

文章编号 1004-924X(2012)03-0499-07

纳米级针孔矢量衍射波前误差分析

王 俐^{1,2*}, 饶长辉¹, 饶学军¹

(1. 中国科学院光电技术研究所 自适应光学国家重点实验室, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:应用哈特曼-夏克(H-S)波前检测仪检测大数值孔径(NA)透镜时,需要采用纳米级针孔产生参考球面波前对 H-S 传感器进行标定。为了制作出满足要求的高质量针孔,本文对影响参考波前质量的各种要素进行了仿真计算和分析,以获得最优针孔加工参数。基于矢量衍射理论,在会聚高斯光束照射下,计算了针孔厚度和直径大小对衍射波前误差的影响,衍射波前中的像差成份、能量透过率、强度均匀性、针孔加工误差及光束相对针孔中心发生平移、离焦、倾斜时衍射波前误差的变化。分析计算显示,在 NA 为 0.6 时,为了使相对于理想球面波的波峰波谷值(P-V)偏差不大于 0.005λ ($\lambda = 193 \text{ nm}$),在实际针孔的加工制作中,应选取材料铬,并取厚度 200 nm,直径 180 nm 为适宜。

关键词:光学检测;波前误差;会聚高斯光束;矢量衍射;Hartmann-Shack 波前检测仪;时域有限差分法

中图分类号: O436; TQ171.65 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122003.0499

Analysis of wave-front error for nanometer pinhole vector diffraction

WANG Li^{1,2*}, RAO Chang-hui¹, RAO Xue-jun¹

(1. Key Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: wangli9613@126.com

Abstract: When a Hartmann-Shack(HS) wavefront tester is used to test lenses with high numerical apertures, the spherical reference wavefront from nanometer pinholes should be taken to calibrate the H-S sensor. To fabricate a high quality pinhole, this paper analyzes the factors affecting the quality of reference wavefront to obtain the optimal parameters of the pinhole. The vector diffraction of the pinhole is calculated based on the vector diffraction theory, the effect of the thickness, diameter of the pinhole on the diffraction wavefront errors is analyzed and the aberration, power transmission, intensity uniformity, fabrication errors and incident light with shift, defocus and tilt are discussed under a converging Gaussian incident light. The calculation and analysis show that in order to obtain a reference wavefront with a numerical aperture 0.6 and a peak-to-valley(P-V) value below 0.005λ ($\lambda = 193 \text{ nm}$), the best choice for the pinhole is the material chromium with a thickness of 200 nm and a pinhole diameter of 180 nm.

收稿日期:2011-09-20;修订日期:2011-12-11.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 11178004)

Key words: optical testing; wave front error; converging Gaussian beam; vector diffraction; Hartmann-Shack wavefront tester; Finite-difference Time-domain (FDTD) method

1 引言

点干涉仪(PDI)和相移点干涉仪(PS/PDI)^[1]主要用于小数值孔径透镜的波前测量。为了测量大数值孔径透镜的波前误差,SHNG HL 等人提出了一种新的检测方法,该方法运用哈特曼-夏克(Hartmann-Shack, H-S)传感器^[2-3]作为波前传感器。为了提高 H-S 传感器的波前提取精度,采用针孔衍射产生的参考球面波前对传感器进行绝对标定,因此,参考球面波前的质量会影响传感器的标定精度。同时要获得相同质量的参考波前;大数值孔径比小数值孔径所需的针孔直径小,而直径越小,针孔参数与加工误差对衍射波前质量的影响越大,对仿真的数值精度要求越高。因此,要制作出满足要求的高质量针孔,需进行针孔矢量衍射建模,对影响参考球面波前质量的各种因素进行仿真计算和分析。

在利用针孔衍射产生参考球面波前时,当针孔尺寸与波长相比拟时,入射光波在圆孔边界上会发生电(磁)矢量的 3 个分矢量之间的耦合,所以需要使用严格的电磁理论计算矢量场的分布^[4]。目前,国内外有关针孔矢量衍射波前质量分析的文献主要是针对波长 13.55 nm 的极紫外光束衍射和波长 632.8 nm 的可见光光束衍射开展研究的^[5-7]。

本文采用矢量衍射理论,对波长 193 nm 的会聚高斯光束照射情况下针孔的矢量衍射进行了建模及详细的数值计算,分析了衍射波前误差随针孔直径与厚度变化的趋势、衍射波前中的像差成份、能量透过率、强度均匀性、针孔加工误差及会聚高斯光束相对针孔中心发生平移、离焦、倾斜时衍射波前误差的变化。

