

微小孔偏差对远场波前质量影响分析

卢增雄^{1,2} 金春水¹ 马冬梅¹ 张海涛¹

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033
² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 点衍射干涉仪(PDI)中小孔质量影响参考球面波的质量,加工和装调误差使实际小孔与理想圆孔之间产生了偏差。利用瑞利-索末菲衍射公式,对因小孔加工和装调误差产生的边缘粗糙小孔和椭圆小孔的远场衍射波前质量作了详细的分析。小孔边缘的粗糙度主要在衍射波前中引入了三叶形像差,小孔的椭圆度在衍射波前中引入了小量的像散。对于直径在 $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 的小孔,当小孔半径的均方根(RMS)偏差分别为 0, 15 和 30 nm 时,衍射波前的 RMS 偏差分别达到 $10^{-8}\lambda$, $10^{-4}\lambda$ 和 $10^{-3}\lambda$ 量级。研究结果表明,小孔边缘的粗糙度对衍射波前偏差的影响十分明显,但基本不影响强度分布;小孔的椭圆度对衍射波前的偏差影响很小,但对强度分布影响较大。实际加工或装调误差产生的椭圆小孔,其椭圆度很小,可以忽略其对衍射波前质量的影响。

关键词 光学检测;点衍射干涉仪;瑞利-索末菲衍射;小孔边缘粗糙度;椭圆小孔;波前质量

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0812002

Analysis of Effect of Tiny Pinhole Deviation on Far-Field Wave-Front Quality

Lu Zengxiong^{1,2} Jin Chunshui¹ Ma Dongmei¹ Zhang Haitao¹

¹ State Key Laboratory of Applied Optics, 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 The quality of the reference wave front in point-diffraction interferometer (PDI) is constrained by the quality of the pinhole, and the deviation between an actual pinhole and a perfect one is caused by machining errors and the misalignment. The quality of the far-field wave front diffracted by a rough-edge circular pinhole and an elliptical pinhole is analyzed in detail based on Rayleigh-Sommerfeld diffraction formula. Pinhole edge roughness mainly causes the trefoil aberration in diffracted wave front, and the ellipticity of a pinhole will lead to a small amount of astigmatism in diffracted wave front. For pinholes with diameters from 0.4 to 1.0 μm , when the radius root mean square (RMS) deviations are 0, 15 and 30 nm, the RMS deviations of the diffracted wave fronts are in the order of $10^{-8}\lambda$, $10^{-4}\lambda$ and $10^{-3}\lambda$, respectively. The results show that pinhole edge roughness has a significant influence on wave front deviation, while it has little to do with the intensity distribution in the diffracted wave front. The ellipticity of the pinhole has very small effect on wave front deviation, but affects the wave front intensity distribution in far-field wave front. Usually, the ellipticity of an elliptical pinhole resulting from machining errors or the misalignment is small, and its effect on far-field wave front quality can be neglected.

Key words optical testing; point diffraction interferometer; Rayleigh-Sommerfeld diffraction; pinhole edge roughness; elliptical pinhole; wave-front quality

OCIS codes 120.4800; 050.1940; 070.7345; 220.4000

收稿日期: 2010-12-31; 收到修改稿日期: 2011-03-07

基金项目: 国家科技重大专项资助课题。

作者简介: 卢增雄(1984—),男,博士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: lzengx103@163.com

导师简介: 金春水(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事紫外和极紫外光学技术等方面的研究。

