i(x,y) = I_0 + 2 \sum_{n=-2k-1}^{2k+1} A_n A_0 \gamma(n) \cos(\varphi_n + n\delta_i), \quad (2)$$

式中 $I_0$ 为背景光强, $A_n$ 为像面光栅 $n$ 级衍射的复振幅强度, $\gamma(n)$ 和 $\varphi_n$ 分别表示 $n$ 级与0级衍射的干涉条

纹对比度和相位差,  $\delta_i$  为相移量。

Ronchi 相移剪切干涉仪通过移动像面光栅而在相邻衍射级次之间引入相移,但存在多级衍射光寄生干涉的影响。为了消除多级衍射光寄生干涉的影响,提出了分别可以消除 $\pm 5$ 级和 $\pm 9$ 级以内多级衍射影响的八步相移算法和十步相移算法。八步相移算法采集相移间隔 $\pi/4$ 的8幅干涉图,算法表达式为

$$\varphi = \arctan \frac{I_{\frac{\pi}{4}} - I_{\frac{5\pi}{4}} + I_{\frac{3\pi}{4}} - I_{\frac{7\pi}{4}} + \sqrt{2} \left( I_{\frac{\pi}{2}} - I_{\frac{3\pi}{2}} \right)}{I_{\frac{\pi}{4}} - I_{\frac{5\pi}{4}} + I_{\frac{7\pi}{4}} - I_{\frac{3\pi}{4}} + \sqrt{2} (I_0 - I_{\pi})}, \quad (3)$$

式中  $I_0 \sim I_{\frac{7\pi}{4}}$  表示相移量分别为  $0 \sim 7\pi/4$  时采集到的干涉图光强。十步相移算法则采集相移量分别为  $0, \pi/6, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3, 5\pi/6, \pi, 5\pi/3, 3\pi/2, 11\pi/6$  的十幅干涉图,算法表达式为

$$\varphi = \arctan \frac{I_{\frac{3\pi}{2}} - I_{\frac{\pi}{2}} + I_{\frac{11\pi}{6}} - I_{\frac{\pi}{6}} + \sqrt{3} \left( I_{\frac{5\pi}{3}} - I_{\frac{\pi}{3}} \right)}{I_0 - I_{\pi} + I_{\frac{\pi}{3}} - I_{\frac{2\pi}{3}} + \sqrt{3} \left( I_{\frac{\pi}{6}} - I_{\frac{5\pi}{6}} \right)}, \quad (4)$$

式中  $I_0 \sim I_{\frac{11\pi}{6}}$  表示相移量分别为  $0 \sim 11\pi/6$  时采集到的干涉图光强。

传统的相移干涉技术可采用 Hariharan 等提出的五步相移算法<sup>[8]</sup>,其表达式为

$$\varphi = \arctan \frac{2(I_{\pi/2} - I_{3\pi/2})}{2I_{\pi} - I_{2\pi} - I_0}, \quad (5)$$

式中  $I_0 \sim I_{2\pi}$  分别表示相移量为  $0 \sim 2\pi$  时采集到的干涉图光强。

### 3 相位提取误差分析

Ronchi 相移剪切干涉仪采用相移干涉技术,通过移动像面光栅在相邻衍射级间引入相移,具有较高的检测精度,但是影响测量精度的误差因素较多。一方面来自外界环境,如空气扰动和实验平台振动等影响;另一方面来自干涉仪本身,如相移器误差、探测器误差、光栅加工误差和光源空间相干性误差等的影响<sup>[8]</sup>;由于 Ronchi 相移剪切干涉中多级衍射寄生干涉的影响<sup>[9-10]</sup>,无法采用经典的四步、五步、十三步等相移算法<sup>[13]</sup>消除,相移算法的相位提取误差也是影响 Ronchi 相移剪切干涉测量精度的重要因素。目前,主流的 193 nm 浸液光刻机以高数值孔径为主,采用波长为 193 nm 的光源,数值孔径为 0.93 的被测光学系统,剪切率为 1%,对主要相位提取误差源进行仿真分析。

#### 3.1 相位提取误差

对于 Ronchi 相移剪切干涉仪,要消除的光栅衍射寄生干涉对相位提取精度影响的级数越高,相位提取的精度越高。相位提取误差为真实相位与相移算法求出的理论相位之间的差,通过仿真可以计算出不同相移算法下的理论相位提取算法误差,如表 1 所示,PV 值表示峰谷值。消除了 $\pm 9$ 级以内衍射寄生干涉的十步相移算法,与消除 $\pm 3$ 和 $\pm 5$ 级衍射寄生干涉的八步相移算法相比,相位提取精度更高。而对于传统的五步相移算法,由于无法消除多级衍射寄生干涉而产生非常明显的相位提取误差,无法用于 Ronchi 相移剪切干涉仪相位提取。

表 1 不同相移算法的理论相位提取误差

Table 1 Theoretical value of phase retrieval error of different algorithms

Algorithm	RMS / $(10^{-3}\lambda)$	PV / $(10^{-3}\lambda)$
5-frame	443.6	787.4
8-frame	4.4	11.0
10-frame	1.9	11.1

#### 3.2 相移误差

相移误差主要包括线性相移误差和非线性相移误差,实际相移量表达式为

$$\delta' = \delta(1 + \varepsilon_1 + \delta\varepsilon_2), \quad (6)$$

式中  $\delta'$  为实际相移量,  $\delta$  为理想相移量,  $\varepsilon_1$  为归一化线性相移误差,  $\varepsilon_2$  为归一化非线性相移误差。干涉场的光强分布可以改写为

$$I'_i(x,y) = I_0 + 2 \sum_{n=-2k-1}^{2k+1} A_n A_0 \gamma(n) \cos[\varphi_n + n\delta_i(1 + \varepsilon_1 + \delta\varepsilon_2)]. \quad (7)$$

