

点衍射干涉仪基准波前测试技术研究

邵 晶^{1,2} 马冬梅¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 针对点衍射干涉仪(PDI)的小孔衍射波前,提出了一种基于扩展奈波尔-泽尼克(Nijboer-Zernike)(ENZ)理论进行超高精度检测的方法。描述了点衍射干涉仪的工作原理和基于扩展 Nijboer-Zernike 多项式的相位恢复算法。分析了对光瞳函数利用 Zernike 多项式展开的方法。仿真实验中,当信噪比(SNR)为 55 dB,采用 10 bit 模数转换时,得到的 Zernike 系数中代表波像差的虚部的恢复误差不大于 3×10^{-5} 。从噪声和模数转换的角度通过模拟实验显示这种方法对实现小孔衍射波前超高精度的光学检测具有可行性。

关键词 测量;极紫外光刻;点衍射干涉仪;相位复原;扩展奈波尔-泽尼克

中图分类号 TH70;TH744.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0508003

Testing the Criterion Wavefront Diffracted by Point Diffraction Interferometer

Shao Jing^{1,2} Ma Dongmei¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A new method based on extended Nijboer-Zernike (ENZ) theory is proposed for testing the wavefront diffracted by a pinhole in the point diffraction interferometer (PDI). The principle of PDI is described and the phase retrieval algorithm based on ENZ is put forward. The way in expansion of the pupil function with Zernike polynomial is analysed. In the simulation experiment, deviation in the image part of the Zernike coefficients obtained from the retrieval result is less than 3×10^{-5} , when signal-to-noise (SNR) is 55 dB with a 10-bit analog-to-digital conversion. The effect of noise and the analog-digital conversion is only involved, the result in this simulation experiment just proves that testing the wavefront diffracted by a pinhole with this method is possible.

Key words measurement; extreme ultraviolet lithography; point diffraction interferometer; phase retrieval; extended Nijboer-Zernike

OCIS codes 150.3045; 260.7200; 080.1005; 080.1753; 080.5084; 120.3180

1 引 言

极紫外光刻(EUVL)技术是建立在传统光刻基础之上的下一代光刻技术,被寄希望于突破 22 nm 光刻节点。这不仅给光学设计增加了难度,也对光学元件的加工与检测提出了更高的要求。投影物镜非球面加工精度均方根(RMS)要达到 0.2~0.3 nm^[1],如果采用 632.8 nm 的工作波长,检测精

度要高于 $1.5 \times 10^{-4} \lambda$ 。点衍射干涉仪(PDI)不同于传统的干涉仪,它使用小孔衍射产生的理想球面波作为基准波面,从而实现波像差的高精度测量。点衍射干涉仪常被用于光刻投影物镜光学元件与系统波像差的高精度测试^[2]。

点衍射干涉仪通过会聚光束照明小孔产生理想的球面波,作为测量基准波面。小孔的圆度、边缘粗

收稿日期:2010-12-06;收到修改稿日期:2011-02-21

基金项目:国家科技重大专项资助课题。

作者简介:邵 晶(1984—),男,博士研究生,主要从事光学波前检测等方面的研究。E-mail:qunyong12@163.com

导师简介:马冬梅(1963—),女,研究员,博士生导师,主要从事光学检测等方面的研究。

E-mail:dongmei_ma2002@yahoo.com.cn

糙度和膜层及基板的厚度等都将影响衍射产生的球面光波的质量。同时,点衍射干涉仪中的会聚照明光束应准确照明小孔。否则,照明光束的对准误差也会引入多种波像差并降低参考球面光束的能量。因此,对小孔衍射光束质量测评和小孔装调效果评估在点衍射干涉仪研制过程中是重要环节之一。

Toshiaki Matsuura 等^[3]研制了双光纤点衍射干涉仪,并对测试误差做了实验研究。他们利用双光纤衍射波面干涉产生相干条纹,对两个球面波之间的差异进行分析。卢增雄等^[4]使用矢量衍射理论分析了小孔衍射波前的质量。但是对于小孔衍射光束质量的直接测评目前仍是一个难题。