2 哈特曼-夏克传感器的绝对标定原理

H-S 传感器是目前常用的测量波前像差的工具,由微透镜阵列和 CCD 光电传感器组成。对 H-S 传感器进行标定时参考波前通常采用平面光

束,但是平面光束的像差却不能从系统中消除,从而给高精度波前测量带来影响。为了提高标定精度,对 H-S 传感器进行绝对标定^[8],即将球面波前作为参考波前,通过微透镜阵列将光束聚焦成一个光斑阵列,并用 CCD 分别测出各光斑的中心坐标,以此作为参考基准进行传感器标定,其原理如图 1 所示。H-S 传感器绝对标定时所需参考球面波前误差的 P-V 值设计要求为 0.005λ 。

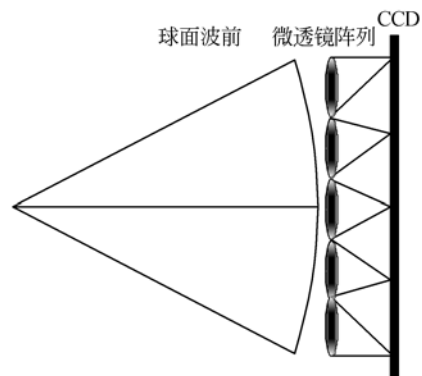


图 1 哈特曼-夏克波前传感器的绝对标定原理
Fig. 1 Theory of absolute calibration for Hartmann-Shack wave-front sensor

3 矢量衍射建模与求解

采用时域有限差分方法(Finite-difference Time-domain, FDTD)^[9]对会聚高斯光束照射情况下的针孔矢量衍射进行建模,进而对衍射场进行数值求解。FDTD 方法是以一组有限差分方程来代替麦克斯韦旋度方程,即以差分方程组的解来代替原来电磁场偏微分方程组的解。作为一个数值算法,只有在离散后差分方程组的解是收敛和稳定的,这种代替才有意义。因此空间步长和时间步长必须满足数值色散及稳定性条件为:

$$\Delta l \leq \lambda/12, \quad (1)$$

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}}. \quad (2)$$

式(1)中, $\Delta l = \Delta x = \Delta y = \Delta z$, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为仿真空间步长。式(2)中, c 为自由空间内的光速, Δt 为 FDTD 仿真的时间步长,一般情况下取

$\Delta t = \frac{\Delta l}{2c}$ 。只有满足了上述两式,才能保证计算结果的稳定性与精确性。可以看出,改变波长时,空间步长和时间步长相应改变,波长越短,空间步长和时间步长取值越小,这样才能得到稳定的计算结果。除此之外,将模型应用于其它数值孔径的会聚光衍射时,还应调整会聚光束的光斑大小。

针孔矢量衍射场的求解步骤为:第一步,运用表 1 中的参数,设置仿真条件并计算针孔矢量衍射的近场分布;第二步,通过傅里叶变换,由衍射场近场分布推算出远场分布,并采样得到数值孔径 NA

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

| 参数 | 性能指标 |
|----------------------|--------------------------|
| 波长/nm | 193 |
| 入射波 | 会聚高斯光束 |
| | NA=0.6 |
| | 光束焦点聚焦于针孔上表面中心 |
| 针孔直径/nm | 120~210 |
| 针孔厚度/nm | 125~275 |
| 膜层材料 | 铬(Cr, $n=0.85, k=1.66$) |
| 仿真区域/nm ³ | 1 500×1 500×400 |
| 元胞尺寸/nm | 2 |
| 时间步长/fs | 0.003 3 |

