

# 可见光二维小孔矢量衍射分析

许嘉俊<sup>1,2</sup> 邢廷文<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所应用光学实验室, 四川 成都 610209)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 现代精密光学系统的发展,对光学元件的加工和检测提出了非常严格的要求,达到纳米量级。相移式点衍射干涉仪是一种应用在纳米精度检测中的常用干涉仪,其参考波前由直径在几百纳米量级的小孔衍射产生,其衍射波前与理想波面的误差,决定了干涉仪的检测精度。基于有限元方法,计算了聚焦入射情况下,不同直径小孔的衍射波面。分析了聚焦斑发生对准误差和倾斜误差下,对衍射波面的影响。

**关键词** 物理光学;光学检测;点衍射干涉仪;矢量衍射;波前分析

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1205003

## Analysis of Two-Dimensional Pinhole Vector Diffraction in Visible Light

Xu Jiajun<sup>1,2</sup> Xing Tingwen<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> *Laboratory of Applied Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*  
<sup>2</sup> *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract** The modern optical systems have placed stringent requirements on the manufactures and measurements of optical elements. Measurement accuracy of nanometer is needed. Phase-shift point diffraction interferometer is a common instrument in high-accuracy measurement, whose reference wave is generated by a pinhole with diameter of several hundred nanometers. So the measurement accuracy can be estimated by analyzing the diffracted reference wave. A two-dimensional simulation, based on finite element method (FEM), is set up to study the propagation of the visible light of 632.8 nm wavelength, through sub-1000 nm diameter pinholes in a chromium membrane with different thicknesses. Beam spot alignment error and tilt are also analyzed.

**Key words** physical optics; optical testing; point diffraction interferometer; vector diffraction; wavefront analysis

**OCIS codes** 050.1940; 120.6165; 220.4840

## 1 引 言

现代精密光学系统的发展,对光学元件的加工和检测提出了非常严格的要求,达到了纳米量级。例如在 X 射线望远镜中,一些球面的面形精度均方根(RMS)值要求达到 1.25~5 nm<sup>[1]</sup>,在极紫外光刻系统中,反射式的光刻物镜面形误差需要在 1 nm 以下<sup>[2,3]</sup>。如此高的检测精度,常规的斐索干涉仪,泰曼-格林干涉仪,因为需要参考元件作为基准,很难做到。而点衍射干涉仪<sup>[4~6]</sup>由于摆脱了参考元件的限制,直接使用小孔衍射波作为参考波面,其理论检测精度可以达到纳米量级以下。小孔衍射波面与

理想波面的误差成为影响点衍射干涉仪最终检测精度的关键因素。

邢廷文等<sup>[7,8]</sup>利用标量衍射原理,计算分析了小孔直径对衍射波面误差的影响。其模拟的孔径尺寸都在 2 倍工作波长以上。但是为了达到高精度的衍射波,点衍射干涉仪中的小孔直径一般在亚微米量级,这在可见光波段,已经可以和工作波长(如 632.8 nm)相比拟,此时应用标量衍射原理计算的结果误差较大<sup>[9]</sup>,更为精确的结果需要矢量计算得到。卢增雄等<sup>[10]</sup>在极紫外波段运用时域有限差分算法对小孔衍射进行了矢量分析,Otake 等<sup>[11]</sup>在可

收稿日期: 2011-07-12; 收到修改稿日期: 2011-08-01

作者简介: 许嘉俊(1986—),男,博士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: frog\_0123@hotmail.com

导师简介: 邢廷文(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事各种光学系统和光学仪器等方面的研究。

E-mail: xingtw@ioe.ac.cn

见光情况下采用严格耦合波理论对二维结构的小孔衍射做了仿真计算,但是并没有对不同膜层厚度下的衍射结果进行计算,孔径尺寸的变化范围也比较小,在 400~700 nm 之间。本文利用有限元方法(Finite element method)对近场光强进行矢量计算,再利用瑞利-索末菲积分计算远场发散,对衍射波面误差进行分析,计算仿真了孔径尺寸和膜层厚度的综合影响。

