

Ronchi剪切干涉光刻投影物镜波像差检测技术研究

吴飞斌^{1,2} 唐 锋¹ 王向朝¹ 李 杰^{1,2} 李思坤¹

¹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

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 Ronchi剪切干涉采用扩展光源调制光场空间相干性,具有干涉仪结构简单、共光路、零条纹检测等优点,适合用于光刻机投影物镜波像差原位检测。基于Ronchi剪切干涉的投影物镜波像差检测技术及系统,根据光栅衍射和空间相干性理论推导了Ronchi剪切干涉场的表达式。针对Ronchi剪切干涉仪多级衍射光寄生干涉对相位提取精度的影响,提出了一种十步相移算法,有效地消除 ± 9 级以内多级衍射的影响,理论上相位提取误差峰谷(PV)值为 0.0046λ ,均方根(RMS)值为 0.0019λ ,实验数据验证了理论推导的正确性和相位提取算法的有效性。

关键词 测量; Ronchi剪切干涉; 相位提取; 波像差检测; 光刻投影物镜

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0308008

Study on Ronchi Shearing Interferometry for Wave-Front Aberration Measurement of Lithography Projection Lens

Wu Feibin^{1,2} Tang Feng¹ Wang Xiangzhao¹ Li Jie^{1,2} Li Sikun¹

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Ronchi shearing interferometry modulates the spatial coherence of light field with extended source. With the advantages of simple structure, common-path, null-fringe detection, and so on the Ronchi shearing interferometer can be used for in situ aberration measurement of lithography projection lens. Ronchi shearing interferometry for wave-front aberration measurement of lithography projection lens is studied. The interference model of Ronchi shearing interferometer is derived by theories of grating diffraction and spatial coherence. A ten-step phase-shifting algorithm is proposed to eliminate negative effects of unwanted interference from the high order diffraction light, which limits the accuracy of phase retrieval. The effects of the first ± 9 orders interference on phase retrieval accuracy can be eliminated. The peak-valley (PV) value and root mean square (RMS) value of theoretical phase retrieval error are less than 0.0046λ and 0.0019λ respectively. The theoretical interference model and the phase retrieval algorithm are validated.

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

OCIS codes 120.2650; 120.3180; 050.5080; 110.5520; 220.1010

1 引言

光刻技术是极大规模集成电路制造的核心技术之一,投影物镜是光刻机系统的核心部件,其成像质量直接决定着光刻机的分辨率和套刻精度^[1-2]。波像差是评价光刻投影物镜成像质量的主要参数,高端光刻机投影物镜波像差已达到1 nm以下^[3-4];并且随着光刻机产率的提升,投影物镜热像差更加显著^[5];高精度、高速

收稿日期: 2014-10-15; 收到修改稿日期: 2014-11-17

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

原位波像差检测系统已成为高端光刻机的核心分系统。

高端光刻机原位波像差检测系统目前主要基于两种技术原理:阿斯麦(ASML)公司采用的 Ronchi 剪切干涉仪^[3]和尼康公司采用的哈特曼波前传感器^[6]。Ronchi 剪切干涉^[7-10]是一种采用了扩展光源调制光场空间相干性的剪切干涉,具有干涉仪结构简单、共光路、零条纹检测等优点,原理上能够比哈特曼技术实现更高的空间分辨率及检测精度,更适合用于光刻机投影物镜波像差原位检测。但高精度 Ronchi 干涉波像差检测技术目前是 ASML 公司的专有技术^[10],其检测原理、数据处理算法均作为技术秘密,未对外公开。Ray 等^[7-8]的相关研究仅考虑了 0、±1 级衍射的干涉,无法实现高精度测量。

本文基于 Ronchi 剪切干涉的投影物镜波像差检测技术及系统,根据光栅衍射和空间相干性理论推导了 Ronchi 剪切干涉场的表达式;分析了影响 Ronchi 剪切干涉相位提取精度的因素;提出了一种十步相移算法,消除了 Ronchi 剪切干涉仪多级衍射光寄生干涉对相位提取精度的影响,实现高精度相位提取;实验数据验证了理论推导的正确性和相位提取算法的有效性。