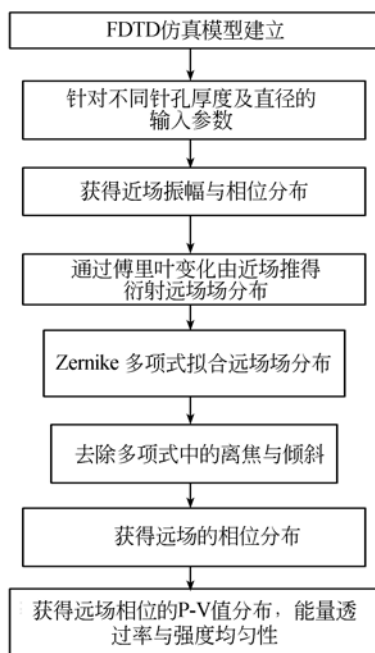


图 2 仿真流程图

Fig. 2 Flow chart of simulation

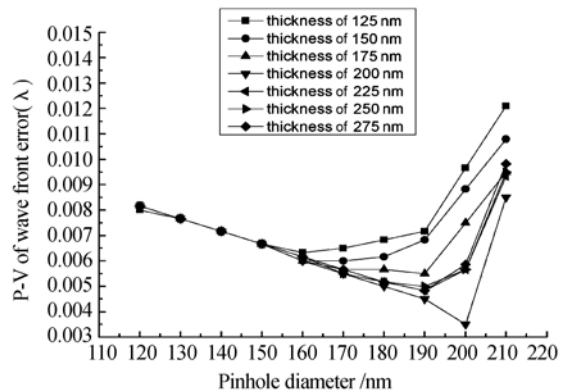
的远场分布;第三步,计算远场相位^[10]分布,进行 Zernike 多项式拟合^[11-12],去除离焦和倾斜项,获得衍射波前误差 P-V 值分布以及能量透过率和强度均匀性,仿真流程图如图 2 所示。

在仿真分析中,第一步的数值精度非常重要。选取不同的空间步长(1~6 nm,间隔 1 nm)和仿真尺寸(1 400~1 600 nm,间隔 25 nm),计算针孔厚度为 200 nm,直径为 180 nm 时衍射波前误差的 P-V 值,从而验证数值精度。空间步长在 1~6 nm 时,衍射波前误差 P-V 值的最大偏差为 0.2 mλ;仿真尺寸在 1 400~1 600 nm 时,衍射波前误差 P-V 值的最大偏差为 0.5mλ。仿真结果表明,建模和求解过程是稳定的,并且数值精度满足波前误差分析的要求。

4 结果与分析

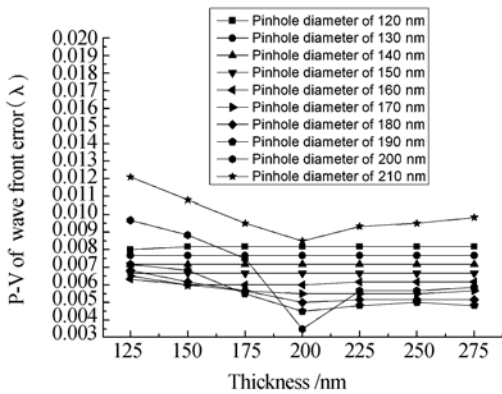
4.1 矢量衍射波前误差的 P-V 值

图 3 所示为衍射波前误差的 P-V 值随针孔厚度和直径的变化趋势。在针孔厚度为 200 nm、直径为 200 nm 时波前误差达到最小,此时 P-V 值为 0.003 5λ。图 3(a)中衍射波前误差未呈现单调变化,直径增加到 190 nm 或 200 nm 时波前误差出现拐点,并在直径增加到 210 nm 的过程中,衍射波前误差逐渐增大。这是因为针孔有一定厚度时,针孔除了空间滤波的作用外,还起到了光波导的作用,同时光波与孔壁的作用是各向异性的,针孔越小,这种作用越强,衍射波前误差越大。图 3(b)显示针孔直径在 120~160 nm 时不同针孔厚度的衍射波前误差的变化很小并随直径



(a)不同针孔厚度时波前误差与直径的关系

(a) Wave front error versus pinhole diameter under different thicknesses of pinhole



(b)不同针孔直径时波前误差与针孔厚度的关系

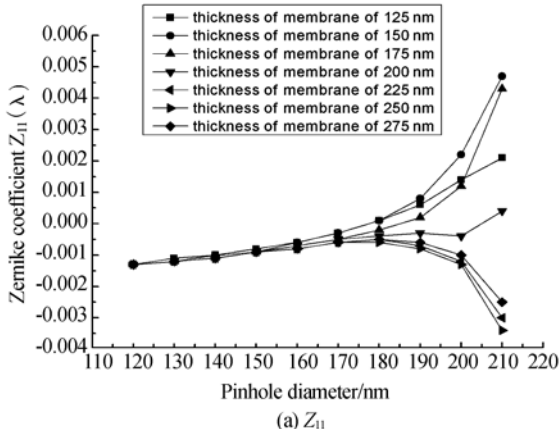
(b) Wave front error versus thickness under different pinhole diameters

图 3 波前误差 P-V 值与针孔厚度和针孔直径的关系
Fig. 3 P-V of wave front error respectively versus thickness and pinhole diameter