通过相位复原算法,直接对光学系统的点扩散函数(PSF)进行采样分析,从而得到光学系统的波前误差^[5~9]。文献[10]提出的奈波尔-泽尼克(Nijboer-Zernike)理论用于计算光学系统的点扩散函数。2002年 Augustus J. E. M. Janssen 等^[11,12]推导了 Nijboer-Zernike 离焦的数学表达,得到了扩展 Nijboer-Zernike(ENZ)多项式。利用 Zernike 多项式乘以复数系数展开光瞳函数,能够分析出瞳非均匀照明情况下光学系统焦面附近的光强分布。2003年 Peter Dirksen 等^[13]又提出了利用扩展 Nijboer-Zernike 理论反推光学系统光瞳函数的数学算法。这种方法可以解决原有相位恢复算法中出瞳振幅分布不均匀和快速傅里叶变换引入计算误差的问题。

点衍射干涉仪中小孔衍射图像的光强分布亦可认为是点扩散函数(PSF)的形式。本文运用基于扩展 Nijboer-Zernike 理论的相位复原方法,对小孔的衍射波面检测技术进行研究。

2 点衍射干涉仪工作原理

点衍射干涉仪通过会聚光束照明小孔产生理想的球面波。一部分光束作为测试光照射到被测元件

的表面后,经小孔板反射回来;另一部分光束作为参考光束与反射回来的测试光束干涉生成干涉图样,由 CCD 探测器接收,从而完成干涉测量(图 1)。小孔的加工质量和对小孔板装调的效果直接影响了参考光束和测试光束的质量。可以通过对小孔衍射波前直接测试,完成对小孔加工质量和装调效果的评价^[2]。

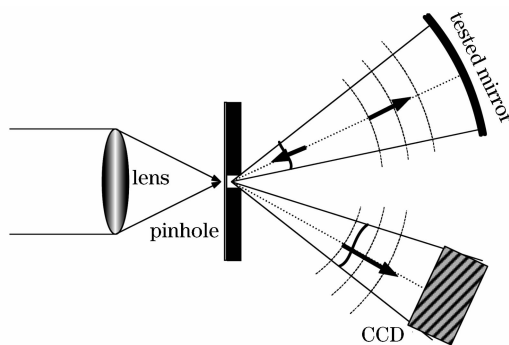


图 1 点衍射干涉仪原理图
Fig. 1 Schematic of PDI

3 对于小孔衍射波前的相位复原

小孔衍射图样的光强分布可以看作光学系统的点扩散函数形式,图 2 展示了对针孔衍射波前测试的原理装置。利用物镜将照明光束会聚到小孔上;由高倍显微物镜和 CCD 探测器对衍射图样进行采集。显微物镜和 CCD 被置于精密导轨上,用于对图样的离焦采集。

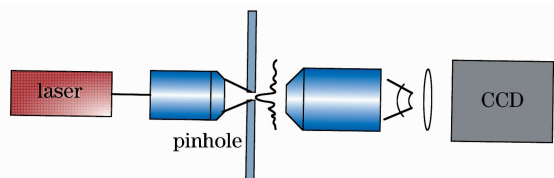


图 2 衍射波前测试示意图

Fig. 2 Schematic of system used in testing wavefront

在成像系统中,点扩散函数与光瞳函数的关系可以表示为

$$U(x, y) = \frac{1}{\pi} \iint_{u^2+v^2 \leq 1} \exp[i(u^2 + v^2)f]P(u, v) \exp(2\pi iux + 2\pi iuy) dvdu = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \exp(if\rho^2)P(\rho, \vartheta) \exp[2\pi i\rho r \cos(\vartheta - \varphi)] \rho d\rho d\vartheta, \quad (1)$$

式中 $P(u, v)$ 为光瞳函数, (u, v) 为光瞳的归一化笛卡尔坐标, f 为离焦因子。 (x, y) 以及 f 为像面处的归一化坐标,与实际像面坐标的关系为

$$x = X \frac{2\pi d_{NA}}{\lambda}, \quad y = Y \frac{2\pi d_{NA}}{\lambda}, \quad f = \frac{2\pi Z}{\lambda} (1 - \sqrt{1 - d_{NA}^2}), \quad (2)$$