2 Ronchi 剪切干涉仪工作原理

Ronchi 剪切干涉投影物镜波像差检测系统的结构如图 1 所示。非相干的照明光束均匀照明位于被测投影物镜物面的物面光栅,形成均匀衍射光进入投影物镜光瞳,光束被位于投影物镜像面的像面光栅衍射,各衍射级次相互平移错位,形成多衍射级次横向剪切干涉。通过求解剪切方向正交的两组干涉条纹,获得被测投影物镜的波像差。

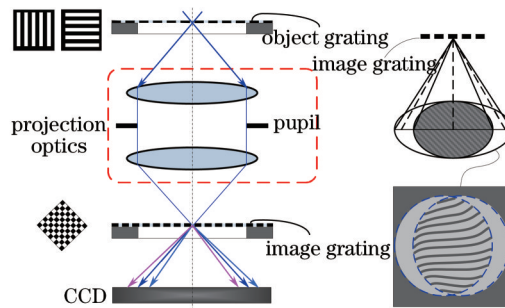


图 1 基于 Ronchi 剪切干涉的投影物镜波像差检测系统结构示意图

Fig.1 Schematic setup of projection lens aberration measurement system based on Ronchi shearing interferometer

相干成像原理如图 2(a)所示, L_c 为会聚透镜,透镜 L_1 和 L_2 分别对入射光波起到傅里叶变换的作用。根据 Köhler 照明^[11],光轴上的相干光源照射物平面,由于透镜 L_1 的作用,物镜光瞳面的复振幅就是物面光栅的傅里叶变换。

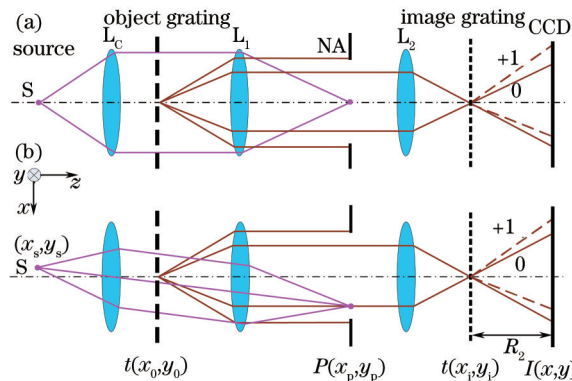


图 2 Ronchi 剪切干涉仪原理图。(a) 相干成像; (b) 部分相干成像

Fig.2 Schematic diagram of Ronchi shearing interferometer. (a) Coherent imaging; (b) partially coherent imaging

部分相干成像原理如图 2(b)所示,假设成像系统为线性不变系统,光轴外坐标为 (x_s, y_s) 的点光源 S 在光瞳面成像位置位于 (f_s, g_s) , 受该点光源照射的物面光栅的频谱发生相对位移,即

$$E(x_p, y_p; x_s, y_s) = \mathcal{F}[t(x_o, y_o; x_s, y_s)] = T(f_p - f_s, g_p - g_s), \quad (1)$$

式中 $t(x_o, y_o)$ 为物面光栅的复振幅透射率, (f_p, g_p) 为物面光栅在光瞳面上的频谱坐标, $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换。部分相干照明时, 照明光源由点光源扩展为具有一定尺寸的光源, 可以将光源面的各点看作相互独立、非相干的点光源, 则光瞳面上的光强等于各点光源以不同入射角入射到物面光栅后引起的光强分布的线性叠加。

对于孔径函数为 $P(x_p, y_p)$ 、波前分布函数为 $W(x_p, y_p)$ 的投影物镜, 光瞳面的复振幅为

$$E'(x_p, y_p) = E(x_p, y_p)P(x_p, y_p)\exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}W(x_p, y_p)\right]. \quad (2)$$

在 L_2 的焦平面, 投影物镜出射光入射到周期为 p_i 的像面 Ronchi 光栅上, 其复振幅透射率为

$$t(x_i - \Delta x_i, y_i) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp\left[j\frac{2n\pi}{p_i}(x_i - \Delta x_i)\right], \quad (3)$$