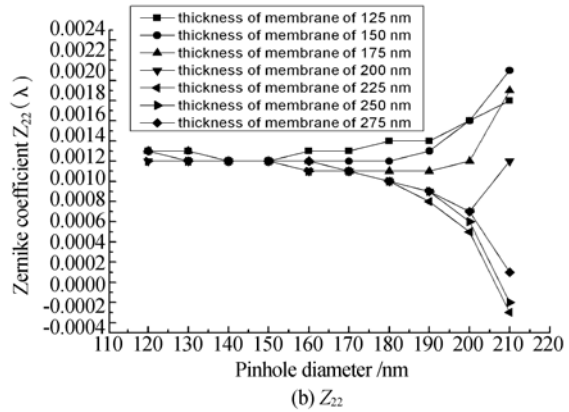
的增加呈减小趋势;除此之外,直径为 170~210 nm 时,针孔厚度在 125~175 nm 时衍射波前误差的 P-V 值大于厚度在 225~275 nm 的,这是因为随着针孔厚度的增加,入射高斯光束透过铬材料的透过率降低,从而使透过波前与衍射波前重叠给衍射波前质量带来的影响变小。针孔厚度为 200 nm,直径分别为 180,190 和 200 nm 时及厚度分别为 225,250 和 275 nm,直径为 190 nm 时衍射波前误差的 P-V 值都可以达到设计要求。

4.2 矢量衍射波前像差

对衍射波前进行 36 项 Zernike 多项式拟合,Zernike 系数中除了平移、离焦、倾斜项外,还存在 2 个大数值项球差 Z_{11} 和二阶球差 Z_{22} 。图 4 为不同针孔厚度,直径增加时球差项和二阶球差项的变化趋势图。对 Z_{11} 而言,厚度为 200 nm 时, Z_{11} 值最趋于零。厚度从 175 nm 变化到 200 nm,直径不小于



(a) Z_{11}



(b) Z_{22}

图 4 不同针孔厚度和直径时的衍射波前泽尼克多项式系数

Fig. 4 Zernike polynomial coefficients of diffracted wave front for different thicknesses and pinhole diameters

190 nm 时, Z_{11} 值从正值变化为负值。对于 Z_{22} ,厚度为 200 nm 和 225 nm 时, Z_{22} 值最趋于零,在直径 210 nm 时, Z_{22} 值也存在正值到负值的突变。

4.3 矢量衍射波前的能量透过率

根据衍射波前误差 P-V 值和 Zernike 多项式系数的分析,对针孔膜层厚度分别为 200,225,250 和 275 nm 时的矢量衍射波前进行数值仿真。 $NA=0.6$ 的会聚高斯光束通过针孔进行衍射,其能量透过率如图 5 所示。能量透过率随着针孔直径的增加而增大,但针孔越厚,能量透过率越低。在针孔厚度为 200 nm,直径为 180 nm 时能量透过率为 0.7。

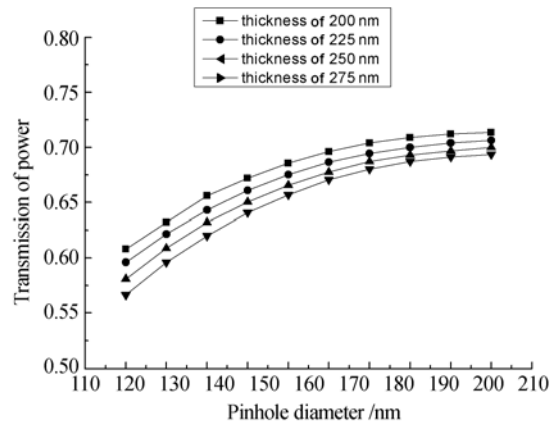


图 5 不同针孔厚度的能量透过率与针孔直径的关系

Fig. 5 Transmission of power versus pinhole diameters under different thicknesses

4.4 矢量衍射波前的强度均匀性

衍射波前由 H-S 传感器接收,为了提高 H-S 传感器的提取精度,必须保证衍射波前具有较好的强度均匀性。强度均匀性定义为 NA 内波面强度最小值和最大值的比值,用 γ 表示:

$$\gamma = I_{\min} / I_{\max}, \quad (3)$$

式中, I_{\min} 和 I_{\max} 分别表示内衍射波面强度的最小值和最大值。

图 6 所示针孔厚度为 200, 225, 250 和 275 nm 时,衍射波前强度均匀性与直径大小的关系。对于上述 4 种针孔厚度,强度均匀性变化不大,但随着直径的增加,强度均匀性变差。在满足衍射波前误差 P-V 值设计要求的前提下,针孔厚度为 200 nm,直径为 180 nm 时强度均匀性最好,即为 0.29,满足传感器标定时强度均匀性的要求。