式中 d_{NA} 为像面处的数值孔径(NA),这里是指对小孔衍射波前采样的数值孔径。光瞳函数表征为

$$P(u, v) = A(u, v) \exp[i\Phi(u, v)], \quad (3)$$

如果光瞳被均匀照明

$$P(u, v) = A \exp[i\Phi(u, v)] = A \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i\Phi)^k}{k!} \approx 1 + i\Phi, \quad (4)$$

这种近似表示会给计算引入高阶误差,但是如果光学系统的误差足够小,这种近似是可行的而且便于计算。

对于非均匀照明的情况,可以将光瞳函数展开为 Zernike 多项式的线性组合^[11,14]

$$P(u, v) = \sum \beta_n^m Z_n^m(u, v) = \sum \beta_n^m R_n^m(\rho) \cos(m\vartheta), \quad (5)$$

为了简便起见,这里只考虑余弦项。其中 $n, m \geq 0$; β_n^m 为复数。对于较大的误差,需要很多项来线性表示。

由(1)式可以得到表达式

$$U(r, \varphi) = \sum \beta_n^m \frac{1}{\pi} \int_0^1 \exp(iff\rho^2) R_n^m(\rho) \int_0^{2\pi} \cos[m(\vartheta + \varphi)] \exp(2\pi i \rho r \cos \vartheta) d\vartheta d\rho, \quad (6)$$

根据

$$\int_0^{2\pi} \cos[m(\vartheta + \varphi)] \exp(2\pi i \rho r \cos \vartheta) d\vartheta = 2\pi i^m J_m(2\pi \rho r) \cos(m\varphi), \quad (7)$$

得到

$$U(r, \varphi) = \sum \beta_n^m 2i^m \int_0^1 \exp(iff\rho^2) \rho R_n^m(\rho) J_m(2\pi \rho r) d\rho \cos(m\varphi) = \sum \beta_n^m 2i^m V_n^m(r, f) \cos(m\varphi), \quad (8)$$

其中

$$V_n^m(r, f) = \int_0^1 \exp(iff\rho^2) \rho R_n^m(\rho) J_m(2\pi \rho r) d\rho, \quad (9)$$

2002年 Augustus J. E. M. Janssen 等^[11~13,15,16]将 Nijboer-Zernike 多项式理论进行了扩展,用级数的形式展开 V_n^m 代数式

$$V_n^m(r, f) = \exp(iff) \sum_{l=1}^{\infty} (-2if)^{l-1} \sum_{j=0}^p \nu_{lj} \frac{J_{m+l+2j}(v)}{v^l}, \quad (10)$$

式中

$$\nu_{lj} = (-1)^p (m+l+2j) \binom{m+j+l-1}{l-1} \binom{j+l-1}{l-1} \binom{l-1}{p-j} \bigg/ \binom{q+l+j}{l}, \quad (11)$$

$l = 1, 2, 3, \dots; j = 0, 1, \dots, p$ 。同时

$$v = 2\pi r, \quad p = \frac{n-m}{2}, \quad q = \frac{n+m}{2}, \quad l > 3|f|. \quad (12)$$

(11)式中组合数的表达式满足

$$\binom{n}{k} = \begin{cases} \frac{n!}{k!(n-k)!} & (n \geq k) \\ 0 & (n < k) \end{cases}, \quad (13)$$

可以得到点扩散函数的光强表达式

$$I = 4\beta_0^0 |V_0^0|^2 + 8 \sum_{n,m} \beta_0^0 \operatorname{Re}(\beta_n^m) \operatorname{Re}(i^m V_n^m V_0^{0*}) \cos(m\varphi) - 8 \sum_{n,m} \beta_0^0 \operatorname{Im}(\beta_n^m) \operatorname{Im}(i^m V_n^m V_0^{0*}) \cos(m\varphi) + C(x, y), \quad (14)$$

式中“/”代表 $n = m = 0$ 项已被删除, $C(x, y)$ 为交叉项,可表示为

$$C(x, y) = 4 \sum_{n_1, m_1, n_2, m_2} \operatorname{Re}(\beta_{n_1}^{m_1} \beta_{n_2}^{m_2*} i^{m_1 - m_2} V_{n_1}^{m_1} V_{n_2}^{m_2*}) \cos(m_1 \varphi) \cos(m_2 \varphi), \quad (15)$$