## 2 仿真模型和分析方法

仿真模型如图 1 所示,波长为 632.8 nm 的入射波从玻璃基底的左面入射,聚集在小孔中心。玻璃基底的右表面为铬膜,其折射率设定为  $2+3i$ 。O 点为小孔后表面中心,QP 点为球面观测屏,O 点为其圆心,Q'P 为衍射波前。小孔内的光强分布是利用有限元方法在 TE 模式下计算得到的。小孔后表面的光场  $U(y)$  为近场分布,观测屏 P 点处的衍射分布  $U'(x',y')$  为远场分布,可以利用第一类瑞利-索末菲积分得到

$$U'(x',y') = \frac{1}{2\pi} \int_l U(y) \left( ik + \frac{1}{s} \right) \frac{\exp(iks)}{s} \cos(n,s) dl, \quad (1)$$

式中  $s$  为孔后平面上任一点到观测屏上  $(x',y')$  的距离,  $\cos(n,s)$  为孔后平面法线(正 X 方向)与衍射方向的夹角,  $l$  为孔后平面上积分线区域。这里选用瑞利-索末菲积分而不是基尔霍夫理论的原因在于它是“显洽的”,即场点趋近孔平面时可再给出所设定的边界<sup>[12]</sup>。在标量衍射中,积分线区域为小孔直径,把边界作为截断处理。在矢量分析中,考虑到光场在小孔边界外一定范围的分布,积分线区域  $l$  取为小孔直径的 2 倍。

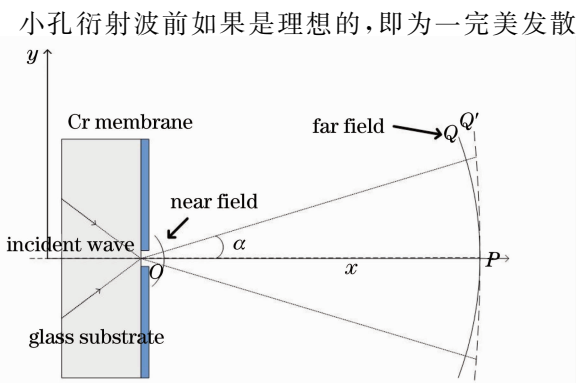


图 1 仿真几何模型  
Fig. 1 Simulation model

球面波,发散中心在 O 点,它在球面观测屏 QP 上的位相分布应该相同。实际上,由于小孔存在线尺度,衍射波前 Q'P 不可能与 QP 完全重合。假设 P 点位相  $\psi_p$  为基准位相,衍射波在观测屏 QP 上任一点的位相  $\psi(x',y')$  与 P 点位相  $\psi_p$  的偏差即为小孔衍射波与理想球面波在对应点上的偏差。因此,通过分析衍射波在球面观测屏上的位相分布,就能得到衍射波面误差。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 衍射波面误差

图 2 为膜层厚度 300 nm 下,小孔直径由 200~900 nm 变化,步长 50 nm,计算所得到的衍射波面误差 RMS 值,衍射数值孔径 NA 为 0.1~0.4,入射波长为 632.8 nm。由图中可以看出,当衍射 NA 为 0.1 时,衍射波面误差曲线在  $10^{-4}\lambda \sim 10^{-5}\lambda$  之间。当 NA 增大到 0.4 时,误差曲线大概增大了一个数量级,在  $10^{-3}\lambda \sim 10^{-4}\lambda$  之间。这一特性和标量衍射计算结果相同,衍射角越小,越靠近衍射中心,衍射波面误差越小。与之不同的是标量衍射结果的误差曲线是随孔径尺寸单调变化的,矢量计算的结果并非如此。在 350 nm 和 750 nm 孔径处,衍射误差曲线出现两个极小点,当 NA 为 0.4 时,分别为  $0.0016\lambda$  和  $0.0002\lambda$ 。Otake 等<sup>[11]</sup>利用严格耦合波的计算,也得出误差曲线非单调变化的结果。标量计算中,并没有考虑小孔的厚度,孔径范围内的光场分布在不同的孔径尺寸下都是相似的,孔径的变化对应的仅仅是积分范围的不同,所以标量计算得到的衍射误差曲线单调变化,孔径越小,衍射波误差越小。但是在二维矢量分析中,考虑了小孔的深度,即玻璃基底上