由图2(a)可以看出,与十步相移算法相比,八步相移算法在线性误差小于2%时,产生的相位误差均方根RMS值小于 $1 \times 10^{-3} \lambda$ 。由图2(b)可以看出,当二阶非线性相移误差为4%时,产生的相位误差RMS值优于 $5 \times 10^{-3} \lambda$ 。为了满足Ronchi相移剪切干涉仪测量精度的要求,要求相移器的线性相移误差和非线性相移误差都要小于2%,说明Ronchi相移剪切干涉仪对相移器的精度要求严格。

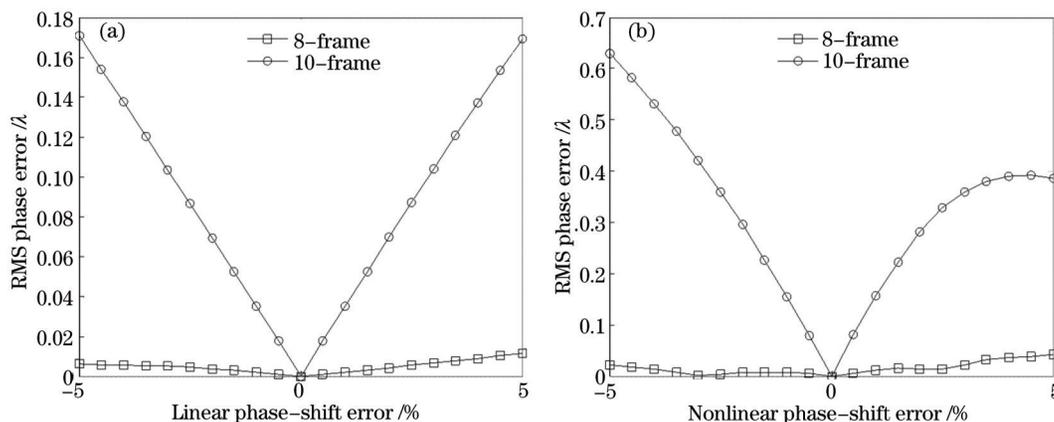


图2 相移误差引起的相位误差

Fig.2 RMS phase error varies with phase shifting error

### 3.3 探测器误差

探测器误差也是导致相位测量误差的一个重要误差源,探测器误差主要包括探测器的非线性误差和探测器的量化误差<sup>[8]</sup>。通常探测器的非线性误差指的是二阶误差,其表达式为

$$I' = I + I^2 \varepsilon_3, \quad (8)$$

式中  $I'$  为实际探测光强,  $I$  为输入光强,  $\varepsilon_3$  为归一化探测器二阶非线性误差。将式(9)代入(1)式中,得

$$I'(x,y) = I_0 + \varepsilon I_0^2 + 2(1 + 2\varepsilon_3 I_0) \sum_{n=-2k-1}^{2k+1} A_n A_0 \gamma(n) \cos(\varphi_n + n\delta_i) + 2\varepsilon_3 \sum_{n=-2k-1}^{2k+1} A_n^2 A_0^2 \gamma^2(n) [1 + \cos(2\varphi_n + 2n\delta_i)]. \quad (9)$$

由图3的仿真结果可以看出,所提出的八步相移算法对探测器非线性误差完全不敏感,说明可以通过该算法来消除该误差;而十步相移算法则比较敏感,探测器非线性误差小于2%时,相位提取误差小于 $1 \times 10^{-3} \lambda$ ,也可以消除该误差。