式中“/”表示所有 $n_1 = m_1 = 0$ 或者 $n_2 = m_2 = 0$ 项被删除。

如果忽略交叉项的影响,得到

$$I \approx I_d = 4\beta_0^0 |V_0^0|^2 + 8 \sum_{n,m} \beta_0^0 \operatorname{Re}(\beta_n^m) \operatorname{Re}(i^m V_n^m V_0^{0*}) \cos(m\varphi) - 8 \sum_{n,m} \beta_0^0 \operatorname{Im}(\beta_n^m) \operatorname{Im}(i^m V_n^m V_0^{0*}) \cos(m\varphi), \quad (16)$$

对采样光强进行余弦变换,得到

$$I_d^m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I(r, \varphi; f) \cos(m\varphi) d\varphi \approx \begin{cases} \frac{1}{2}(\beta_0^0)^2 \chi_0^0 + \sum_n' \beta_0^0 \operatorname{Re}(\beta_n^0) \chi_n^0 + \sum_n' \beta_0^0 \operatorname{Im}(\beta_n^0) \Psi_n^0 & (m = 0) \\ \sum_n \beta_0^0 \operatorname{Re}(\beta_n^m) \chi_n^m + \sum_n \beta_0^0 \operatorname{Im}(\beta_n^m) \Psi_n^m & (m > 0) \end{cases}, \quad (17)$$

式中

$$\chi_n^m = 8\epsilon_m \operatorname{Re}[i^m V_n^m(r, f) V_0^{0*}(r, f)], \quad (18)$$

$$\Psi_n^m = -8\epsilon_m \operatorname{Im}[i^m V_n^m(r, f) V_0^{0*}(r, f)], \quad (19)$$

如果 $m = 0, \epsilon_m = 1$; 其他, $\epsilon_m = 0.5$ 。

定义内积为

$$(\psi, x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \psi(r, f) x^*(r, f) r dr df, \quad (20)$$

当 $m = 0; n, n' = m, m + 2, \dots$, 得到方程组

$$\begin{cases} \frac{1}{2}(\beta_0^0)^2 (\chi_0^0, \chi_{n'}^0) + \sum_n' \beta_0^0 \operatorname{Re}(\beta_n^0) (\chi_n^0, \chi_{n'}^0) \approx (I_d^0, \chi_{n'}^0) \\ \sum_n' \beta_0^0 \operatorname{Im}(\beta_n^0) (\Psi_n^0, \Psi_{n'}^0) \approx (I_d^0, \Psi_{n'}^0) \end{cases}, \quad (21)$$

当 $m = 1, 2, 3, \dots; n, n' = m, m + 2, \dots$, 得到方程组

$$\begin{cases} \sum_n' \beta_0^0 \operatorname{Re}(\beta_n^m) (\chi_n^m, \chi_{n'}^m) \approx (I_d^m, \chi_{n'}^m) \\ \sum_n' \beta_0^0 \operatorname{Im}(\beta_n^m) (\Psi_n^m, \Psi_{n'}^m) \approx (I_d^m, \Psi_{n'}^m) \end{cases}, \quad (22)$$

这里假设 β_0^0 为实数, 求解方程组就可以得到系数 β_n^m 。为了消除交叉项引入的高阶误差, 引入了 Predictor-Corrector 迭代算法。将求解的系数 $\beta_n^m(K)$ 代入交叉项(15)式 $C(x, y)$ 中, 使用 $I - C(x, y; k)$ 替换测得的光强 I 进行下一步迭代运算, 最终得到求解系数 β_n^m 。将系数 β_n^m 代入(5)式, 对获得的光瞳函数提取相位和振幅, 便可以获得小孔的衍射波前。

4 光瞳的 Zernike 多项式展开

如果将光瞳函数 $P(x, y)$ 使用 Zernike 多项式的有限项数展开, 如(5)式所示, 则使用 Zernike 多

项式展开光瞳函数的精度要高于 $10 \times 10^{-5} \lambda$, 而且参与拟合的 Zernike 多项式项数也决定了采用扩展 Nijboer-Zernike 理论进行相位复原的计算量。因此需要建立实验模型, 进行模拟分析。