E-mail: jincs@sklao.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

极紫外光刻(EUVL)投影物镜各非球面的面形误差均方根(RMS)值要求达到 0.2~0.3 nm^[1], 普通菲佐干涉仪或泰曼-格林干涉仪由于受参考元件的限制,对如此高精度的检测束手无策^[2]。点衍射干涉仪(PDI)^[3~5]通过衍射产生的球面波作为参考光,可以实现超高精度的检测。决定 PDI 所能达到的检测精度的关键因素之一是参考球面波的质量,而参考球面波的质量主要受制于小孔的直径大小、圆度等因素^[1,6]。马强等^[7]采用标量衍射, K. Otaki 等^[1,8]采用矢量衍射研究了小孔直径大小对衍射波前质量的影响情况。然而,这些情况,包括经典教材中所讨论的圆孔都是理想的圆孔,而实际加工出来的小孔与理想圆孔之间总是存在着偏差^[9~11]。此外,在小孔装调过程中,由于装调误差,小孔中心轴线与照明光波轴线之间将产生偏离,从照明光波方向看,这种偏离使原本的圆孔变为椭圆孔。那么这些偏差对衍射波前将会产生怎样的影响?这是高质量小孔加工装调前必须明确的问题。在传统的圆孔衍射中,常采用菲涅耳近似或夫琅禾费近似^[12]来处理,然而,对于本文研究的问题,由于要求衍射波前的数值孔径达到 0.6^[1],因此该情况下傍轴近似已不再成立^[13],即菲涅耳近似或夫琅禾费近似不成立。

本文从瑞利-索末菲衍射公式出发,结合实际加工出来的小孔,对小孔的加工误差和装调误差对远场波前质量的影响情况作了深入的研究。分析了小孔边缘粗糙度和小孔椭圆度对衍射波前相对于理想球面波的偏差和强度分布的影响,分析了衍射波前中存在的像差以及衍射波前偏差的根源。

2 理论模型

微小孔非傍轴衍射场的精确计算可由第一类瑞利-索末菲衍射积分公式给出^[14]:

$$u(x, y, z) = \frac{A}{i\lambda} \iint_{-\infty}^{+\infty} u_0(x', y', 0) \cdot \frac{\exp(ikR)}{R} \left(1 - \frac{\lambda}{i2\pi R}\right) \frac{z}{R} dx' dy', \quad (1)$$

式中 A 为积分常数, R 为源点 $(x', y', 0)$ 到场点 (x, y, z) 之间的距离, λ 为光波波长, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。当 $R \gg \lambda$ 时,即观察点距离小孔很远时,(1)式可重写为

$$u(x, y, z) = \frac{A}{i\lambda} \iint_{-\infty}^{+\infty} u_0(x', y', 0) \cdot \frac{\exp(ikR)}{R} \frac{z}{R} dx' dy'. \quad (2)$$

如图 1 所示,在电导率为无限大的平面屏 $x'o'y'$ 上开有一个任意形状的微小孔 Σ , 波长为 632.8 nm 的单位振幅平面波垂直照射到小孔上, P' 为衍射屏上的任意一点,则

$$u_0(x', y', 0) = \begin{cases} 1, & P' \in \Sigma \\ 0, & P' \notin \Sigma \end{cases} \quad (3)$$

设 P 为远场球面上的任意一个观察点,其位置由 (r, θ, φ) 确定,在本文中取 $r = 1$ m,满足 $R \gg \lambda$ 。由 (2), (3) 式得远场球面上任意观察点 P 的光扰动为

$$u(P) = \frac{A}{i\lambda} \iint_{\Sigma} \frac{\exp(ikR)}{R} \cdot \frac{z}{R} dx' dy'. \quad (4)$$

P 点的强度和相位分别为

$$I(P) = u(P)u^*(P), \quad (5)$$

$$\psi(\varphi, \theta) = \arg u(\varphi, \theta), \quad (6)$$

将球面上任意一点 (φ, θ) 的相位 $\psi(\varphi, \theta)$ 与理想球面波的相位 ψ_0 之差作为衍射波前上点 (φ, θ) 与理想球面波的偏差。

$$\Delta\psi(\varphi, \theta) = \psi(\varphi, \theta) - \psi_0, \quad (7)$$

衍射波前的最大绝对偏差(MAD)和 RMS 偏差分别定义为

$$D_{\text{MAD}} = \max \text{abs}(\Delta\psi), \quad (8)$$

$$D_{\text{RMS}} = \sqrt{(\overline{\Delta\psi})^2 - (\overline{\Delta\psi})^2}, \quad (9)$$