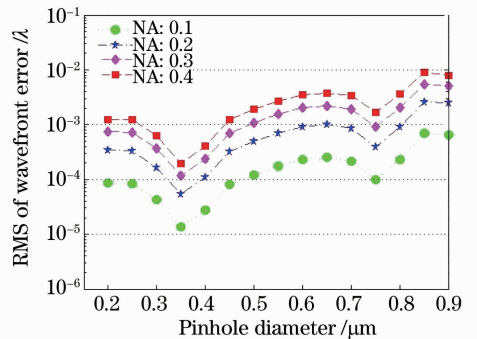


图 2 小孔衍射波面误差 RMS 值。膜层厚度 300 nm, 衍射 NA 为 0.1~0.4,  $\lambda=632.8$  nm

Fig. 2 RMS of the pinhole diffracted wave-front error. The thickness of the membrane is 300 nm, the diffraction NA is 0.1~0.4 and the wavelength is 632.8 nm

金属膜的厚度(图 1 中为 300 nm),此时的小孔也可以看作是一个圆形波导<sup>[13,14]</sup>。相同的入射波在不同直径的圆形波导中传输,出射场(近场分布)不同,如图 3 所示。图 3(a)为小孔直径 350 nm 时的近场

位相与振幅分布;图 3(b)为孔径 200 nm 时的近场位相与振幅分布。不同的孔径的近场振幅分布相似,而相位分布差别很大。此时的衍射波面受到小孔直径大小和出射场分布的综合影响。

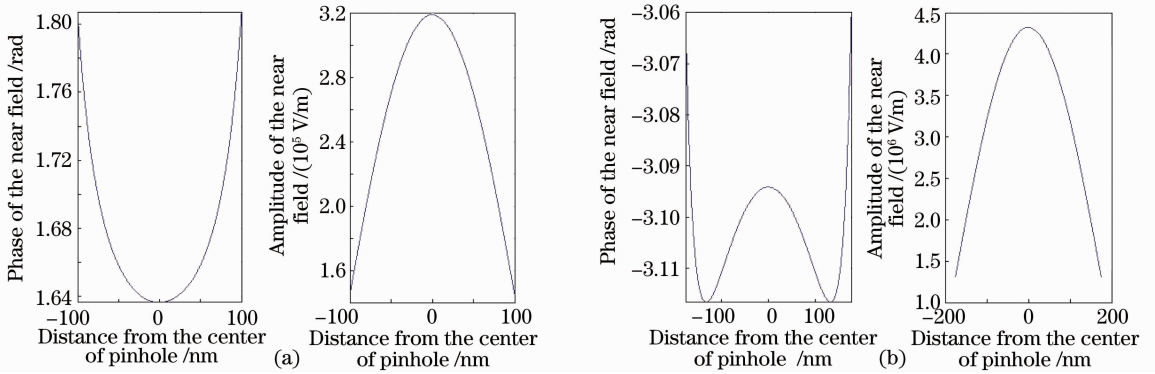


图 3 不同孔径下的近场相位与振幅分布。(a)孔径为 350 nm; (b)孔径 200 nm,金属膜厚度均为 300 nm

Fig. 3 Distribution of phase and amplitude of near field with different pinholes. (a) 350 nm diameter; (b) 200 nm diameter, metal-film thickness is 300 nm

小孔直径减小,积分范围减小,一定程度上减小衍射波面误差,而出射场分布的变化,如图 3(b)中的 200 nm 孔径近场相位分布所示,可能会增大衍射波面误差,而小孔深度,即金属膜厚度,对于不同的小孔直径,影响不同,不同的孔径尺寸会对应不同的最佳膜层厚度。因此为了得到误差小的衍射波面时,应该将小孔直径与金属膜厚度综合考虑。