式中 C_n 为傅里叶系数, Δx_i 为光栅的横向移动量, 则像面光栅透射场复振幅为

$$E'(x_i, y_i) = E(x_i, y_i)t(x_i - \Delta x_i, y_i), \quad (4)$$

式中 $E(x_i, y_i)$ 为像面光栅上的复振幅, 数值上等于出瞳面复振幅 $E'(x_p, y_p)$ 的傅里叶变换。在距离像平面 R_2 的远场探测平面上, 形成带有投影物镜像差的光瞳的像, 其复振幅分布等于像面光栅透射场的傅里叶变换, 即

$$E(x, y; \Delta x_i) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n P\left(x - \frac{n\lambda R_2}{p_i}, y\right) E'\left(x - \frac{n\lambda R_2}{p_i}, y\right) \times \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}\left[W\left(x - \frac{n\lambda R_2}{p_i}, y\right)\right]\right\} \exp\left(-j2n\pi\frac{\Delta x_i}{p_i}\right), \quad (5)$$

式中 $E'(x, y)$ 表示投影物镜光瞳在探测平面的形式, 受到像面光栅的作用, 不同的光瞳像以 $n\lambda R_2/p_i$ 发生错位, n 为对应的衍射级次, 说明被衍射的、彼此重叠的光束将产生多重干涉条纹。

由于照明光束通过由物面光栅形成均匀衍射光进入投影物镜光瞳, 数值孔径内光强均匀, 设剪切量 $S = \lambda R_2/p_i$, 则探测平面上的光强分布为

$$I(x, y; \Delta x_i) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |C_n|^2 + \sum_{\substack{n=-\infty \\ m \neq n}}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} |C_m| |C_n| |\gamma(n-m)| \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda}[W(x-nS, y) - W(x-mS, y)] + (m-n)\frac{2\pi\Delta x_i}{p_i} + \alpha_{mn}\right\}, \quad (6)$$

式中 $\gamma(n-m)$ 为像面光栅的 n 级和 m 级衍射光的干涉条纹对比度, 数值等于空间相干度的绝对值, α_{mn} 表示光栅 n 和 m 级衍射的相位差。像面光栅的横向位移量 Δx_i , 在干涉图上表现为产生 $2\pi|n-m|\Delta x_i/p_i$ 的相移。

像面光栅使光瞳面上不同位置的点在探测平面上重合发生干涉, 光瞳面的空间相干性直接决定着像面光栅各衍射级次间能否干涉。根据 Van Cittert-Zernike 定理^[12]可知, 光场的空间相干性等于光源强度分布的归一化傅里叶变换, 由于物面放置的是 Ronchi 光栅, 光场的空间相干性与剪切量的关系如图 3 所示, 剪切量表现为不同衍射级次的差值^[13]。

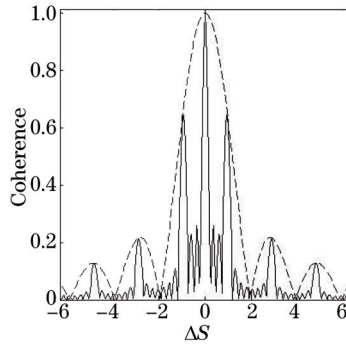


图 3 光场空间相干度与剪切量之间的关系

Fig.3 Relationship between spatial coherence and shear distance

由图 3 可以看出, Ronchi 光栅衍射的偶数次全部缺级, 且各衍射级次的差值等于除 0 外的偶数值时, 空间相干度为零。0 与 -1(或 +1) 级的相干度为 $2/\pi$, 衍射级次越高对干涉条纹的影响越来越小, 原因是随着衍射级次的增大, 衍射光强度逐渐减弱, 且空间相干度进一步减小。探测平面上只有各奇数衍射级与 0 级发生干涉, 其他级次之间互不干涉, 光强可表达为

$$I(x,y) = \sum_{n=-2k-1}^{2k+1} A_n^2 + 2 \sum_{n=-2k-1}^{2k+1} A_n A_0 \gamma(n) \times \cos\left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [W(x,y) - W(x-nS,y)] + n \frac{2\pi \Delta x_i}{p_i} - \alpha_n \right\}, \quad (7)$$