式中符号上方的横线表示求平均。

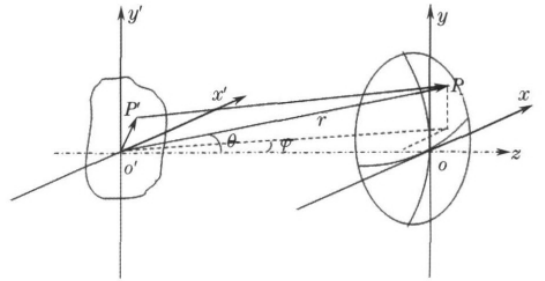


图 1 小孔衍射模型

Fig. 1 Pinhole-diffraction model

3 结果与讨论

图 2 为所制作的小孔阵列的原子力显微镜(AFM)照片。在小孔试制过程中,在同一个基片上加工出小孔阵列,通过这些小孔阵列可获知小孔的加工质量。由图可知,实际制作的小孔与理想的圆孔之间存在着偏差,这种偏差包括两个方面:1)小孔边缘粗糙度,即小孔边缘的凹凸起伏;2)小孔椭圆度,如图 2 右侧所示,小孔水平方向的线度为 0.97 μm,竖直方向的线度为 1.01 μm,故实际制作出的小孔存在一定的椭圆度。此外,如图 3 所示,在小孔装调过程中,由

于装调误差,小孔中心轴线与照明光波轴线之间将产生偏离,从照明光波方向看,这种偏离使原本的圆孔变为椭圆孔。本文将分别对小孔边缘粗糙度和小孔椭圆度进行研究,分析这两种情况对远场波前质量产生的影响。

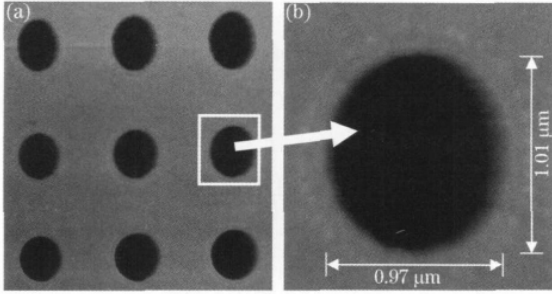


图 2 小孔的原子力显微镜照片

Fig. 2 AFM micrograph of the pinhole

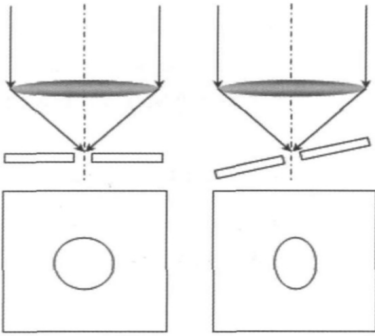


图 3 小孔装调误差产生的椭圆孔

Fig. 3 Elliptical pinhole induced by misalignment

3.1 小孔边缘粗糙度

粗糙小孔模型如图 4 所示,其生成过程为:在半径为 r_0 的圆孔上加一个按高斯分布的随机噪声,其大小由方差 σ 来确定,使得小孔半径的平均值为 r_0 ,方差为 σ 。图中用“-o”表示的小孔即为任意形状的小孔,其半径 r 围绕着平均值 r_0 以 σ 值上下波动,其最小外切圆和最大内切圆分别如图中以点线表示的圆所示。

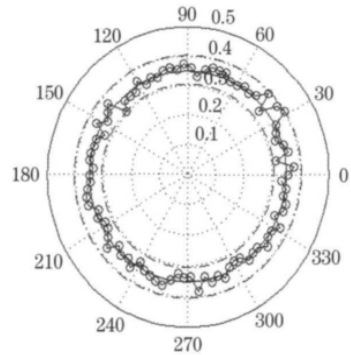


图 4 任意形状小孔模型

Fig. 4 Model of a pinhole of arbitrary shape

对于边缘粗糙的小孔,计算其衍射波前偏差时,其结果与将小孔沿方位方向分成多少份有关,本文采用和 N. N. Salashchenko^[15] 相同的方式来划分小孔,即使得所分的每一份圆弧的弧长等于小孔半径的 σ 值,这种划分能更好地反映实际小孔的情况。对于理想的圆孔,所分的份数对结果的影响并不大。无论是理想圆孔还是边缘粗糙的小孔,远场波前的采样点数对结果的影响都很小。另外,由于噪声的随机性,在考虑小孔边缘粗糙度时,取 100 次平均所得的结果作为小孔波前偏差的评定依据。