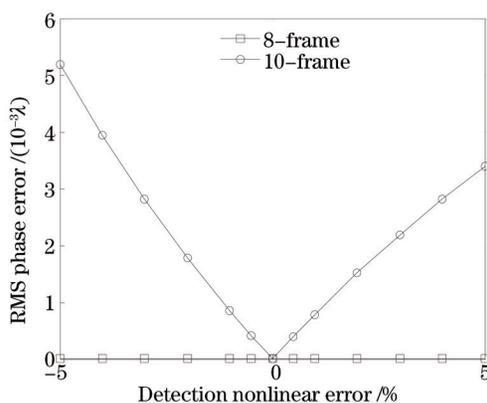


图3 探测器非线性误差引起的相位误差

Fig.3 RMS phase error caused by detection nonlinear error

探测器量化误差<sup>[8]</sup>是指探测器在模/数(A/D)转化过程中产生的误差,由探测器的量化误差引起的相位测量误差(RMS值)的表达式为

$$\sigma_\phi = \frac{1}{\sqrt{3n} \gamma Q}, \quad (10)$$

式中  $n$  为相移步数,  $\gamma$  为条纹对比度,  $Q$  为探测器采集的图片灰度级数。

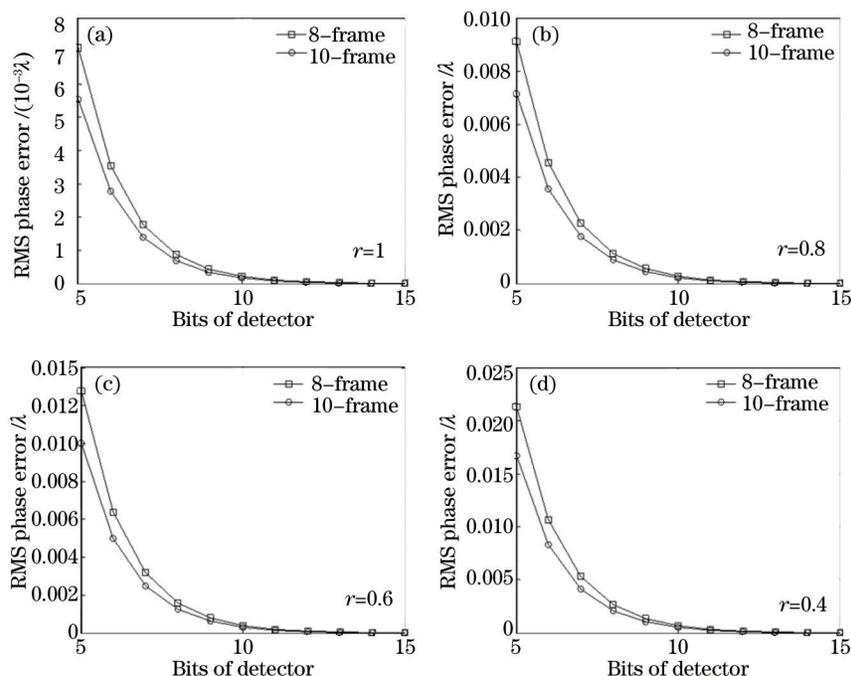


图4 探测器量化误差引起的相位误差

Fig.4 RMS phase error due to quantization error

由图4可以看出,十步相移算法对探测器的量化误差的抑制能力最好,八步相移算法次之,并且随着探测器位数及条纹对比度的增加,由探测器量化误差引起的相位误差逐渐减小。当探测器位数大于10时,两种算法因量化误差引起的相位误差都小于  $1 \times 10^{-3} \lambda$ ,基本不影响测量结果。

### 3.4 振动误差

机械振动产生的误差是相移干涉检测中不可避免的一个重要问题,振动误差的影响通常表现为在相干的波面之间引入随机的相位变化,导致相位测量误差增大;振动频率与系统固有频率接近时引起共振,产生剧烈震动而无法测量;对于振幅为  $A$ 、归一化频率(振动频率与相机帧频的比值)为  $\nu$ 、相位偏差为  $\beta$  的机械振动<sup>[14]</sup>,在干涉场中的影响可以表示为

$$I_i(x, y) = I_0 + 2 \sum_{n=-2k-1}^{2k+1} A_n A_0 \gamma(n) \cos[\varphi_n + n\delta_i - A \cos(2\pi\nu t + \beta)]. \quad (11)$$

对于常见的相移干涉仪,相关研究指出低频振动误差是影响测量结果的重要因素<sup>[8,15-16]</sup>。由图5(a)可以

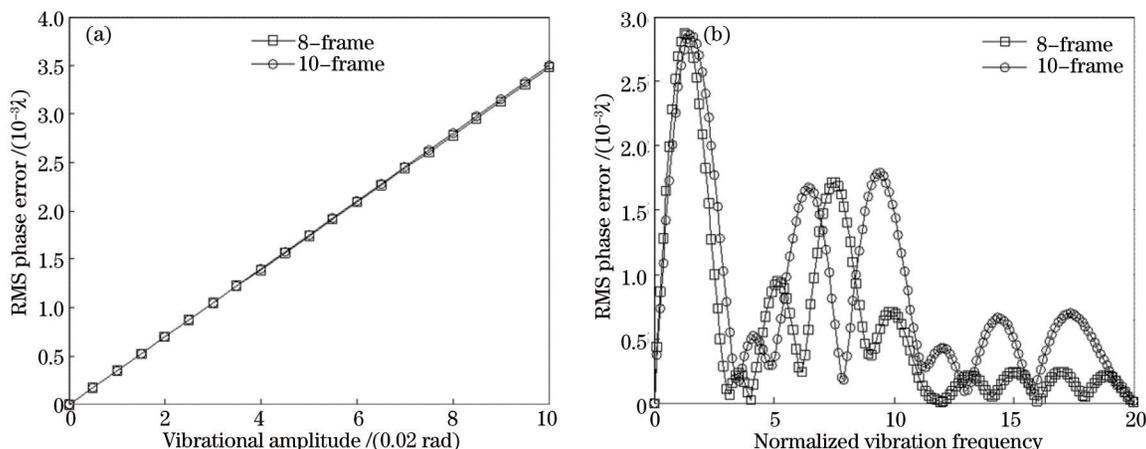


图5 振动引起的相位误差

Fig.5 RMS phase error due to vibration

看出振动幅度越大,其引起的相位误差越大,图5(b)为振幅为0.02 rad时不同相移算法对振动频率的响应,可以看

出对于所提出的八步和十步相移算法,振动频率与实验平台机械结构固有频率的比值越大,相位误差越小。为了克服振动误差的影响,可以通过调大相移器PZT振动频率与实验平台机械结构固有频率的差值,并提高防震措施。

### 3.5 光栅制造工艺误差

Ronchi相移剪切干涉仪在原理上偶数级次是缺级的,是在进行空间相干性分析和相位提取算法研发时的一个重要依据,但实际上存在光栅制造工艺误差,主要体现在光栅周期不准确和占空比不是严格的50%。假设实际光栅每条缝隙的宽度为 $a$ ,周期为 $d(d>a)$ ,则光栅的复振幅透射率函数可以表示为

$$t(x,y) = \frac{1}{d} \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x-nd). \quad (12)$$

