

相移点衍射干涉仪用衍射板结构设计

郑 猛 李艳秋 刘 克

(北京理工大学光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 相移点衍射干涉仪(PS/PDI)的检测精度取决于衍射板中针孔衍射产生的参考球面波质量,而针孔的直径是影响参考球面波质量的一个重要因素。基于矢量衍射理论,以会聚光束作为入射光,分析了针孔厚度和直径、加工误差以及入射光源单项像差和综合像差对衍射波面质量的影响。仿真数据表明,为了获得数值孔径为0.2,波前误差均方根(RMS)值不大于 $1.4 \times 10^{-3} \lambda$ 的理想球面波,在针孔的实际加工制作中,应选200 nm厚度铬膜,直径为 $1.5 \mu\text{m}$ 的针孔,并且满足仿真误差要求;对衍射板上窗口尺寸进行了仿真,结果表明窗口边长取 $60 \mu\text{m}$ 时,仿真结果最优。用实验验证了设计结果的可行性。

关键词 测量;光学检测;相移点衍射干涉仪;波前误差;时域有限差分

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.031201

Design of Mask for Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer

Zheng Meng Li Yanqiu Liu Ke

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The quality of the reference wavefront is constrained by the diameter of pinhole, which is the critical element that determines the precision of phase-shifting point diffraction interferometer (PS/PDI). The effects of film thickness, diameter of the pinhole, machining error and single and multiple aberrations of incident light on the diffraction wavefront errors are analyzed based on the vector diffraction theory. The analysis shows that in order to obtain a reference wavefront with a numerical aperture of 0.2 and a root-mean-square (RMS) wavefront error below $1.4 \times 10^{-3} \lambda$, the best choice for the pinhole is the material chromium with a thickness of 200 nm and diameter of $1.5 \mu\text{m}$, and the simulation error requirements should be satisfied in machining. The test window size is optimized based on the spatial frequency domain analysis. The results reveal that the optimal window size is approximately $60 \mu\text{m}$. Experiments are carried out for the designed mask to verify the feasibility.

Key words measurement; optical testing; phase-shifting point diffraction interferometer; wavefront error; finite difference time domain

OCIS codes 120.3180; 120.4640; 260.1960; 070.7345

1 引言

相移点衍射干涉仪(PS/PDI)是到目前为止应用于极紫外(EUV)光刻投影物镜波像差检测的精度最高的设备,其检测精度可以达到亚纳米级^[1~3]。PS/PDI不需参考元件,而是用针孔衍射来产生参考球面波,因此测量结果不受标准镜头加工精度的限制,检测精度很高。点衍射板是PS/PDI的重要元件,它的结构包括一个针孔和一个窗口。针孔的大小和形状决定着干涉仪的精度,窗口用于透过光栅分束后的1级衍射光。针孔的制作比较困难,并且对衍射波前误差有重要的影响。

对于针孔衍射,国内外文献集中于基于矢量衍射理论进行仿真研究^[4~6],并得到满足需要的针孔加工参

收稿日期: 2012-12-19; 收到修改稿日期: 2012-12-29; 网络出版日期: 2013-02-05

基金项目: 国家科技重大专项资助课题。

作者简介: 郑 猛(1977—),男,博士,主要从事光学检测与精密仪器等方面的研究。E-mail: zhm@bit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn

数。PS/PDI 用于投影物镜的检测比用于单一镜片的检测^[7,8]更复杂,投影物镜的像差也会影响针孔衍射球面波的波前误差^[1]。

本文对可见光波段的 PS/PDI 用衍射板进行了设计仿真,系统地说明了针孔直径和膜厚的选取,同时分析了针孔加工误差、入射光源单项像差及综合像差对衍射波前误差的影响,完善了透射测试光的窗口的选择依据。所用方法同样适用于极紫外波段 PS/PDI。