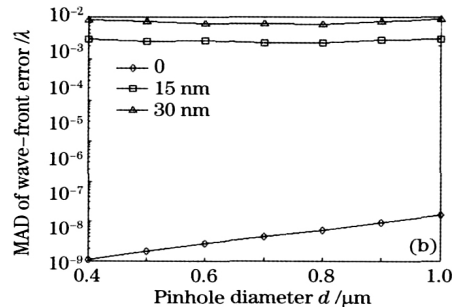
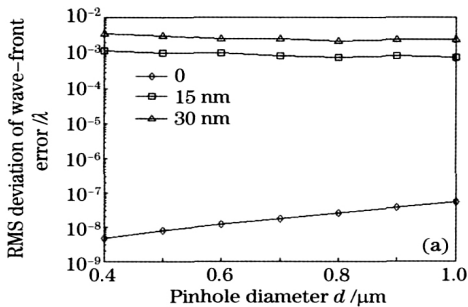


图 5 不同粗糙度的小孔衍射波前偏差与小孔直径大小的关系。(a) RMS 偏差; (b) MAD

Fig. 5 Deviations of wave-front diffracted by various diameter pinholes with different amounts of roughness.

(a) RMS deviation; (b) MAD

图 5 为不同直径的小孔, σ 分别为 0, 15, 30 nm 时, 衍射波前的 RMS 偏差和 MAD ($\sin \theta = 0.6$)。当 σ 为零时, 直径大小在 0.4~1.0 μm 范围内的小孔, 衍射波前的 RMS 偏差在 $10^{-9}\lambda \sim 10^{-8}\lambda$ 量级, 衍射波前的 MAD 在 $10^{-8}\lambda \sim 10^{-7}\lambda$ 量级; 当 σ 增加到 15 nm 时, 波前偏差迅速增大, RMS 偏差增大到 $10^{-4}\lambda$ 量级, MAD 增大到 $10^{-3}\lambda$ 量级; 当 σ 偏差为 30 nm 时, RMS 偏差和 MAD 都大约增大了 3 倍。因此, 小孔边缘的粗糙度对衍射波前偏差的影响是十分显著的。

图 6 为对直径分别为 0.5, 0.7, 0.9 μm , σ 值分别为 0, 15, 30 nm 的小孔的衍射波前作 Zernike 多项式拟合^[16,17], 并去除平移、离焦和倾斜量后的 Zernike 多项式系数。由图可知, 小孔的边缘粗糙度

给衍射波前中所引入的像差主要是第 10, 11 项的三叶形像差, 其次是第 7, 8 项的彗差, 第 19, 20 项的二级三叶形像差, 第 26, 27 项的五叶形像差和第 30, 31 项的三级三叶形像差, 而对于理想小孔 ($\sigma = 0$) 而言, 以上像差为 0。因此, 小孔边缘的粗糙度给衍射波前中引入的像差主要是三叶形像差, 正是这些三叶形像差使得衍射波前的偏差迅速增大。

直径分别为 0.5, 0.7, 0.9 μm 的小孔, 当 σ 值不同时, 衍射波前 ($\sin \theta = 0.6$) 的强度分布 (图中的强度已对最大强度作了归一化) 如图 7 所示。由图可知, 对于某一直径的小孔, σ 分别为 0, 15, 30 nm 时, 其相对强度分布基本上不变。因此, 衍射波前的强度分布对 σ 值不敏感, 其分布与同样直径大小的理想圆孔的衍射波前强度分布基本一样。