将光栅实际占空比 $r$ 与理想占空比 $r_0$ 的差定义为占空比误差 $\varepsilon_2$ ,则 $r=r_0(1+\varepsilon_2)$ 。由图6(a)可以看出Ronchi相移剪切干涉仪对占空比误差非常敏感,主要体现在以 $\pm 1$ 级为主的奇数级次,占空比误差小于1%时,偶数级次衍射归一化光强误差小于0.001,其影响可以忽略,说明Ronchi相移剪切干涉仪对光栅的精度要求严格。分别对光栅占空比误差为2%、1%、0.5%和0.1%的光栅进行仿真,采用八步相移算法计算相位误差如下图6(b)所示,占空比误差小于1%时测量精度优于 $0.1807 \times 10^{-3} \lambda$  (RMS值)。

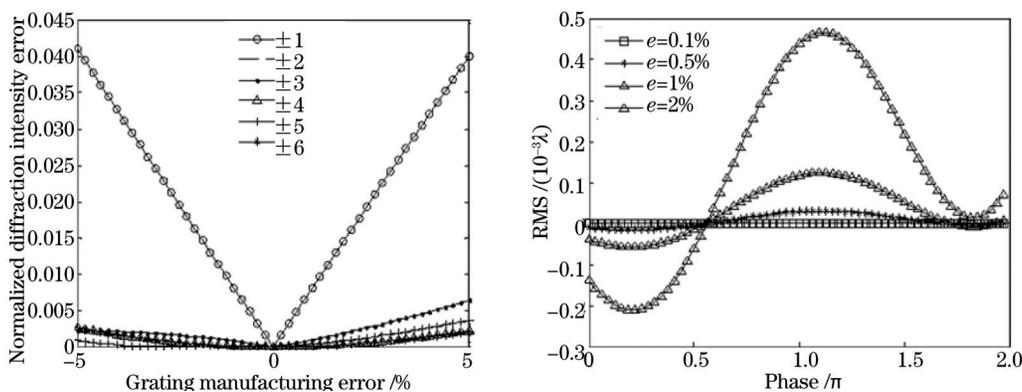


图6 光栅占空比误差及其引起的相位误差

Fig.6 RMS phase error due to grating manufacturing error

实际光栅周期 $d$ 与理想周期 $d_0$ 的差定义为光栅周期误差 $\varepsilon_3$ ,则 $d=d_0(1+\varepsilon_3)$ 。像面光栅横向位移 $\Delta x$ ,在干涉场产生的相移量为 $\delta_0 = 2\pi\Delta x/d_0$ ,因光栅周期误差引入的相移量偏差为

$$\Delta\delta = \frac{2\pi\Delta x}{d_0} - \frac{2\pi\Delta x}{d} = \delta_0 \cdot \frac{\varepsilon_3}{1+\varepsilon_3}. \quad (13)$$

并且,对于Ronchi相移剪切干涉仪,物面光栅周期等于像面光栅周期与被测物镜成像放大比的乘积,因此,光栅周期误差还表现为物面光栅与像面光栅周期不匹配,像面光栅各衍射级次的相干性发生变化,导致相位提取误差。由图7可以看出,Ronchi相移剪切干涉仪对光栅周期误差非常灵敏。当周期误差小于1%

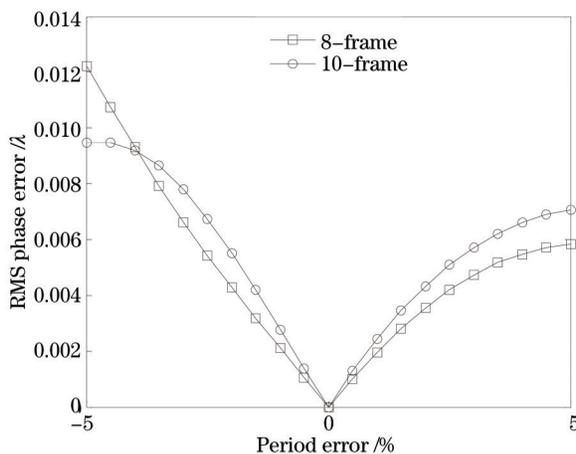


图7 光栅周期误差引起的相位误差

Fig.7 RMS phase error due to grating period error

时,理论相位测量精度优于  $2 \times 10^{-3} \lambda$  (RMS值),说明 Ronchi 相移剪切干涉仪对光栅周期的准确度要求严格。

### 3.6 光源空间相干性误差

Ronchi 相移剪切干涉仪采用非相干光源,受到物面 Ronchi 光栅对光场空间相干性的调制作用,像面光栅只有与物面 Ronchi 光栅线垂直的方向( $x$ 方向)上的衍射级次才能发生干涉,且各衍射级次的差值为零外的偶数值时不发生干涉。当采用的光源为部分相干光时,受到物面光栅对光场空间相干性的调制作用,垂直于光栅线的  $x$  轴方向上受到同样的调制作用,而平行于光栅线的方向( $y$ 方向)上还会有各干扰衍射项的寄生干涉。