在小膜厚曲线下方,只是在极小值点附近有所出入。不同衍射 NA 下的衍射波面误差,对于不同的膜层厚度都是相同的,如图 2 和图 5 所示。

### 3.2 系统误差对衍射波面的影响

#### 3.2.1 对准误差

3.1 节中的计算结果,是在入射光聚焦在小孔前表面中心得到的。而在实际的点衍射干涉仪中,受对准装置精度限制,聚焦斑不可能与小孔中心完全重合,会引入对准误差。入射带来的非对称性必然在衍射波面引入非对称误差。图 6 为不同膜层厚度下计算的入射斑存在对准误差下的衍射波面误差 RMS 值。图中的 6 条曲线,星点代表的没有对准误差时的 RMS 值,作为参考。其余 5 条曲线,分别对应不同的对准误差  $P(50 \sim 250 \text{ nm})$ 。计算时采用的波长均为 632.8 nm,衍射 NA 取 0.4。

图 4 为不同膜层厚度,孔径从 200~900 nm 所计算的衍射波面误差 RMS 值。衍射 NA 为 0.4,金属膜厚度  $t$  从 100 nm 增加到 500 nm。5 条误差曲线都存在有 2 个极小值点,但是对应的孔径尺寸并不相同,这与前面的分析相符。随着膜层厚度的减小,误差曲线的极小值点向孔径减小的方向移动。膜层厚度减小,遮光的效果变差,小孔附近区域的光强会增大,相当于‘扩大’了小孔直径,从而增大衍射波面误差。因此图 4 中大膜厚的误差曲线,基本都

从图 6 中可以看出,孔径越小和膜层厚度越大,对于对准误差的过滤作用越好。6 条误差曲线,可以分成两组,没有引入对准误差时的曲线作为参照曲线,其余五条曲线作为误差组。误差组曲线和参照曲线之间,在小于某一特定孔径,或者说临界尺寸时,基本重合。这一临界尺寸和膜层厚度有关系。图 6(a)中,膜层厚度为 100 nm,误差组曲线和参照曲线没有重合区域,只有在孔径小于 300 nm 时,略为接近。当膜厚增加为 200 nm 后,两组曲线在 300 nm 以下,重合的比较好;膜厚为 500 nm 时,400 nm 以下孔径,对准误差基本没影响,小孔直径为 500 nm 时,误差组和参照组之间的差值也并不大。这是由于膜层

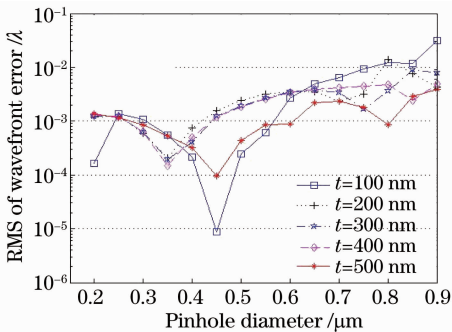


图 4 不同膜层厚度下的衍射结果

Fig. 4 RMS of the diffracted wave-front error with different membrane thicknesses