2 PS/PDI 原理与仿真方法

为了对极紫外波段 PS/PDI 的开发提供技术积累,建立了可见光波段 PS/PDI 原理装置^[9,10],如图 1 所示。

光源发出的光束经过待测物镜物方焦面针孔滤波后,由二元光栅分束,经过待测物镜后,携带了待测物镜波像差信息,在待测物镜像方焦面上形成了若干个衍射级;点衍射板位于待测物镜像方焦面,0 级光通过针孔衍射形成球面参考波,1 级光通过窗口携带了待测物镜波像差信息作为测试波,在 CCD 感光面上形成干涉条纹;沿垂直于光栅刻线的方向驱动光栅,可以在 1 级衍射光中引入周期性的相移,利用多幅移相干涉图计算出待测物镜的波像差。

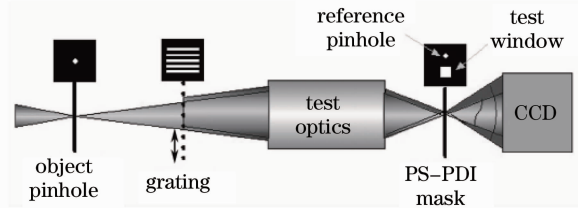


图 1 PS-PDI 测量示意图

Fig. 1 Principle of the PS-PDI measurement

在 PS/PDI 中用于产生近于理想球面波的像方针孔尺寸较小,采用严格的矢量衍射理论^[11,12]进行分析。计算的步骤为:1)数值孔径为 0.2 的会聚波垂直入射到针孔上,由矢量模型计算得小孔附近的场分布;2)将近场分布传播到远场,得到远场分布;3)计算波前误差。窗口尺寸采用计算频域对比度的方法得到。

3 设计结果与分析

3.1 针孔直径与膜厚的选择

通常点衍射板的针孔直径取值为^[4]

$$d = 0.5\lambda/NA, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, NA 为数值孔径。对于波长 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 的可见光来说,测量数值孔径为 0.2 的物镜,针孔直径的经验值为 $d=1.582 \mu\text{m}$,所以将针孔直径的优化范围确定为 $0.6\sim 2.4 \mu\text{m}$ 。点衍射板采用铬(Cr)膜,铬的复折射率为 $2.65+3i$,铬膜厚度优化范围为 $100\sim 220 \text{ nm}$,X 方向偏振数值孔径为 0.2 的会聚波入射。参照 EUV 波段光刻物镜波像差检测干涉仪要达到的测量精度为均方根(RMS)值 $7\times 10^{-3}\lambda$,可见光波段同样要达到 RMS 值 $7\times 10^{-3}\lambda$ 的测量精度。仿真精度通常取测量精度的 $1/5$ ^[4],则在可见光波段,干涉仪的测量精度要达到 $7\times 10^{-3}\lambda\text{RMS}$ 时,仿真精度至少要达到 $1.4\times 10^{-3}\lambda(\text{RMS})$ 。优化仿真的步骤如图 2 所示。

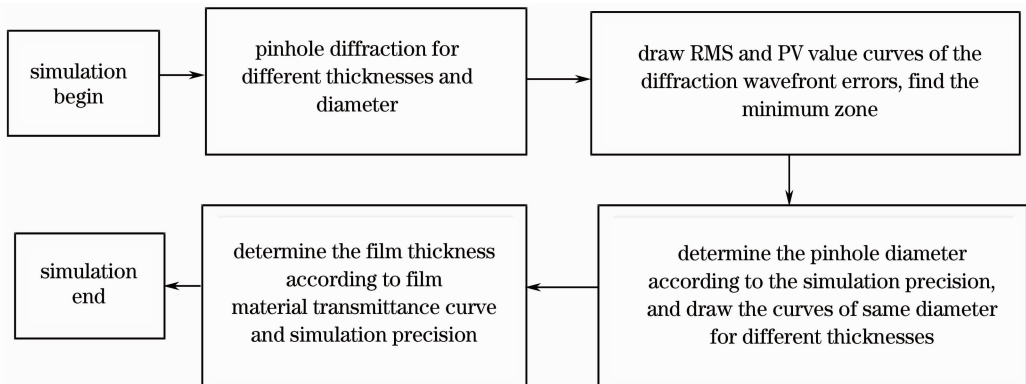


图 2 针孔衍射优化仿真流程

Fig. 2 Flow chart of simulation for optimization of pinhole diffraction

图 3 中给出了 Cr 膜厚度不同时,波前误差与针孔直径大小的关系。从图中可以看出,不同厚度的针孔,波前误差的峰-谷(PV)值和 RMS 值并不是随针孔直径的增大而增大,即不随针孔直径大小做单调变化,而在某一大小处曲线存在谷值。