当光源的空间相干度  $\gamma_0$  不为零时,考虑 Ronchi 剪切光栅衍射偶数级次消光, $y$  轴方向除偶数级外各衍射项相互干涉, $x$  方向各奇数级也会与这些级次发生干涉。考虑这些干扰衍射项的寄生干涉时,干涉场表达式可以改写为

$$I_i^*(x,y) = I_0 + 2 \sum_{n=-2k-1}^{2k+1} A_n A_0 \gamma(n) \cos(\varphi_n) + 2\gamma_0 \left[ \sum_{m=-2l-1}^{2l+1} A_0 A_m \gamma(m) \cos(\varphi_m) + \sum_{m=-2k-1}^{2k+1} \sum_{m'=-2k-1}^{2k+1} A_n A_m \gamma(n,m) \cos(\varphi_{nm}) + \sum_{m=-2k-1}^{2k+1} \sum_{m'=-2k-1}^{2k+1} A_m A_{m'} \gamma(m,m') \cos(\varphi_{mm'}) \right] = I_0 + 2 \sum_{n=-2k-1}^{2k+1} A_n A_0 \gamma(n) \cos(\varphi_n) + n(\gamma_0), \quad (14)$$

式中  $\varphi_{i,j}$  为光栅在  $x$  轴方向上第  $i$  级衍射与  $y$  轴方向上衍射的第  $j$  级衍射的相位差,  $i$  为沿  $x$  轴方向上的第  $0$ 、 $m$  或  $m'$  衍射级,  $j$  为沿  $y$  轴方向上的第  $0$ 、 $n$  或  $n'$  衍射级,  $k$ 、 $l$ 、 $l'$  都是非零整数。可以将这些干扰衍射项的寄生干涉看成是噪声项  $n(\gamma_0)$ , 且  $n(\gamma_0)$  与光源的空间相干度有关。如图 8 给出了光源不同空间相干度条件下,八步相移算法的理论测量精度。

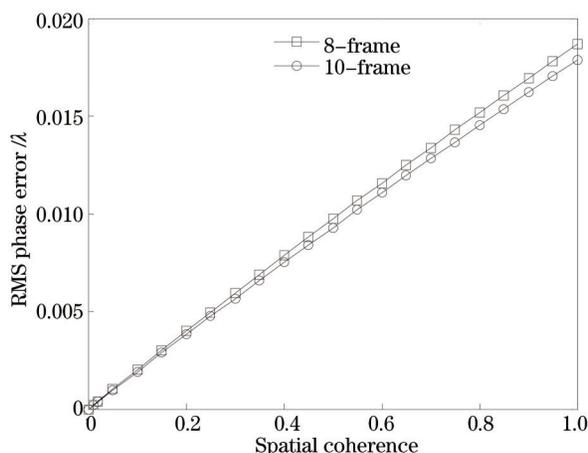


图 8 空间相干性误差引起的相位误差

Fig.8 RMS phase error due to spatial coherence error

仿真结果可以看出,Ronchi 相移剪切干涉仪对光源的空间相干性的反应灵敏,随着空间相干度的增大,测量误差急剧增大。当空间相干度小于 0.1 时,测量误差 RMS 值优于  $1 \times 10^{-3} \lambda$ ,可见 Ronchi 相移剪切干涉对光源的空间相干性要求严格。

## 4 实验与分析

实验装置如图 9 所示,利用所搭建的 Ronchi 相移剪切干涉仪对数值孔径为 0.3,成像放大比为 5:1,波像差优于 20 nm(RMS 值)的投影物镜分别采用不同实验条件进行测量。实验条件如下:相移器为 PI 公司的 E-712 型纳米位移台;探测器采用 CCD,位数为 10 位,非线性误差优于 2%;精密隔振实验平台采用气浮隔振,固有频率小于 5 Hz;光栅刻线精度优于 100 nm,周期、占空比精度都优于 1%。

### 4.1 相移算法对比实验

采用波长为 432 nm 的 LED 面光源,周期分别为 90  $\mu\text{m}$  和 16  $\mu\text{m}$  的物面光栅和像面光栅(剪切率为 4%)进

行实验。分别采用八步和十步相移算法进行检测,采用差分 Zernike 波前重建算法获得被测物镜波像差分别如图 10(a)和图 10(c)所示,拟合的 Zernike 多项式系数分别如图 10(b)和图 10(d)所示,可以看出两种算法结果相近。计算可得,采用十步相移算法得到被测物镜波像差的 RMS 值和 PV 值分别为 21.2 nm 和 130.8 nm,采用八步相移算法得到被测物镜波像差的 RMS 值和 PV 值分别为 19.1 nm 和 121.3 nm。