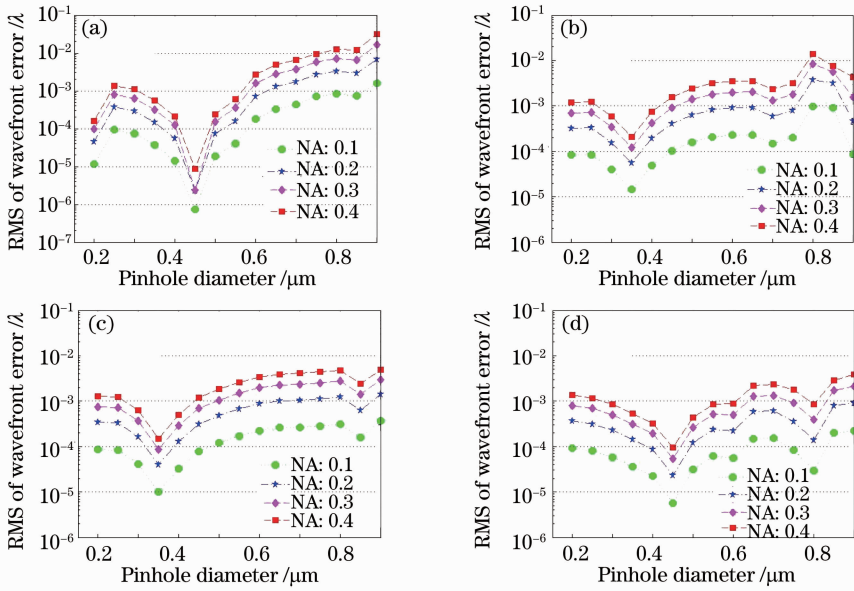


图 5 不同膜层厚度下 NA 变化带来的衍射波面误差 RMS 值。膜层厚度分别为 (a) 100 nm; (b) 200 nm; (c) 400 nm; (d) 500 nm

Fig. 5 RMS of the diffracted wave error with different diffracted NA. The membrane thickness is (a) 100 nm; (b) 200 nm; (c) 400 nm; (d) 500 nm

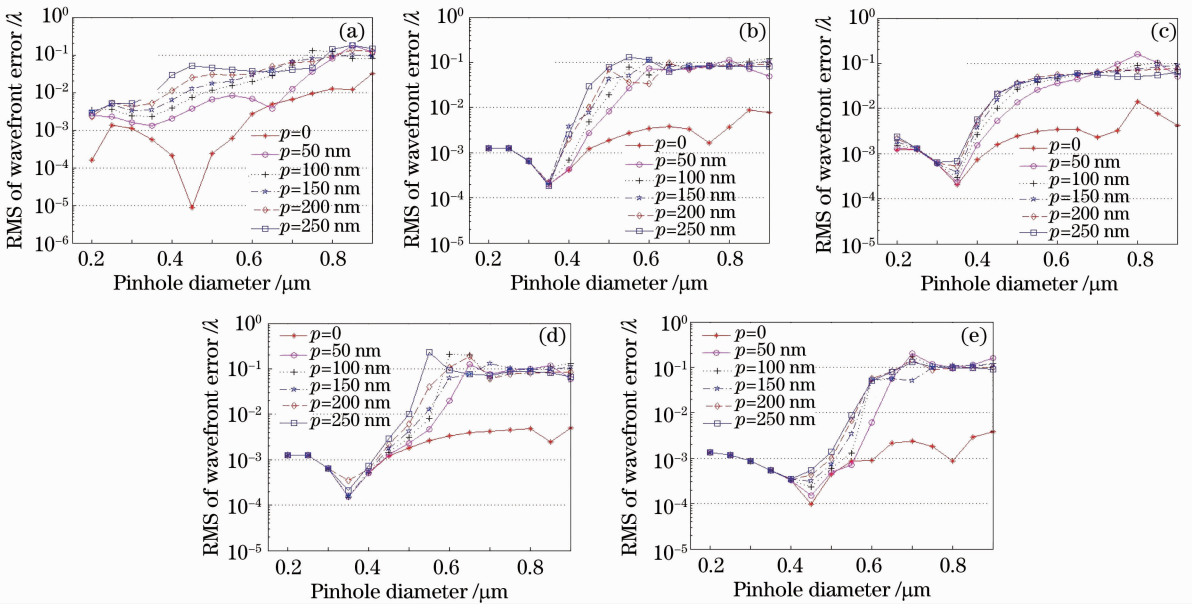


图 6 对准误差引入的衍射波面误差变化。膜层厚度分别为 (a) 100 nm; (b) 200 nm; (c) 300 nm; (d) 400 nm; (e) 500 nm

Fig. 6 RMS of the diffracted wave error with beam spot alignment error. The membrane thickness is (a) 100 nm; (b) 200 nm; (c) 300 nm; (d) 400 nm; (e) 500 nm