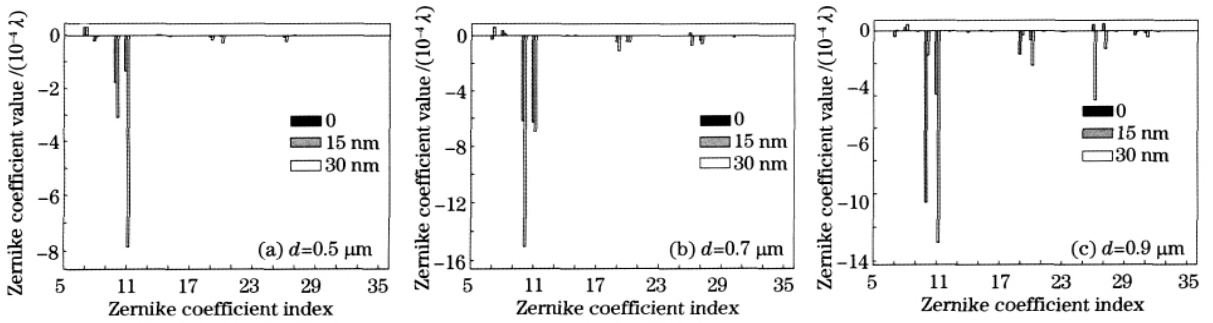


图 6 不同直径大小的小孔衍射波前 Zernike 多项式系数

Fig. 6 Zernike polynomial coefficient index of the wave-front diffracted by pinholes with different diameters

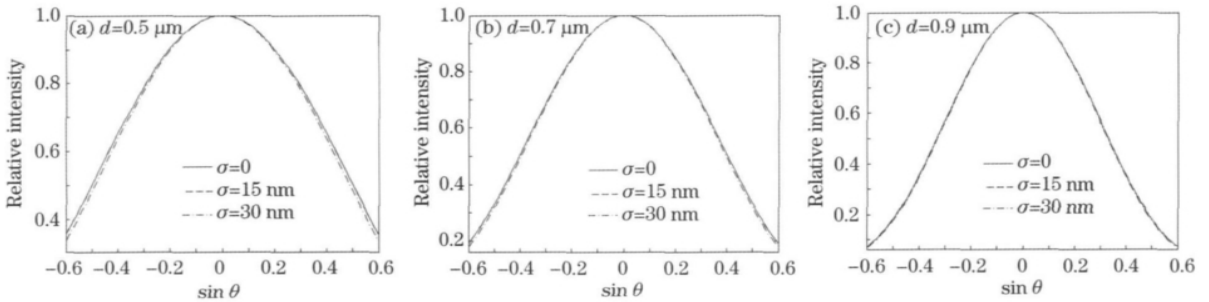


图 7 不同直径大小的小孔衍射波前强度分布

Fig. 7 Intensity distribution of wave-front diffracted by pinholes with different diameters

3.2 小孔椭圆度

对于椭圆孔, 取 x 主轴和 y 主轴的长度范围均为 0.4~1.0 μm 。得到衍射波前的 RMS 偏差和 MAD 如图 8 所示。由图可知, 椭圆孔衍射波前的 RMS 偏差和 MAD 与理想圆孔衍射波前的 RMS 偏差和 MAD 是一个量级的。因此, 小孔的椭圆度对衍射波前偏差的影响很小。

偏差之间处在同一个量级, 但两者之间还是存在差别的。为了分析这种差别的根源所在, 对椭圆孔衍射波前作 Zernike 多项式拟合, 所得的 Zernike 多项式系数主要是 Z_1, Z_4, Z_5 和 Z_9 , 如图 9 所示, 而其他项基本为零。对比这些系数可以看出, 对于 Z_1, Z_4 和 Z_9 , 椭圆孔的结果和理想圆孔的结果基本上是一样的, 但是 Z_5 就有很大的差别了。如图 9(c) 所示, Z_5 以对角线为对称轴分布, 对角线方向为理想圆孔