式中 k 为任意整数, $\gamma(n)$ 表示 n 级与 0 级衍射的干涉条纹对比度, α_n 为光栅 n 级和 0 级衍射的相位差。设 φ 为干涉条纹相位, 当不考虑相移且处于小剪切量情况下时, 有

$$\begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda} [W(x,y) - W(x-S,y)] \approx \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial W(x,y)}{\partial x} \cdot S = d\varphi \cdot S \\ \frac{2\pi}{\lambda} [W(x,y) - W(x+S,y)] \approx -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial W(x,y)}{\partial x} \cdot S = -d\varphi \cdot S \end{cases}, \quad (8)$$

考虑前 $\pm k$ 项干涉时, 干涉场表达式可写为

$$I(x,y) \approx 1.9798 + 1.6212 \times \cos(d\varphi \cdot S) + 0.09 \times \cos(\varphi_{-3}) + 0.09 \times \cos(\varphi_{+3}) + 0.0324 \times \cos(\varphi_{-5}) + 0.0324 \times \cos(\varphi_{+5}) + \dots + 2A_{-k}A_0\gamma(k)\cos(\varphi_{-k}) + 2A_kA_0\gamma(k)\cos(\varphi_{+k}), \quad (9)$$

式中认为 ± 1 级与 0 级之间为小剪切量, 可近似为波面梯度, 其他级次与 0 级干涉不是小剪切量, 分别用 $\varphi_{\pm 3}, \varphi_{\pm 5}, \dots, \varphi_{\pm k}$ 表示。当只考虑 0 级与 ± 1 级干涉时, 干涉场可表达为

$$I(x,y) = 1.8106 + 1.6212 \times \cos(d\varphi \cdot S). \quad (10)$$

在两个正交剪切方向进行差分波前相位提取, 进行波前重建后, 可以获得被测波像差^[14-17]。

比较(9)式和(10)式可以看出, 实际采集的干涉图中存在着多级衍射光寄生干涉, 影响剪切干涉相位提取精度。消除多级衍射光寄生干涉对相位提取精度的影响, 是 Ronchi 剪切干涉仪实现高精度波像差检测的前提。

3 相位提取

相位提取是干涉测量的重要步骤^[18], 相位提取精度的高低直接影响到最终的检测精度^[19]。Ronchi 剪切干涉是一种相移干涉方法, 通过像面光栅的移动, 可以在相邻衍射级次间引入相位差, 产生相移。但由于 Ronchi 剪切干涉中同时存在多衍射级次干涉, 因此, 无法采用经典的四步、五步、十三步等相移算法^[18]。

目前, 主流的 193 nm 光刻机以高数值孔径为主, 以数值孔径为 0.93 的投影物镜为例, 若像面光栅周期为 10 μm , 则剪切率为 1%。由于高于 ± 19 级的衍射项归一化强度低于 0.001, 基本不影响测量结果, 因此需要考虑 ± 19 级以内衍射寄生干涉的影响。光栅多级衍射寄生干涉对相位提取精度影响的级次越高, 相移算法的复杂度越高, 对相移器的要求越高。

当引入相移时, (7)式可改写为

$$I(x,y) \approx A + 2A_1A_0\gamma(1)[\cos(d\varphi \cdot S + \delta) + \cos(-d\varphi \cdot S - \delta)] + 2 \sum_{n=3}^{2k+1} A_nA_0\gamma(n)[\cos(\varphi_n + n\delta) + \cos(\varphi_{-n} - n\delta)], \quad (11)$$