假设光瞳函数为

$$P(x, y) = [A_2^0 Z_2^0(x, y) + 2] \exp[iB_3^1 Z_3^1(x, y)] = a + bi, \quad (23)$$

A_2^0, B_3^1 选不同取值, 使用不同项数的 Zernike 多项式拟合^[17], 利用拟合的数值与设定的光瞳函数实部与虚部分别相减后取绝对值 $|\Delta a|, |\Delta b|$, 得到的拟合误差峰谷值 $K_{PV}(|\Delta a|), K_{PV}(|\Delta b|)$ 如表 1 所示。

表 1 采用不同项数的 Zernike 多项式展开结果

Table 1 Result of fitting error with different terms of Zernike polynomial

Number of terms	$A_2^0 = -1, B_3^1 = 0.0628$		$A_2^0 = -1, B_3^1 = 0.628$		$A_2^0 = -0.1, B_3^1 = 0.628$	
	36	64	64	128	64	128
$K_{PV}(\Delta a)$	1.6261×10^{-7}	5.8188×10^{-8}	5.7679×10^{-4}	1.1918×10^{-6}	5.1382×10^{-4}	1.6086×10^{-6}
$K_{PV}(\Delta b)$	1.2825×10^{-5}	1.0358×10^{-9}	1.0103×10^{-4}	4.8695×10^{-6}	2.3350×10^{-4}	1.0790×10^{-6}

表 1 的实验结果表明, 增加参与拟合的 Zernike 多项式项数可以减少拟合误差, 并且使用 Zernike 多项式线性组合的方式展开光瞳函数可以达到足够的精度。第一组数据 $A_2^0 = -1, B_3^1 = 0.0628$ 与第

二组 $A_2^0 = -1, B_3^1 = 0.628$ 进行比较, 其中具有数值差异的 B_3^1 代表了出瞳的波前像差, 可以看出, 对于 0.01λ 的彗差, 36 项 Zernike 多项式参与拟合完全可以满足 $10 \times 10^{-5} \lambda$ 的拟合精度, 而对于 0.1λ 彗差, 如

果要达到同样的拟合精度,参与拟合的 Zernike 多项式项数要明显增加,从而计算量也会大大增多。第二组数据 $A_2^0 = -1, B_3^1 = 0.628$ 与第三组数据 $A_2^0 = -0.1, B_3^1 = 0.628$ 进行比较,其中具有数值差异的 A_2^0 代表了出瞳的非均匀照明,可以看出,对于出瞳非均匀照明的情况,参与拟合的 Zernike 项数的选择不会给计算引入较大误差。

5 仿真实验结果

对衍射小孔的直径为 $0.5 \mu\text{m}$,衍射光束的数值孔径为 0.5 ,照明光束的工作波长等于 $0.6328 \mu\text{m}$,建立光瞳函数为 $P(x, y) = 1 + (-0.4 + 0.0628i)Z_2^0$ 的模型,进行仿真分析,得到点扩散函数的振幅分布为 $U(x, y) = 2[V_0^0 + (-0.4 + 0.0628i)V_2^0]$,其中对点扩散函数的采样半径为 $2 \mu\text{m}$,采样点数为 300×300 ,得到焦距从 $-6 \sim 6 \mu\text{m}$ 等间隔分布的点扩散函数的光强分布,如图 3 所示。在没有噪声和模数转换影响的情况下,随着迭代次数的增加,相位恢复误差迅速减小,如图 4 所示。可以看出 Predictor-Corrector 方法具有良好的收敛性。然后对图像加入不同强度的高斯白噪声和不同位数的模数转换 (AD) 后,利用扩展 Nijboer-Zernike 多项式进行相位恢复,迭代 20 次的结果如表 2 所示,信噪比 (SNR) 为 55 dB ,采用 10 bit 的模数转换,该相位恢复方法仍然具有良好的收敛性,由于系数 β_n^m 的虚部表征了系统的波像差,而实验结果表明这种情况下,恢复的虚部误差并不大于 3×10^{-5} ,这表明,利用可见光照明实现测量精度达到 0.2 nm 的超高精度波像差检测是可能的。当信噪比降到 25 dB 时,虽然测量