厚度的增加,由于金属膜带来的过滤作用增强,因此能在更大的孔径处将对准误差带来的影响完全消除。

在孔径大于 700 nm 时,误差组 5 条曲线也基本重合,但是和没有对准误差时的 RMS 值曲线相差比较大,是由于孔径大于 700 nm 时,斑点偏移量和

孔径尺寸相比不大所造成的。孔径在 400~700 nm 之间时,对准误差引起的衍射波面误差增加和斑点偏移量成正比关系。

### 3.2.2 倾斜误差

倾斜误差是指入射光倾斜入射,但仍然聚焦在小孔中心的情况。图 7 为入射光在不同倾斜角度  $\alpha$

下入射的衍射波面误差的 RMS 值,其他参数与 3.2.1 节中相同,同样引入没有倾斜误差时的 RMS 曲线作为参照组。倾斜误差引入的衍射波面误差变化和对准误差引入的误差变化不太相同,加入倾斜后,衍射误差曲线的在大孔径处的极小值点发生了移动。如图 7(b)中,没有加倾斜时,有一个极小值

点在 750 nm,加入倾斜后,变为 850 nm。 $2^\circ$  以内的倾斜量引起的 RMS 值变化并不是很大,临界尺寸值随着膜层厚度的增加往大孔径方向移动。但是倾斜误差曲线并没有在孔径大于这一临界尺寸时再次重合,而是和倾斜量保持正比关系。

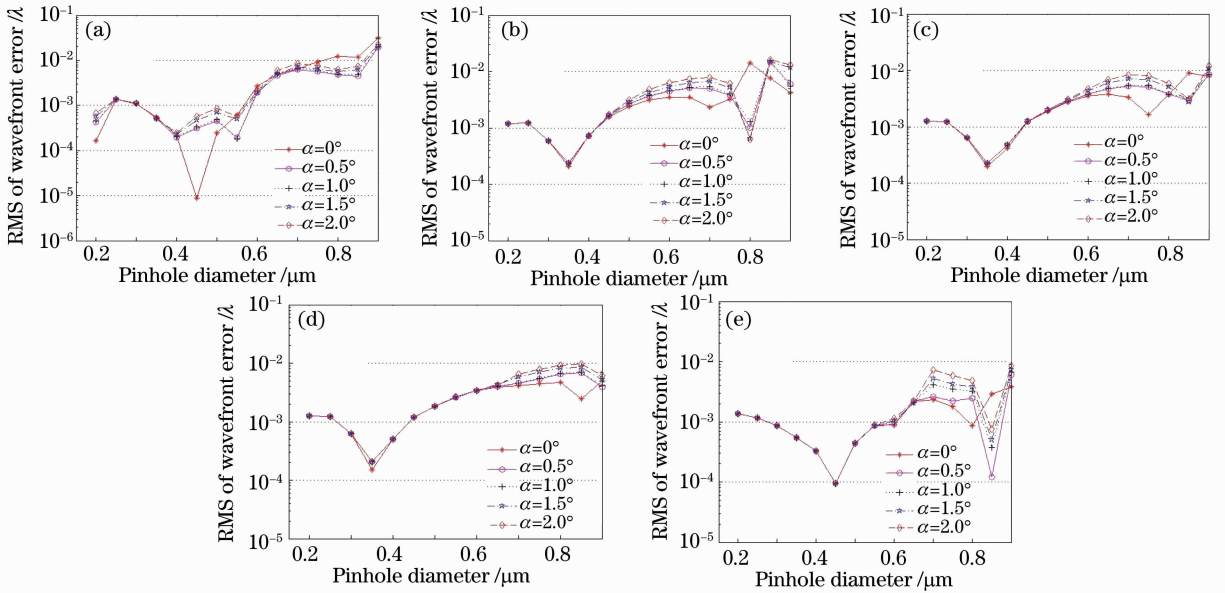


图 7 倾斜误差引入的衍射波面误差变化。膜层厚度分别为 (a) 100 nm; (b) 200 nm; (c) 300 nm; (d) 400 nm; (e) 500 nm

Fig. 7 RMS of the diffracted wave error with tilt error. The membrane thickness is (a) 100 nm; (b) 200 nm; (c) 300 nm; (d) 400 nm; (e) 500 nm