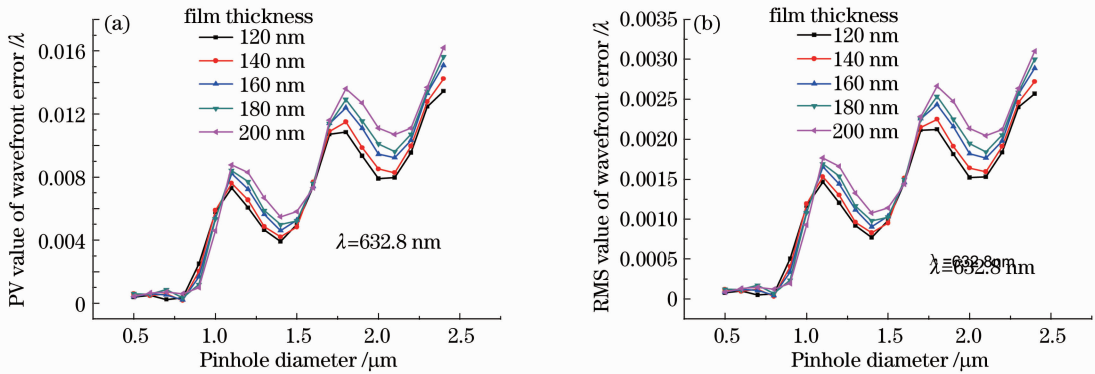


图 3 针孔直径与衍射波前误差的关系。(a) PV 值; (b) RMS 值

Fig. 3 Diffraction wavefront error versus pinhole diameter. (a) PV value; (b) RMS value

在针孔直径为 1.4、2.1 μm 处,波前误差的 PV 和 RMS 值曲线有谷值。但是直径为 2.1 μm 的针孔波前误差的值已经超出了仿真精度要求,所以不予选择。针孔直径在 1.4 μm 附近(如 1.3、1.4、1.5 μm)都能满足仿真精度要求,但是针孔直径越大加工难度相对较小,所以选择直径 1.5 μm 的针孔。直径为 1.5 μm 的针孔的衍射波前误差与膜层厚度关系如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,随着膜厚的增加,其波前误差的 RMS 值有所起伏,但大致呈上升趋势,即波前误差变差。如果仿真值接近仿真精度,则当针孔存在加工误差时,会使实际的波前误差超出仿真精度,所以应留出一定余量。因此,膜厚取 200 nm,此时针孔的衍射波前误差 RMS 值为 $1.14 \times 10^{-3} \lambda$,满足仿真精度要求。

当厚度不同时,Cr 膜的透射率曲线如图 5 所示,图中纵轴为归一化光功率。透射率越小,干涉条纹受通过的杂散光影响越小,对比度越好。当 Cr 膜的厚度为 200 nm 时,透射率为 2.44×10^{-6} ,满足[13]文献提出的要求,同时说明选择 200 nm 厚度 Cr 膜是合适的。