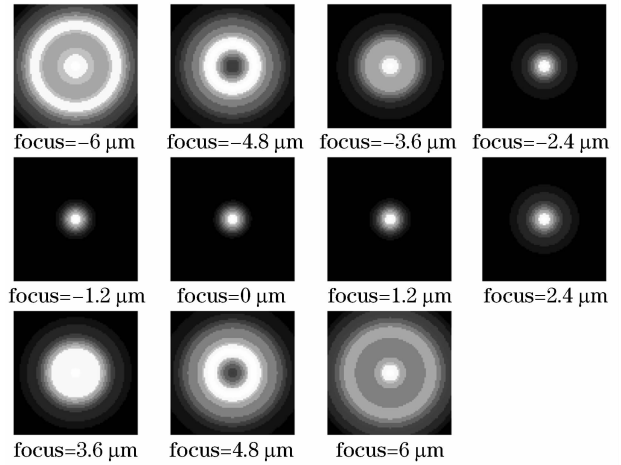


图 3 不同离焦位置处的点扩散函数

Fig. 3 PSF with different defocuses

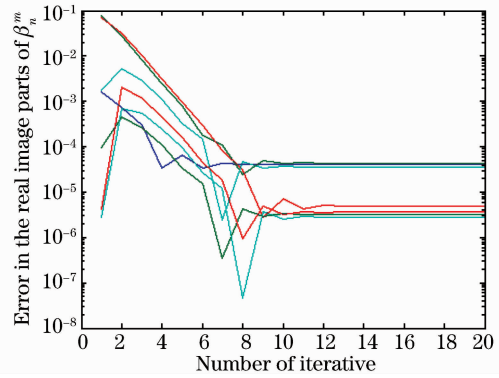


图 4 随迭代次数变换的误差曲线

Fig. 4 Error of β_n^m with different iterative number

误差有所增加,但是该方法仍具有较好的收敛性。这说明采用此方法可以有效解决交叉项引入高阶误差的问题。

表 2 不同信噪比和模数转换下的实验结果

Table 2 Result of the experiment with different SNR and AD

	β_n^m	$\text{SNR} \rightarrow \infty$	$55 \text{ dB SNR}; 10 \text{ bit AD}$	$25 \text{ dB SNR}; 10 \text{ bit AD}$
$n=0, m=0$	1	0.99996	0.99996	1.0001
$n=2, m=0$	$-0.4 + 0.0628i$	-4.0004×10^{-1} $+ 6.2797 \times 10^{-2}i$	-4.0005×10^{-1} $+ 6.2801 \times 10^{-2}i$	-4.0052×10^{-1} $+ 6.2775 \times 10^{-2}i$
$n=4, m=0$	0	4.8702×10^{-6} $-3.6275 \times 10^{-6}i$	1.8685×10^{-5} $+ 1.3989 \times 10^{-8}i$	4.4569×10^{-4} $+ 2.1787 \times 10^{-5}i$
$n=6, m=0$	0	3.6241×10^{-5} $-2.8211 \times 10^{-6}i$	1.0757×10^{-4} $-4.3580 \times 10^{-5}i$	-6.2468×10^{-4} $+ 6.4399 \times 10^{-4}i$

6 结 论

提出了一种利用扩展 Nijboer-Zernike 理论对小孔衍射波前进行检测的方法。分析了将光瞳函数利用 Zernike 多项式展开的方式。对于含有较大波

像差的光瞳函数应使用更多项数的 Zernike 多项式线性组合展开。同时模拟具有小像差光瞳函数 $P(x, y) = 1 + (-0.4 + 0.0628i)Z_2^0$ 的点扩散函数,并进行了加入噪声和模数转换的仿真实验,在信噪

比为55 dB,采用10 bit模数转换的情况下,Zernike系数中代表波像差的虚部的恢复误差要小于 10^{-4} 。实验结果证明,通过这种方法对点衍射干涉仪的小孔衍射波前进行精度高于 $10^{-4}\lambda$ 的检测是可能的。这为后续的实际检测实验提供了理论依据。同时,如果噪声过大,此种检测方法的误差将会增大。