式中 A 为背景光强, δ 为像面光栅沿剪切方向的相移量。

这里提出一种十步相移算法, 消除 ± 9 级以内多级衍射的影响, 相移量 δ 分别取 $0, \pi/6, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3, 5\pi/6, \pi, 5\pi/3, 3\pi/2, 11\pi/6$ 代入(11)式中, 干涉图光强分别为 $I_0 \sim I_{11\pi/6}$, 计算可得

$$\begin{cases} I_{\frac{3\pi}{2}} - I_{\frac{\pi}{2}} + I_{\frac{11\pi}{6}} - I_{\frac{\pi}{6}} + \sqrt{3} \left(I_{\frac{5\pi}{3}} - I_{\frac{\pi}{3}} \right) = 12A_1A_0\gamma(1)\sin(d\varphi \cdot S) \\ I_0 - I_{\pi} + I_{\frac{\pi}{3}} - I_{\frac{2\pi}{3}} + \sqrt{3} \left(I_{\frac{\pi}{6}} - I_{\frac{5\pi}{6}} \right) = 12A_1A_0\gamma(1)\cos(d\varphi \cdot S) \end{cases}, \quad (12)$$

则被测投影物镜沿剪切方向的相位为

$$\varphi \approx d\varphi \cdot S = \arctan \left[\frac{I_{\frac{3\pi}{2}} - I_{\frac{\pi}{2}} + I_{\frac{11\pi}{6}} - I_{\frac{\pi}{6}} + \sqrt{3} \left(I_{\frac{5\pi}{3}} - I_{\frac{\pi}{3}} \right)}{I_0 - I_{\pi} + I_{\frac{\pi}{3}} - I_{\frac{2\pi}{3}} + \sqrt{3} \left(I_{\frac{\pi}{6}} - I_{\frac{5\pi}{6}} \right)} \right]. \quad (13)$$

图 4 给出了采用该算法进行相位提取的仿真结果, 理论相位提取误差峰谷(PV)值为 0.0046 λ , 计算可得均方根(RMS)值为 0.0019 λ , 说明该算法可以实现高精度的相位提取。

对波像差如图5所示的投影物镜进行仿真,设剪切率为7.36%时,沿 x 方向依次引入位移 $0, \pi/6, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3, 5\pi/6, \pi, 5\pi/3, 3\pi/2, 11\pi/6$,根据(7)式仿真得到的干涉图分别如图6所示,图6可以明显看出沿剪切方向引入相移时干涉图案的相移效果。

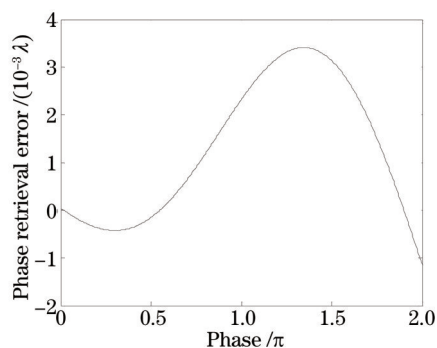


图4 相位提取误差仿真结果

Fig.4 Simulation result of phase retrieval error

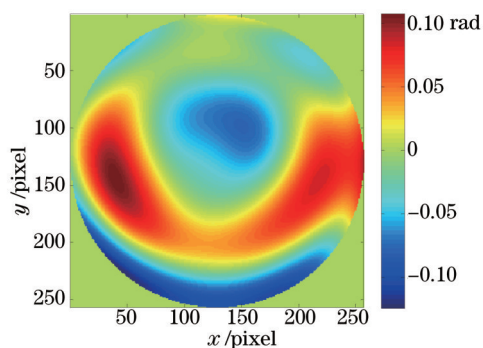


图5 被测投影物镜波像差仿真图

Fig.5 Simulated aberration pattern of projection lens under test

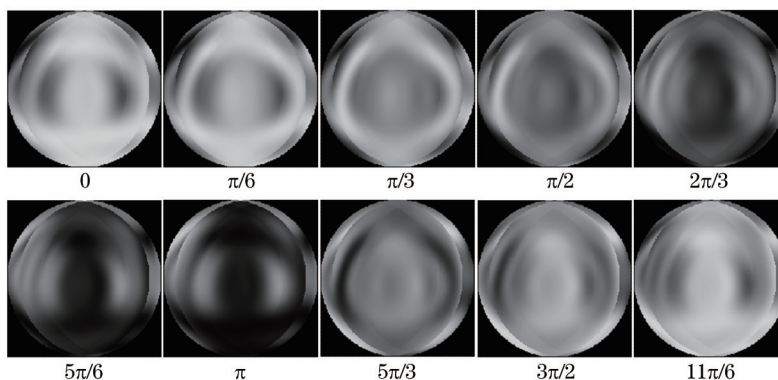


图6 采用十步相移法获得的沿 x 方向的剪切干涉仿真图

Fig.6 Simulated shearing interferograms in x direction with ten-step phase-shifting algorithm