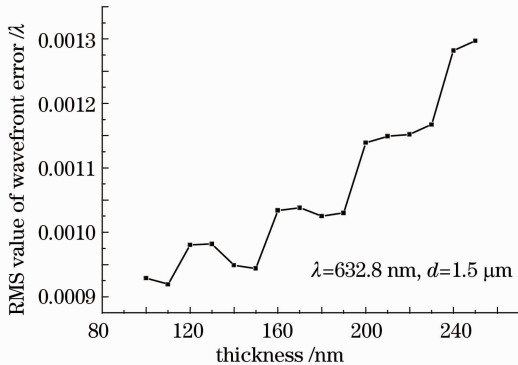


图 4 波前误差与膜层厚度的关系

Fig. 4 Wavefront error versus film thickness

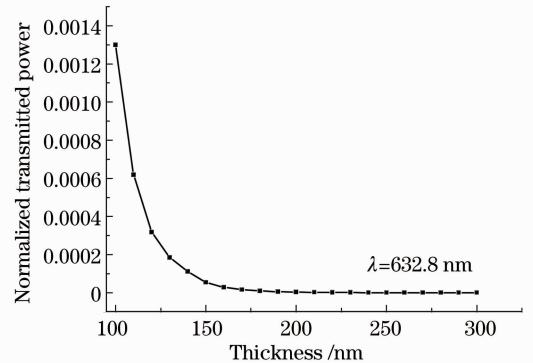


图 5 Cr 膜的透射率与膜层厚度的关系

Fig. 5 Transmittance versus thickness of chromium film

3.2 针孔加工误差对衍射波前误差的影响

理想情况下,针孔应为标准的圆柱,但实际的针孔在制作过程中会产生变形,最常见的是变为椭圆柱和圆锥的情况。

针孔衍射波前误差大小与针孔制作误差的关系如图 6 所示。图中的横坐标对椭圆柱是短轴与长轴之比,对圆锥是短半径与长半径之比。圆锥形针孔的形状如图 7 所示。

从图 6 中可以看出,随着制作误差的增加,衍射波前误差有较大变化。针孔形状为圆锥柱时比针孔形状为椭圆时的波前误差要大。当针孔有制作误差时,要使仿真精度仍然不大于 $1.4 \times 10^{-3} \lambda$ (RMS),此时波前误差 RMS 值允许的变化率为 22.8%。针孔形状为椭圆柱时,波前误差 RMS 值始终在仿真精度以下,所以

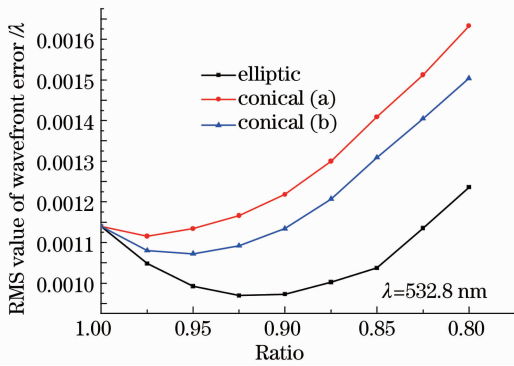


图6 波前误差大小与制作误差的关系

Fig. 6 Wavefront error versus machining error

在短轴与长轴之比达到 0.8 时,能够保证检测精度。

针孔形状为圆锥时,若圆锥的短半径朝向入射光[图 7(b)],有比较小的误差。如图 7(a)所示,当圆锥的短半径与长半径之比为 0.875 时,即侧壁角为 25.12° 时,波前误差 RMS 值($1.3 \times 10^{-3} \lambda$)变化率为 14%,在允许变化范围之内,能够达到仿真精度;如图 7(b)所示,当圆锥的短半径与长半径之比为 0.85 时,即侧壁角为 29.35° 时,波前误差 RMS 值($1.31 \times 10^{-3} \lambda$)变化率为 14.9%,在允许变化范围之内,能够达到仿真精度。

因此,当针孔截面为椭圆时,椭圆的短轴与长轴之比在 0.8 以内不影响测量精度。当针孔为圆锥,圆锥的短半径朝向入射光时,有较小的波前误差,侧壁角应小于 29.35° ;当圆锥的长半径朝向入射光时,侧壁角应小于 25.12° 。

3.3 入射光像差对衍射波前误差的影响

以上计算是在入射光为理想情况下的结果。实际上,由图 1 可见,入射到针孔的光带有一定的像差。在 PS/PDI 中,入射到针孔上的聚焦光束像差主要来自光栅、待测物镜等元件。

当入射光带有单项像差时,针孔滤波后的波前误差与像差大小的关系如图 8 所示。由图中可见,泽尼克多项式中的 Z5 项(像散),Z9 项(初级球差)对波前误差影响较大。Z6、Z7、Z8 项对波前误差影响很小。