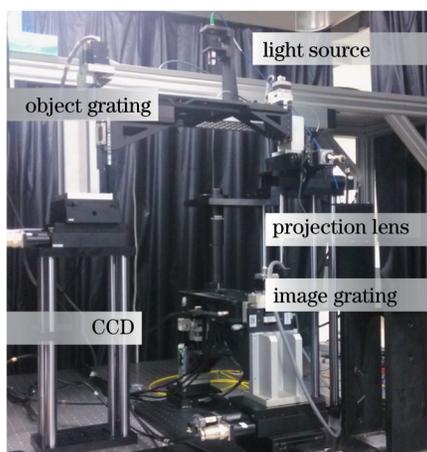


图9 Ronchi相移剪切干涉仪的实验装置图

Fig.9 Experimental setup of the Ronchi shearing interferometer

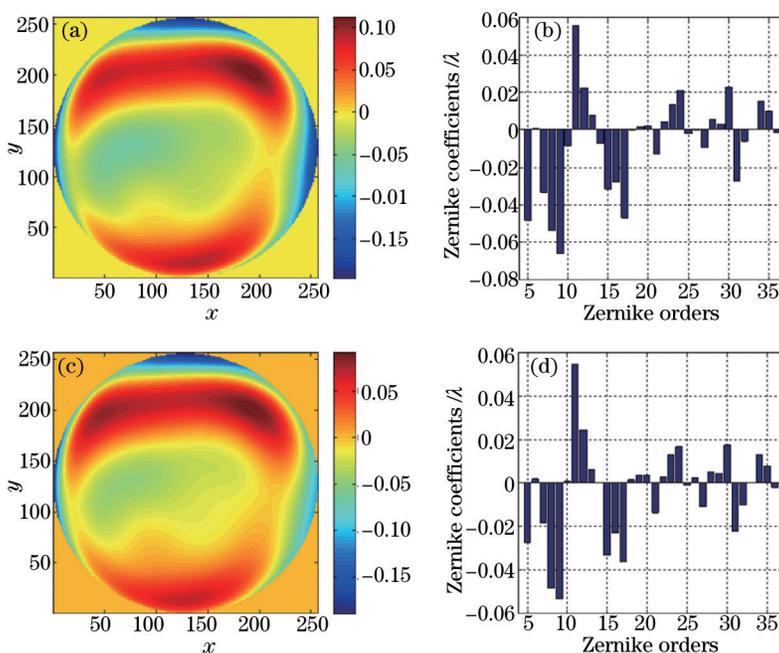


图 10 波前重建结果。(a)八步相移算法重建波前;(b)八步相移算法 Zernike 多项式系数;(c)十步相移算法重建波前;(d)十步相移算法 Zernike 多项式系数

Fig.10 Results of wavefront reconstruction. (a) Reconstructed wavefront; (b) Zernike coefficients with 8-frame algorithm; (c) reconstructed wavefront; (d) Zernike coefficients with 10-frame algorithm

#### 4.2 剪切率对比实验

采用波长为 432 nm 的 LED 面光源,周期分别为 18、24、48  $\mu\text{m}$ (剪切率分别为 4.0%、3.0%和 1.5%)像面光栅进行实验,采用八步相移算法提取相位,经差分 Zernike 波前重建后可得被测物镜的波像差分别如图 11(a)~(c)所示,拟合的 Zernike 多项式系数如图 11(d)所示。计算得到不同剪切率时被测物镜波像差的 RMS 值和 PV 值如下表 2 所示。

由图 11 可以看出,不同剪切率下重建波前的形状相似,Zernike 系数分布形式相似,验证了八步相移算法和十步相移算法的正确性。由表 2 可以看出,剪切率越小,重建的波前 RMS 值和 PV 值都越大,造成这种

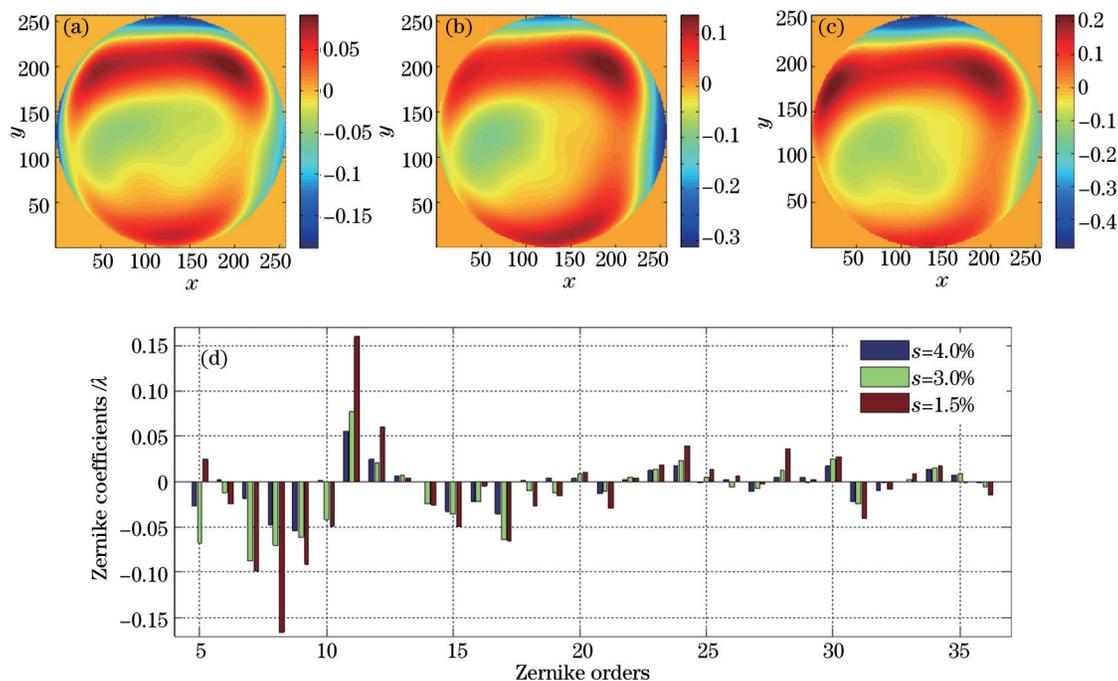


图 11 不同剪切率波前重建结果。(a)  $s=4.0\%$  的重建波前; (b)  $s=3.0\%$  的重建波前; (c)  $s=1.5\%$  的重建波前;  
(d) 不同剪切率时的 Zernike 多项式系数

Fig.11 Results of wavefront reconstruction. Reconstructed wavefront with (a)  $s=4.0\%$ ; (b)  $s=3.0\%$  and (c)  $s=1.5\%$ , respectively.  
(d) Comparisons of the Zernike coefficients with different shear ratios