4 实 验

实验装置如图7所示,光源为432 nm的发光二极管(LED)光源,被测物镜是成像放大倍数为10:1、数值孔径为0.25的标准显微物镜,物面光栅是周期为 $117.4 \mu\text{m}$ 的Ronchi光栅,像面光栅是周期为 $11.74 \mu\text{m}$ 的棋盘光栅,剪切率为7.36%。实验中在物面光栅上放置一块毛玻璃,使光束在被测投影物镜数值孔径内均匀照明。

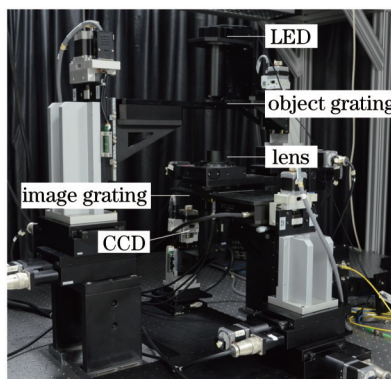


图7 基于Ronchi剪切干涉的波像差检测系统实验装置图

Fig.7 Experimental setup of Ronchi shearing interferometry for wave-front aberration measurement system

将物面光栅和像面棋盘光栅分别置于被测物镜的物面和像面,使棋盘光栅透光单元和遮光单元的对角线方向垂直于物面光栅的栅线方向,假定为 x 方向,沿 x 方向依次将像面光栅位移 $\pi/6, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3, 5\pi/6,$

π 、 $5\pi/3$ 、 $3\pi/2$ 、 $11\pi/6$, 所采集的剪切干涉图分别如图 8 所示。将物面光栅旋转 90° , 沿 y 方向依次将像面光栅位移 $\pi/6$ 、 $\pi/3$ 、 $\pi/2$ 、 $2\pi/3$ 、 $5\pi/6$ 、 π 、 $5\pi/3$ 、 $3\pi/2$ 、 $11\pi/6$, 所采集的剪切干涉图分别如图 9 所示。图 8 和图 9 可以看出实验系统得到了清晰的 Ronchi 剪切相移干涉图, 相移效果与图 6 所示的仿真干涉图相似, 验证了理论推导的正确性。

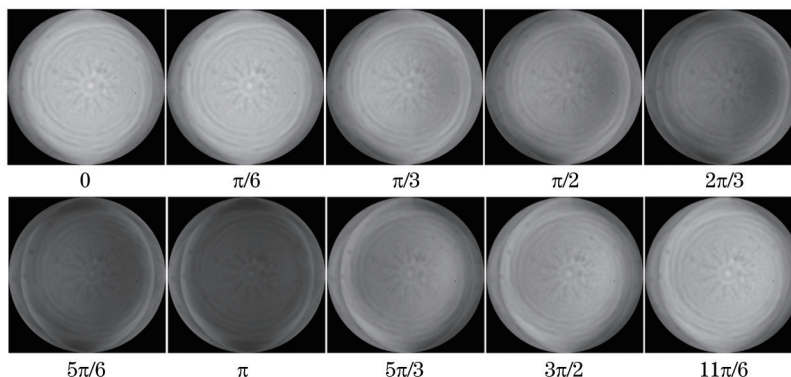


图 8 采用十步相移法获得的沿 x 方向的剪切干涉图

Fig.8 Shearing interferograms in x direction with ten-step phase-shifting algorithm