所以,当入射到像方点衍射板针孔的入射光带有 Z5 项像差时,比较不易滤除,其次是 Z9 项。而 Z6、Z7、Z8 项比较容易滤除。

经分析衍射光栅带来的像差可以忽略,所以入射到针孔的光源像差主要是待测物镜像差。因此,在测量投影物镜之前要求物镜较精确的装调,以使 Z5 项减小,从而使针孔衍射波前误差降低。

3.4 入射光多项像差对衍射波前误差的影响

测试物镜加工完成后(Schwarzschild 物镜),对两反射镜片分别用 Zygo 干涉仪测出镜面变形,并导入 Code V 中进行仿真,得到整个物镜的泽尼克多项式系数,并用时域有限差分(FDTD)方法把像差加入光源,进行针孔衍射计算,结果如表 1 所示。未经装调的物镜给入射光带来很大像差,其中 Z5 项为 0.7652λ ,Z6 项为 1.0873λ ,比较大,从而导致经针孔(直径 $d = 1.5 \mu\text{m}$)衍射后的波前质量较差。所以在物镜整体装调时,要使 Z5、Z6 项系数减小,从而降低衍射波前误差。由前面的分析结果可知,尤其要减小 Z5 项系数,因为 Z5 项系数影响更大。

物镜经装调后,用 Zygo 实测得到物镜的泽尼克系数,并用 FDTD 方法把像差加入光源,进行针孔衍射计算,得到的结果如表 1 所示。

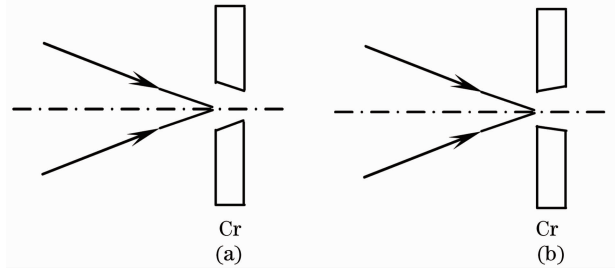


图7 针孔为圆锥时形状

Fig. 7 Conical pinhole

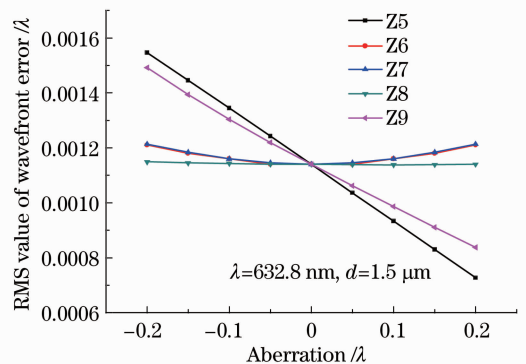


图8 衍射波前误差的关系与单项像差大小

Fig. 8 Diffraction wavefront error versus single aberration

表1 仿真结果
Table 1 Simulation results

	PV value / λ	RMS value / λ
Pinhole diffraction with no aberration	0.005810	0.00114
Pinhole diffraction before objective alignment	0.009123	0.001788
Pinhole diffraction after objective alignment	0.005977	0.001132

装调后物镜给入射光带来的像差中 Z5 项为 -0.021λ , Z6 项为 -0.014λ , 比较小, 从而经过针孔衍射后的波前质量较好。由表中可见, 物镜经过装调后给入射光带来的多项像差经针孔衍射后, 形成的衍射波前误差为 0.001132λ (RMS), 能够满足仿真精度 0.0014λ (RMS) 的要求。

3.5 点衍射板窗口尺寸优化

1 级衍射光透过点衍射板上的窗口形成测试波, 窗口的大小决定了 PS/PDI 所能测量的空间频率范围, 应该越大越好。但是, 相邻级次的衍射光也会从窗口泄漏, 窗口尺寸越大泄漏现象越明显。从空间频域角度分析, 窗口泄漏的相邻级次衍射光的高频分量同测试波本身的频谱发生混叠, 导致条纹对比度下降, 增大干涉条纹解相计算的难度。因此, 必须对窗口的尺寸进行优化, 在满足测量空间频率范围的前提下, 使窗口尽可能大。