表 2 不同剪切率下测得的实验结果

Table 2 Experimental results with different shear ratios

Period / $\mu\text{m}$		Shear ratio	Reconstructed wavefront /nm	
Image plane	Object plane		RMS	PV
18	90	4.0%	19.1	121.3
24	120	3.0%	30.6	195.9
48	240	1.5%	46.8	305.2

现象的原因,主要是实验中采用显微物镜作为被测物镜,显微物镜的有效视场较小,而光栅剪切率变小时,光栅周期变大,光栅有效面积变大,从而使被测视场区域变大,Ronchi干涉仪测得的波像差实际为物面光栅有效面积内的平均波像差,显微物镜的等晕区即波像差相等的区域较小,对物面光栅的大小比较敏感,因此当剪切率变化时,测得的波像差会发生一定变化,光栅越大,测得的波像差越差,这与显微物镜实际成像是相符的。

### 4.3 光源空间相干性对比实验

分别采用LED面光源、LED点光源和多模光纤光源进行曝光,各光源的空间相干度如表3所示。实验中剪切率为4%,采用八步相移算法提取相位,经差分Zernike波前重建后可得被测物镜的波像差如图12所示。

由(12)式知,采用空间相干性为零的光源时,只有剪切方向的相移才会产生光强变化。光源采用空间相干性较高的532 nm激光时,当像面光栅产生与剪切方向垂直的相移时,干涉图也产生如图13的光强变化。如表3所示,采用了空间相干性都接近零的LED点光源和LED面光源时,重建波前的形式和RMS值都非常接近,而采用空间相干性较高的多模光纤光源时重建结果有明显偏差。造成这现象的原因是,采用多模光纤光源时,物面光栅对光场空间相干性的调制效果变差,与剪切方向垂直的方向上相应的衍射项也出现干涉现象,导致重建波前的结果发生了明显偏差。不同空间相干性光源时重建波前RMS值的差值也符合如图8所示的相位误差分布,进一步验证了光源空间相干性对Ronchi相移剪切干涉仪及其相位提取精度的影响。

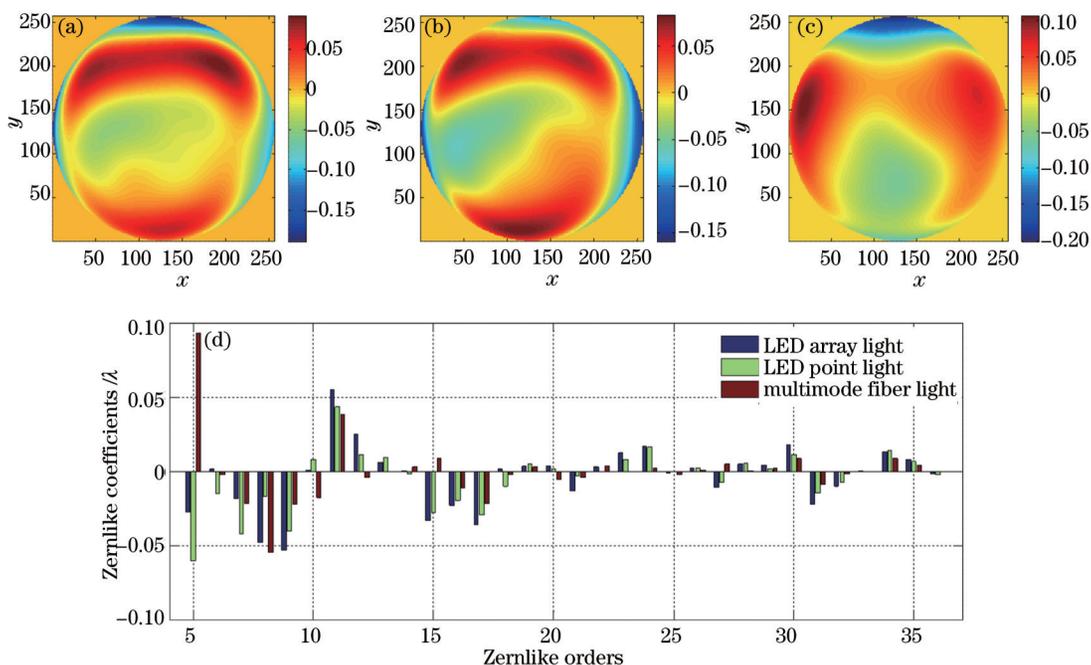


图 12 不同空间相干性波前重建结果。(a) LED 面光源时的重建波前; (b) LED 点光源时的重建波前;  
(c) 多模光纤光源时的重建波前; (d) 不同空间相干性时的 Zernike 多项式系数

Fig.12 Results of wavefront reconstruction. Reconstructed wavefront with (a) LED area light; (b) LED point light and (c) multimode fiber light, respectively. (d) Comparisons of the Zernike coefficients with different shear ratios

表 3 采用不同光源测得的实验结果

Table 3 Experimental results with different light sources

Light source	RMS of reconstructed wavefront /nm	PV of reconstructed wavefront /nm
LED array light	19.1	121.3
LED point light	18.4	104.5
Multimode fiber light	25.7	163.3