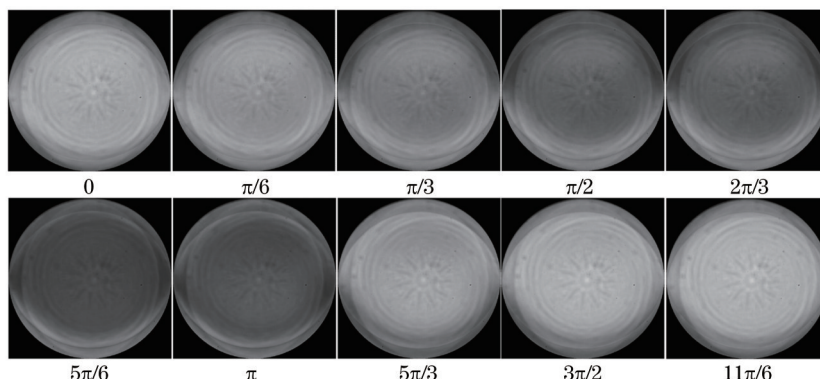


图 9 采用十步相移法获得的 y 方向的剪切干涉图

Fig.9 Shearing interferograms in y direction with ten-step phase-shifting algorithm

采用(12)式的十步相移算法对所采集的干涉图进行计算, 求出 x 方向和 y 方向的相位结果分别如图 10 (a)、(b)所示。采用差分 Zernike 波前重建算法, 可以获得被测物镜的波像差如图 11(a)所示, 经计算得到被测物镜波像差的 PV 值为 77.01 nm, RMS 值为 16.43 nm。经 Zernike 多项式拟合计算得到拟合的 Zernike 多项式系数如图 11(b)所示, 可以看出该被测物镜的波像差主要是低阶像差。

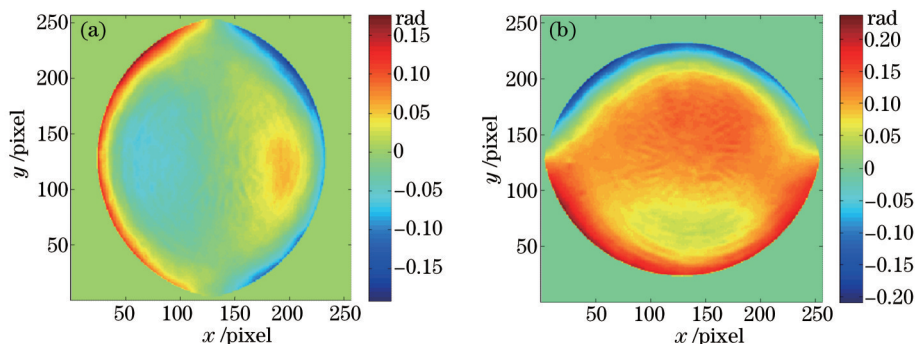


图 10 十步相移法计算相位结果。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig.10 Calculated phase with ten-step phase-shifting algorithm. (a) x direction; (b) y direction

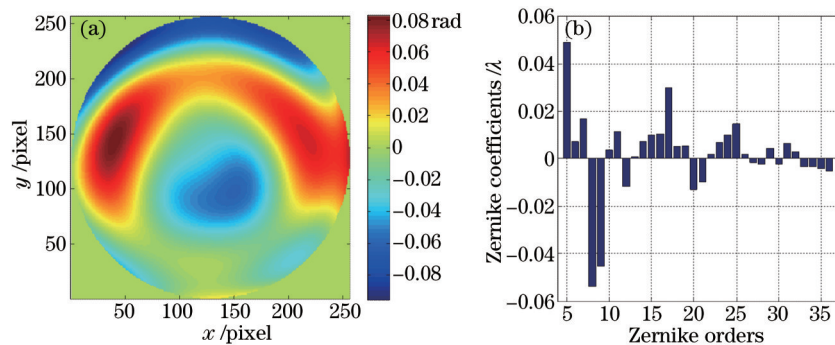


图 11 波前重建结果。(a) 重建波前; (b) Zernike 多项式系数

Fig.11 Results of wavefront reconstruction. (a) Reconstructed wavefront; (b) Zernike coefficients