采用傅里叶光学理论进行窗口尺寸的优化, 从空间频域角度分析 PS/PDI 中的光束传播特性, 采用频域对比度来进行评价。窗口泄漏的相邻级次衍射光和 1 级衍射光在 CCD 面上所形成的干涉条纹频域对比度为^[14]

$$\Gamma = 2 \sqrt{\frac{\int_{|f_x - (W - W_2)/2| < W_2/2} |I_c(f_x)|^2 df_x}{\int_{|f_x| < W_1/2} |I_c(f_x)|^2 df_x}}, \quad (2)$$

式中 W_1 和 W_2 为频域宽度, 分别代表窗口中 1 级衍射光和窗口边缘相邻级次衍射光占主导成分的区域, f_x 为频域分量, $I_c(f_x)$ 为干涉条纹光强的空间频谱。

以上是由窗口泄漏的相邻级次衍射光和 1 级衍射光在 CCD 面上所形成的干涉条纹频域对比度来优化窗口尺寸。本文对文献[14]中所述方法进一步补充, 又使用了参考波和测试波形成的干涉条纹频域对比度来辅助优化。测试波和参考波在 CCD 面上所形成的干涉条纹频域对比度为

$$\Gamma = 2 \sqrt{\frac{\int_{|f_x - s| < W/2} |I_c(f_x)|^2 df_x}{\int_{|f_x| < (s - W/2)} |I_c(f_x)|^2 df_x}}, \quad (3)$$

式中 s 为空间频域内 0、1 级衍射光在投影物镜像面的间距, W 为空间频域内窗口宽度, f_x 为频域分量, $I_c(f_x)$ 为干涉条纹光强的空间频谱。可见光波段窗口尺寸的优化结果如图 9 所示。

由图 9 可见, 随着窗口尺寸的增大, 从窗口泄漏的相邻级次衍射光同 1 级衍射光的干涉现象越来越严重, 在干涉图上表现为越来越明显的载波条纹, 干涉图的频域对比度下降。但是在窗口尺寸小于 $75 \mu\text{m}$ 时, 变化比较平缓。综合考虑能够测量比较大的空间频率范围、比较高的干涉条纹对比度、比较小的泄漏, 窗口尺寸选择 $60 \mu\text{m}$ 。

4 实验结果

实验装置原理如图 1 所示, 其中衍射板结构采用以上仿真结果, 即针孔直径为 $1.5 \mu\text{m}$, Cr 膜厚度为

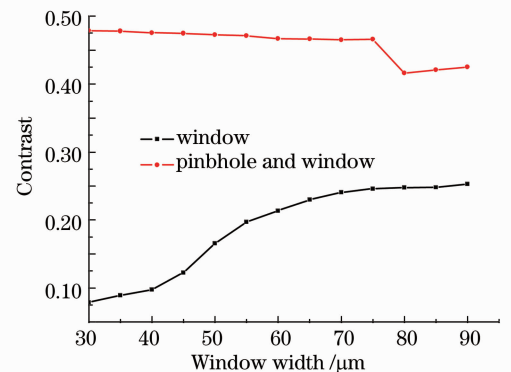


图9 衍射板不同结构时频域条纹对比度随窗口尺寸变化曲线

Fig. 9 Curve of fringe contrast versus test window width for different mask structures

200 nm,窗口尺寸 $60\ \mu\text{m}$ 。针孔尺寸小,较难制作,实际加工的针孔如图 10 所示。待测物镜为 $NA=0.2$ 的 20 倍缩小 Schwarzschild 物镜,得到的一幅干涉图如图 11 所示(数据处理时需提取干涉图有效条纹区域)。最终计算得到物镜的 PV 值为 0.6140λ ,RMS 值为 0.07109λ ,与 Zygo 测得结果(PV 值 0.6096λ ,RMS 值 0.07206λ)基本一致。这说明,以上设计结果是有效的。