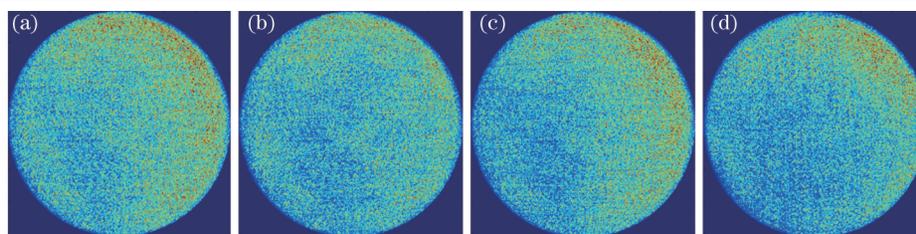


图 13 像面光栅垂直于剪切方向相移时光强变化。(a)和(b)x 方向剪切时像面光栅沿 y 的相移;  
(c)和(d)y 方向剪切时像面光栅沿 x 的相移

Fig.13 Change of intensity with image grating move along vertical direction of shearing. (a) and (b) Move along y direction when shearing direction is x; (c) and (d) move along x direction when shearing direction is y

## 5 结 论

分析了 Ronchi 相移剪切干涉仪的典型系统参数及影响其相位提取精度的主要因素,提出了两种新的相移算法——八步相移算法和十步相移算法,消除衍射级次寄生干涉对相位提取精度的影响,提高 Ronchi 相移剪切干涉仪测量精度。仿真结果说明,消除了 $\pm 9$ 级以内衍射寄生干涉的十步相移算法,比八步相移算法具有更高的相位提取精度;为了满足 Ronchi 相移剪切干涉仪测量精度的要求,相移器的线性相移误差和非线性相移误差都要优于 2%;十步和八步相移算法对探测器误差具有较好的抑制能力,当探测器位数大于 10 时,探测器量化误差引起的相位误差小于  $1 \times 10^{-3} \lambda$ ,基本不影响测量结果;Ronchi 相移剪切干涉仪对光栅周

期大小要求较低,但对准确度要求严格,周期误差须小于1%;由于光栅线宽加工误差一般仅能达到100nm,对于短波长系统,光栅加工误差成为限制相位提取精度的重要因素;Ronchi相移剪切干涉仪对光源的空间相干性的反应灵敏,随着空间相干度的增大,测量误差急剧增大,当空间相干度小于0.1时,测量误差RMS值优于 $1 \times 10^{-3} \lambda$ 。

通过采用不同的相移算法、剪切率、光源空间相干性的三组对比实验,进行了原理验证。采用十步相移算法得到被测物镜波像差的RMS值和PV值分别为21.2 nm和130.8 nm,采用八步相移算法得到被测物镜波像差的RMS值和PV值分别为19.1 nm和121.3 nm。光源采用空间相干性都接近零的LED点光源和LED面光源时,重建波前的形式和RMS值都非常接近,而采用空间相干性较高的多模光纤光源时重建结果有明显偏差,进一步验证了光源空间相干性对Ronchi相移剪切干涉仪及其相位提取精度的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Boeij W P de, Pieternella R, Bouchoms I, *et al.*. Extending immersion lithography down to 1x nm production nodes[C]. SPIE, 2013, 8683: 86831L.
- 2 Frank Staals, Alena Andryzhyeuskaya, Hans Bakker, *et al.*. Advanced wavefront engineering for improved imaging and overlay applications on a 1.35 NA immersion scanner[C]. SPIE, 2011, 7973: 79731G.
- 3 Bekaert J, Van Look L, Vandenbergh G, *et al.*. Characterization and control of dynamic lens heating effects under high volume manufacturing conditions[C]. SPIE, 2011, 7973: 79730V.
- 4 Braat J, Janssen A J E M. Improved Ronchi test with extended source[J]. J Opt Soc Am A, 1999, 16(1): 131-140.
- 5 D Flagello, R Socha, X Shi, *et al.*. Optimizing and enhancing optical systems to meet the low k1 challenge[C]. SPIE, 2003, 5040: 139-150.
- 6 K Lai, G Gallatin, M Kerkhof, *et al.*. New paradigm in lens metrology for lithographic scanner: evaluation and exploration[C]. SPIE, 2004, 5377: 160-171.
- 7 M A van de Kerkhof, W de Boeij, H Kok, *et al.*. Full optical column characterization of DUV lithographic projection tools[C]. SPIE, 2004, 5377: 1960-1970.
- 8 Daniel Malacara. Optical Shop Test[M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- 9 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.
- 10 A K Ray-Chaudhuri, K D Krenz, C H Fields. At-wavelength characterization of an extreme ultraviolet camera from low to midspatial frequencies with a compact laser plasma source[J]. J Vac Sci Technol B, 1997, 15(6): 2462-2466.
- 11 A K Ray-Chaudhuri, W Ng, F Cerrina, *et al.*. Alignment of a multilayer-coated imaging system using extreme ultraviolet Foucault and Ronchi interferometric testing[J]. J Vac Sci Technol B, 1995, 13(6): 3089-3093.
- 12 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.
- 13 Peter J de Groot, Leslie L Deck. New algorithms and errors analysis for sinusoidal phase shifting interferometry[C]. SPIE, 2008, 7063: 70630K.
- 14 Peter J de Groot, Leslie L Deck. Numerical simulations of vibration in phase-shifting interferometry[J]. Appl Opt, 1996, 35(13): 2172-2178.
- 15 Peter J de Groot. Vibration in phase shifting interferometry[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(2): 354-365.
- 16 Zhang Yu, Jin Chunshui, Ma Dongmei, *et al.*. Analysis of measuring errors for the visible light phase shifting point diffraction interferometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5):1351-1356.  
张 宇,金春水,马冬梅,等. 可见光移相点衍射干涉仪的测试误差分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5):1351-1356.

栏目编辑: 何卓铭