5 结 论

本文研究基于 Ronchi 剪切干涉的投影物镜波像差检测系统, 在被测投影物镜物平面和像平面分别放置 Ronchi 光栅和棋盘光栅, 物面 Ronchi 光栅对光场空间相干性进行调制, 像面棋盘光栅对光束进行剪切, 通过沿剪切方向移动像面光栅实现相移。受到物面 Ronchi 光栅对光场空间相干性的调制作用, 像面棋盘光栅只有在与物面 Ronchi 光栅栅线垂直的方向上的衍射级次才能发生干涉, 且各衍射级次的差值等于除 0 外的偶数值时不发生干涉。

根据光栅衍射和空间相干性理论推导了 Ronchi 剪切干涉场的表达式, 分析了 Ronchi 剪切干涉相位提取精度的影响因素。提出一种消除 Ronchi 剪切干涉仪中光栅同时存在多级衍射相互影响引起的系统误差的十步相移算法, 可以有效地消除 ± 9 级以内多级衍射的影响, 减小系统误差, 理论上相位提取误差的 PV 值为 0.0046λ , RMS 值为 0.0019λ 。对该干涉仪进行实验验证, 其结果与理论结果一致, 很好地验证了该干涉仪的有效性。

参 考 文 献

- 1 Yuan Qiongyan, Wang Xiangzhao. Recent development of international mainstream lithographic tools[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(1): 57-64.
袁琼雁, 王向朝. 国际主流光刻机研发的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 57-64.
- 2 Yang Jishuo, Li Sikun, Wang Xiangzhao, *et al.*. Projection lens wave-front aberration measurement method based on aerial image denoising[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0111003.
杨济硕, 李思坤, 王向朝, 等. 基于空间像自适应降噪的投影物镜波像差检测方法[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0111003.
- 3 Bouchoms I, Leenders M, Kuit J J, *et al.*. Extending 1.35 NA Immersion lithography down to 1x nm production nodes[C]. SPIE, 2012, 8326: 83260L.
- 4 Boeij W P de, Pieternella R, Bouchoms I, *et al.*. Extending immersion lithography down to 1x nm production nodes[C]. SPIE, 2013, 8683: 86831L.
- 5 Bekaert J, Van Look L, Vandenberghe G, *et al.*. Characterization and control of dynamic lens heating effects under high volume manufacturing conditions[C]. SPIE, 2011, 7973: 79730V.
- 6 Fujii T, Kougo J, Mizuno Y, *et al.*. Portable phase measuring interferometer using Shack-Hartmann method[C]. SPIE, 2003, 5038: 726-732.
- 7 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.
- 8 A K Ray-Chaudhuri, K D Krenz, C H Fields. At-wavelength characterization of an extreme ultraviolet camera from low to mid-spatial frequencies with a compact laser plasma source[J]. J Vac Sci Technol B, 1997, 15(6): 2462-2466.
- 9 Braat J, Janssen A J E M. Improved Ronchi test with extended source[J]. J Opt Soc Am A, 1999, 16(1): 131-140.
- 10 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.

- 11 Wong A K K. Optical Imaging in Projection Microlithography[M]. SPIE Publications, 2005.
- 12 Born M, Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- 13 Wyant J C. White-light extended source shearing interferometer[J]. Appl Opt, 1974, 13(1): 200–202.
- 14 G Harbers, P J Kunst, G W Leibbrandt. Analysis of lateral shearing interferograms by use of Zernike polynomials[J]. Appl Opt, 1996, 35(31): 6162–6172.
- 15 Dai F Z, Tang F, Wang X Z, *et al.*. Generalized zonal wavefront reconstruction for high spatial resolution in lateral shearing interferometry[J]. J Opt Soc Am A, 2012, 29(9): 2038–2047.
- 16 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.
- 17 F Z Dai, F Tang, X Z Wang, *et al.*. Modal wavefront reconstruction based on Zernike polynomials for lateral shearing interferometry: comparisons of existing algorithms[J]. Appl Opt, 2012, 51(21): 5028–5037.
- 18 Malacara D. Optical Shop Testing[M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- 19 Zhang Min, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.*. Phase retrieval errors analysis of interferogram using two dimensional fast Fourier transform method[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308002.
张 敏, 唐 锋, 王向朝, 等. 二维快速傅里叶变换干涉图相位提取误差分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308002.

栏目编辑: 何卓铭