图 10 直径为 $1.5\ \mu\text{m}$ 的针孔照片

Fig. 10 Photo of pinhole with $1.5\ \mu\text{m}$ diameter

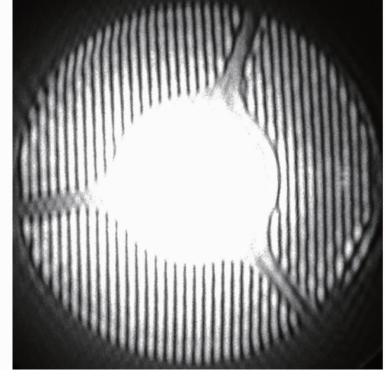


图 11 干涉图

Fig. 11 Interferogram

5 结 论

确定了 PS/PDI 用衍射板的结构设计方法。根据仿真精度要求,基于矢量衍射理论得到了满足仿真精度的针孔直径和膜层厚度。针孔加工时总会存在加工误差,仿真表明圆锥形加工误差比椭圆柱加工误差对衍射波前误差影响大,因此要重点对圆锥形加工误差进行控制。入射光带有 Z5 像差时对衍射波前误差影响较大,物镜经过精装调后入射到针孔的光衍射波前误差能够满足仿真精度要求,同时也表明,此种结构的 PS/PDI 是用于物镜精装调的一种设备。用频域分析的方法完善了窗口选取的仿真。以设计结果指导了衍射板加工,实验表明能够得到清晰的干涉条纹,测量结果真实。文中设计方法同样适用于极紫外(EUV)波段。

参 考 文 献

- 1 H. Meddecki. Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer [P]. U. S. Patent 5835217, 1998-11-10
- 2 H. Meddecki, E. Tejnjl, K. A. Goldberg *et al.*. Phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1526~1528
- 3 Yucong Zhu, Katsumi Sugisaki, Masashi Okada *et al.*. Experimental comparison of absolute PDI and lateral shearing interferometer [C]. *SPIE*, 2005, **5752**: 1192~1199
- 4 Yoshiyuki Sekine, Akiyoshi Suzuki, Masanobu Hasegawa. Wavefront errors of reference spherical waves in high numerical aperture point diffraction interferometers [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 2004, **22**(1): 104~108
- 5 K. A. Goldberg, E. Tejnjl, J. Bokor. A 3-D numerical study of pinhole diffraction to predict the accuracy of EUV point diffraction interferometry [C]. *OSA Trends in Optics and Photonics, Extreme Ultraviolet Lithography*, 1996, **4**: 133~137
- 6 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Zhang Lichao *et al.*. Wave-front quality analysis of three-dimensional pinhole vector diffractional 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误差分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2849~2854
- 7 Chen Chen, Yang Yongying, Wang Daodang *et al.*. Analysis of point-diffraction wavefront error based on finite difference time domain method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0908003
陈 琛, 杨甬英, 王道档 等. 基于时域有限差分方法的点衍射波前误差分析 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0908003
- 8 Nie Liang, Han Jun, Jiang Xu. Application of fiber point diffraction in measurement of optical surface [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, (55-57): 1200~1205
- 9 Liu Ke, Li Yanqiu. High precision alignment of phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1845~1849
刘 克, 李艳秋. 相移点衍射干涉仪的高精度对准[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1845~1849

- 10 Liu Ke, Li Yanqiu. A new calibration method of systematic errors in phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2923~2927
刘克, 李艳秋. 一种新的相移点衍射干涉仪系统误差标定方法[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2923~2927
- 11 Yang Jingjing, Huang Ming, Wu Zhongyuan *et al.*. Optical resonance for subwavelength Ag particle/hole [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1379~1383
杨晶晶, 黄铭, 吴中元等. 亚波长银粒子/孔的光谐振特性[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1379~1383
- 12 Zhang Jianlong, Huang Ming, Hu Baojing. Simulation on light extraction efficiency of subwavelength hole array with FDTD method [J]. *J. Yunnan University*, 2008, **30**(5): 472~476
张剑龙, 黄铭, 胡宝晶. 亚波长孔阵透射增强特性的 FDTD 数值仿真[J]. 云南大学学报, 2008, **30**(5): 472~476
- 13 K. Otaki, Y. Zhu, M. Ishii *et al.*. Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUV [C]. *SPIE*, 2004, **5193**: 182~190
- 14 K. Liu, Y. Li. Design optimization of phase-shifting point diffraction interferometer [C]. *SPIE*, 2008, **7156**: 71561W