从噪声和模数转换的角度初步分析了这种方法对实现小孔衍射波前的超高精度光学检测的可行性。但是其他因素也会对检测精度产生影响,比如采样系统离焦位置的偏差、小孔衍射光束的采样数值孔径的偏差、测试环境中振动和温度变化的影响等。同时如果采样数值孔径大于0.8时,也需要考虑偏振的影响。

参 考 文 献

- 1 K. Otaki, Y. Zhu, M. Ishii *et al.*. Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL [C]. *SPIE*, 2004, **5193**:182~190
- 2 Kazuya Ota, Takahiro Yamamoto, Yusuke Fukuda *et al.*. Advanced point diffraction interferometer for EUV aspherical mirrors [C]. *SPIE*, 2001, **4343**:543~550
- 3 Toshiaki Matsuura, Satoru Okagaki, Takaaki Nakamura *et al.*. Measurement accuracy in phase-shifting point diffraction interferometer with two optical fibers [J]. *Opt. Rev.*, 2007, **14**(6):401~405
- 4 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Zhang Lichao *et al.*. Wave-front quality analysis of three-dimension pinhole vector diffractive in extreme ultraviolet region [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10):2849~2854
卢增雄,金春水,张立超等.极紫外三维小孔矢量衍射波面质量分析[J].*光学学报*, 2010, **30**(10):2849~2854
- 5 Mao Heng, Wang Xiao, Zhao Dazun. Experimental validation and phase retrieval algorithm of complicated pupil wavefront [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3):575~581
毛 珩,王 潇,赵达尊.复杂光瞳波前相位恢复算法与实验验证[J].*光学学报*, 2009, **29**(3):575~581
- 6 Ma Dongmei, Chen Tuquan, Liu Zhixiang *et al.*. Application of phase retrieval technology in evaluation of optical imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(12):2912~2918
马冬梅,陈土泉,刘志祥等.位相复原技术在光学成像质量测评中的应用[J].*光学精密工程*, 2009, **17**(12):2912~2918
- 7 Wu Yuanhao, Wang Bin, Zhao Jinyu *et al.*. Restoration of broadband white light image using phase diversity technique [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8):1849~1854
吴元昊,王 斌,赵金宇等.利用相位差异技术恢复宽带白光图像[J].*光学精密工程*, 2010, **18**(8):1849~1854
- 8 Ma Dongmei, Chen Tuquan. Research on wavefront phase testing of point diffraction [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(11):2390~2397
马冬梅,陈土泉.点衍射波前位相的测评[J].*光学精密工程*, 2010, **18**(11):2390~2397
- 9 Huang Lixin, Yao Xin, Cai Dongmei *et al.*. A high accuracy and fast iterative algorithm for phase retrieval [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5):1218~1221
黄利新,姚 新,蔡冬梅等.一种快速高精度的相位恢复迭代算法[J].*中国激光*, 2010, **37**(5):1218~1221
- 10 B. R. A. Nijboer. *The Diffraction Theory of Aberrations* [D]. Groningen: University of Groningen, 1942
- 11 Augustus J. E. M. Janssen. Extended Nijboer-Zernike approach for the computation of optical point-spread functions [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(5):849~856
- 12 Joseph Braat, Peter Dirksen, Augustus J. E. M. Janssen. Assessment of an extended Nijboer-Zernike approach for the computation of optical point-spread functions [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(5):858~870
- 13 Peter Dirksen, Joseph Braat, Augustus J. E. M. Janssen *et al.*. Aberration retrieval using the extended Nijboer-Zernike approach [C]. *SPIE*, 2003, **4691**:61~68
- 14 Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics* [M]. 7th edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 522~527
- 15 C. Van Der Avoort, J. J. M. Braat, P. Dirksen *et al.*. Aberration retrieval from the intensity point-spread function in the focal region using the extended Nijboer-Zernike approach [J]. *J. Mod. Opt.*, 2005, **52**(12):1695~1728
- 16 M. Abramowitz, I. A. Stegun. *Handbook of Mathematical Functions* [M]. New York: Dover, 1970. 480~481
- 17 Daniel Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. Third Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 516~525