的结果,越偏离理想圆孔, Z_5 就越大。因此,椭圆孔衍射波前偏差和理想圆孔衍射波前偏差的差别来源于像散。将衍射波前中的平移,离焦,倾斜量去除后

的波前偏差如图 10 所示,其分布与 Z_5 的分布类似,说明椭圆孔衍射波前的偏差主要来源于像散。

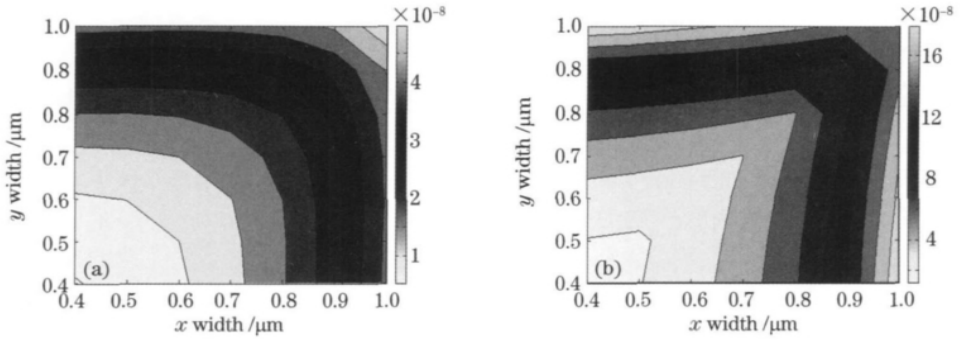


图 8 椭圆孔衍射波前 RMS 偏差(a)和 MAD(b)

Fig. 8 RMS deviation (a) and MAD (b) of wave-front diffracted by elliptical pinholes