## 4 结 论

利用矢量计算方法仿真分析了不同膜层厚度下,小孔尺寸变化引起的衍射波面偏离球面的误差。在不考虑系统误差的情况下,300 nm 膜厚,直径小于 900 nm 的小孔产生的衍射波面,在衍射 NA 小于 0.1 时的波面误差小于  $0.001\lambda$ ; NA 小于 0.4 时,波面误差小于  $0.01\lambda$ 。不同孔径的衍射波质量曲线并不是单调变化的,在膜层厚度 300 nm 时,350 nm 和 750 nm 孔径的衍射波面误差局部最小,分别为  $0.0002\lambda$  和  $0.0016\lambda$ 。随着金属膜厚度的减小,衍射波面误差曲线的极小值点会向孔径减小的方向移动。当引入对准和倾斜误差时,孔径减小或者增大膜层厚度,都能有效地减小衍射波面误差。实际选用直径 450 nm 的小孔,膜层厚度 500 nm 比较适宜,此时在忽略物镜误差<sup>[15]</sup>,只引入 250 nm 的对准误差的情况下,波面误差仍然很小,为  $0.0006\lambda$ 。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Guogan, Zhang Xuejun, Wang Quandou *et al.*. Fiber point diffraction interferometer[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2001, **9** (2): 142~145
- 2 刘国淦, 张学军, 王权陡 等. 光纤点衍射干涉仪的技术研究[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(2): 142~145
- 3 G. E. Sommargren, S. W. Phillion, M. A. Johnson *et al.*. 100-Picometer interferometry for EUVL[C]. *SPIE*, 2002, **4688**: 316~328
- 4 Sugisaki Katsumi, Zhu Yucong. Present status of the ASET at-wavelength phase-shifting point diffraction interferometer [C]. *SPIE*, 2000, **4146**: 47~53
- 5 Sang Hun Lee, Patrick Naullear, Kenneth A. Goldberg *et al.*. Phase shifting point diffraction interferometry at 193 nm [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(31): 5768~5772
- 6 Naulleau Patrick, Goldberg Kenneth A.. Dual-domain point diffraction interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38** (16): 3523~3532
- 7 Gong Qian, Geary Josehp. Modeling point diffraction interferometers [C]. *SPIE*, 1995, **2544**: 358~375
- 8 Xing Tingwen, He Guoliang, Shu Liang. Measurement error in the 193 nm phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(2): 67~72
- 9 邢廷文, 何国良, 舒亮. 193 nm 移相点衍射干涉仪的测量误差分析[J]. *光电工程*, 2009, **36**(2): 67~72

- 8 Ma Qiang, Liu Weiqi, Li Xiangbo *et al.*. Analysis of diffraction wavefront error in point diffraction interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2321~2324  
马 强, 刘伟奇, 李香波 等. 点衍射干涉仪中小孔衍射波面误差分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2321~2324
- 9 Deng Xiaojiu, Li Huailong, Liu Caixia *et al.*. A comparative study of vectorial diffraction theories and the validity of scalar approximation[J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2007, **24**(5): 543~547  
邓小玖, 李怀龙, 刘彩霞 等. 矢量衍射理论的比较研究及标量近似的有效性[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(5): 543~547
- 10 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
- 11 K. Otaki, Y. Zhua, M. Ishij *et al.*. Rigorous wavefront analysis of the visible light point diffraction interferometer for EUVL[C]. *SPIE*, 2004, **5193**: 182~190
- 12 Born M., Wolf E.. Principles of Optics [ M ] . Yang Jiasun Transl. Beijing: Electronics Industry Press, 2005. 427~428  
玻 恩, 沃尔夫. 光学原理 [ M ] . 杨葭孙译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 427~428
- 13 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
- 14 Zeng Xiahui, Fan Dianyuan, Zhou Ping. Field distributions and transmission property inside a conical waveguide with a subwavelength sized exit hole [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1487~1492  
曾夏辉, 范滇元, 周 萍. 亚波长锥形波导的电磁场分布及传输特性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1487~1492
- 15 Zhang Dongqing, Wang Xiangzhao, Shi Weijie *et al.*. New technique for aberration in-situ measurement of a lithographic projection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 679~684  
张冬青, 王向朝, 施伟杰 等. 光刻机投影物镜的像差原位检测新技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 679~684

栏目编辑:何卓铭