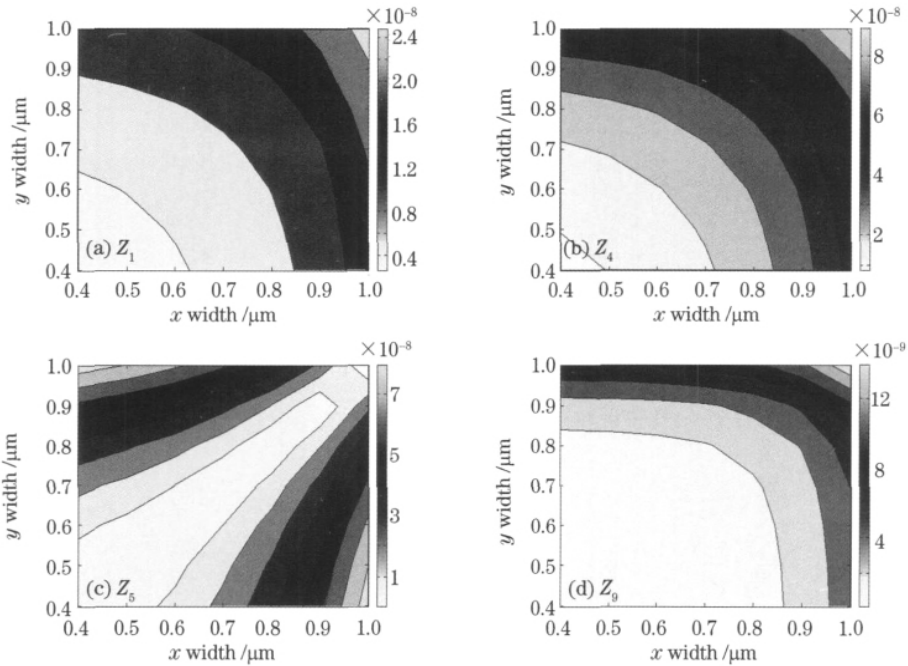


图 9 椭圆孔衍射波前 Zernike 系数值

Fig. 9 Zernike coefficients of wave-front diffracted by elliptical pinholes

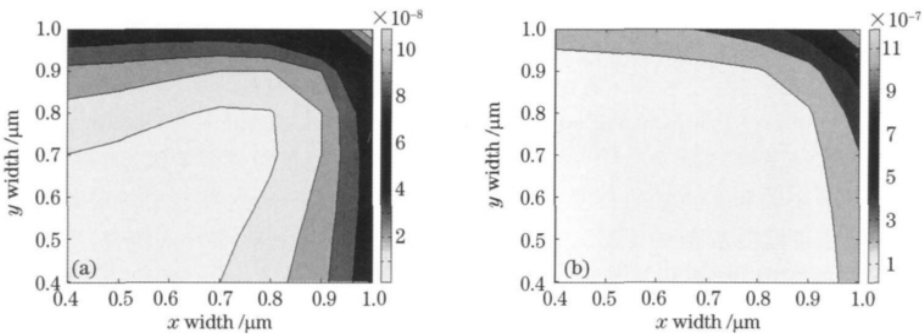


图 10 去除平移、倾斜和离焦后的波前 RMS 偏差(a)和 MAD(b)

Fig. 10 (a) RMS deviation and (b) MAD of the wave-front with translation, tilt and defocus terms removed

椭圆孔衍射波前中的像散来源于 x 主轴长度和 y 主轴长度不一致引起衍射波前在这两个方向的离焦量不同。如图 9(b) 所示, 对角线方向为圆孔的离焦量大小, 由此看出, 圆孔的直径越大, 衍射波前中的离焦量越大。对于椭圆孔, 衍射波前在长轴方向的离焦量要大于短轴方向的离焦量, 同一个波前在不同的主截面上曲率半径大小不一致, 从而

形成像散。这就是椭圆孔衍射波前中出现像散的根源所在。

椭圆孔衍射波前强度分布情况如图 11 所示, x 表示 x 主轴长度, y 表示 y 主轴长度。由图可知椭圆孔不同截面上的光强分布不同, 即强度分布不具有旋转对称性。

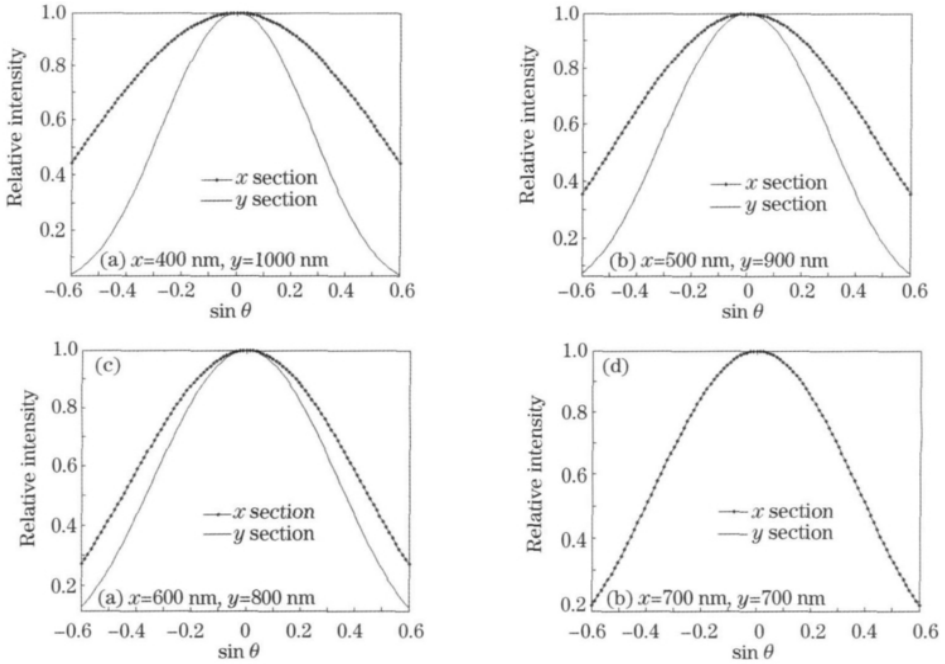


图 11 椭圆孔衍射波前强度分布

Fig. 11 Intensity distribution of the wave-front diffracted by elliptical pinholes

可以看出, 即使椭圆孔的长轴是短轴的两倍, 衍射波前相对理想球面的偏差还是很小, 而强度分布则会随椭圆孔椭圆度的减小而趋于旋转对称。实际加工和装调所引起的椭圆孔, 其椭圆度都是比较小的, 因此这些椭圆孔对衍射波前的质量基本没有影响。

率中心的不重合, 而引入了像散。与理想圆孔相比, 椭圆小孔衍射波前的偏差很小, 这种偏差正是由椭圆孔衍射波前中的像散造成的。椭圆孔衍射波前的强度分布则会因椭圆度的不同而有很大的变化。对于实际加工或装调误差导致的椭圆小孔, 其椭圆度是很小的, 对衍射波前质量的影响可以忽略。

4 结 论

从瑞利-索末菲衍射公式出发, 研究了小孔边缘粗糙度和小孔椭圆度对远场波前质量的影响情况。深入分析了边缘粗糙的小孔和椭圆小孔衍射波前相对理想球面波的偏差以及衍射波前的强度分布情况。详细分析了衍射波前中存在的像差及衍射波前偏差的根源。小孔边缘粗糙度主要给衍射波前中引入三叶形像差, 使得衍射波前相对理想球面波的偏差随着小孔半径均方根值的增大而迅速增大。小孔边缘粗糙度对衍射波前强度分布基本上没有影响。椭圆孔长、短轴的不一致, 导致该截面上衍射波前曲

致谢 感谢中国科学院微电子研究所谢常青研究员为本文提供的小孔实物照片。

参 考 文 献

- 1 K. Otaki, Y. Zhua, M. Ishij *et al.*, Rigorous wave front analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL[C]. *SPIE*, 2004, **5193**: 182~190
- 2 K. Otaki, T. Yamamoto, Y. Fukuda *et al.*, Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, **20**(1): 295~300
- 3 H. Meddecki, E. Tejnjl, K. A. Goldberg *et al.*, Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1526~1528
- 4 Yutaka Ichbara. Interferometer [P]. U. S. Patent 5076695,

- 1991-12-31
- 5 Gary E. Sommargren. Phase shifting interferometer[P]. U. S. Patent 5933236, 1999-8-3
 - 6 K. Otaki, K. Ota, I. Nishiyama *et al.*. Development of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography: design, fabrication, and evaluation[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, **20**(6): 2449~2458
 - 7 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
 - 8 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
 - 9 J. P. Spallas, R. E. Hostetler, G. E. Sommargren *et al.*. Fabrication of extreme-ultraviolet point-diffraction interferometer aperture arrays[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(28): 6393~6398
 - 10 Michael A. Johnson, Donald W. Phillion, Gary E. Sommargren *et al.*. Construction and testing of wavefront reference sources for interferometry of ultra-precise imaging systems[C]. *SPIE*, 2005, **5869**: 58690P
 - 11 M. Paturzo, S. Grilli, P. Ferraro. Point-diffraction interferometer by electro-optic effect in lithium niobate crystals [C]. *SPIE*, 2007, **6616**: 66160F
 - 12 Born M., Wolf E.. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Electronics Industry Press, 2005. 353~357
玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 353~357
 - 13 Deng Xiaojie, Gao Feng, Liu Caixia *et al.*. Non-paraxial approximation of scalar diffraction theory and its validity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 898~901
邓小洁, 高峰, 刘彩霞等. 标量衍射理论的非傍轴近似及其有效性[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6): 898~901
 - 14 James E. Harvey. Fourier treatment of near-field scalar diffraction theory[J]. *Am. J. Phys.*, 1979, **47**(11): 974~980
 - 15 N. N. Salashchenko, M. N. Toropov, N. I. Chkhalo. Effect of pinhole roughness on light diffraction [J]. *J. Surface Investigation, X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2008, **2**(4): 511~513
 - 16 Daniel Malacara, J. Martin Carpio-Valadéz, J. Javier Sánchez-Mondragón. Wavefront fitting with discrete orthogonal polynomials in a unit radius circle [J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(6): 672~675
 - 17 David J. Fischer, John T. O' Bryan, Robert Lopez. Vector formulation for interferogram surface fitting [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(25): 4738~4743