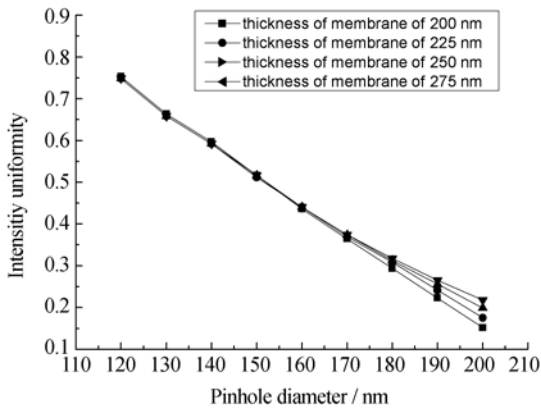


图 6 不同针孔厚度的强度均匀性与针孔直径的关系

Fig. 6 Intensity uniformity versus pinhole diameters under different pinhole thicknesses

通过上述衍射波前误差、能量透过率和强度均匀性的分析,对厚度为 200 nm,直径分别为 180, 190 和 200 nm 时的针孔进行加工误差分析及在会聚高斯光束相对针孔中心存在定位误差时的数值分析。

4.5 针孔加工误差的衍射波前误差

由于针孔在制作过程中有加工误差,针孔的上下表面直径误差具有随机性,虽然直径误差很小,仍会导致针孔成为锥形或倒锥形,在此将仿真的针孔直径变化扩大到 120~210 nm。图 7 为针孔厚度为 200 nm,不同针孔上、下表面直径下的衍射波前误差 P-V 值的趋势图。当针孔上表面直径一定时,随着针孔下表面直径的增加,衍射波

前误差的 P-V 值先减小而后增大,在针孔上下表面直径都为 200 nm 的圆柱形即不存在加工误差时,衍射波前误差的 P-V 值达到最小。

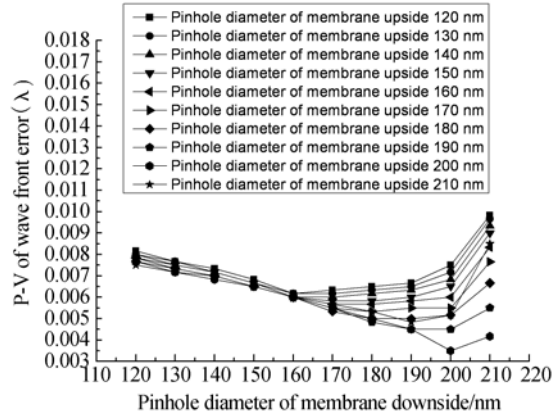


图 7 针孔不同上下表面直径的波前误差 P-V 分布
Fig. 7 P-V of wave front error for different pinhole diameters upside and downside

4.6 会聚高斯光束相对针孔中心存在定位误差时的衍射波前误差

4.6.1 光束平移时的衍射波前误差

图 8 所示为针孔厚度为 200 nm,直径分别为 180, 190 和 200 nm 时,会聚高斯光束焦点相对针孔上表面中心发生平移时的衍射波前误差 P-V 值分布。焦点的最大偏移量为 ± 50 nm,随着偏移量绝对值的增加,衍射波前误差增大。针孔直径为 180 nm 时的衍射波前误差相对未平移的变化量最小。

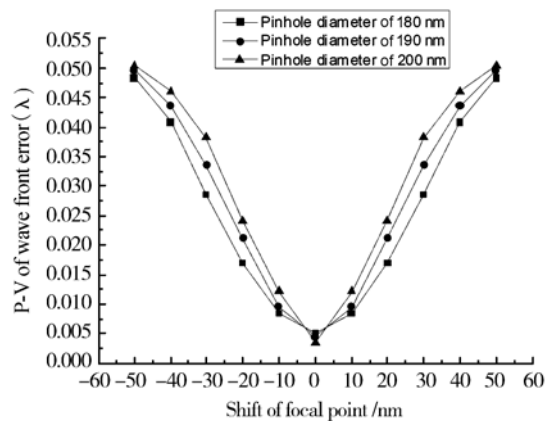


图 8 光束焦点相对针孔上表面中心平移时波前误差的 P-V 分析

Fig. 8 P-V of wave front error in case that the focal position of incident light moves on upside of pinhole

4.6.2 光束离焦时的衍射波前误差

图 9 所示为针孔厚度为 200 nm, 直径分别为 180, 190 和 200 nm 时, 会聚高斯光束焦点相对针孔上表面中心发生离焦时衍射波前误差的 P-V 值分布。离焦量为零表示焦点处于针孔上表面中心, 正值表示焦点向针孔内部移动。最大离焦量为 ± 160 nm, 当焦点远离针孔上表面时, 衍射波前误差变化量很小; 而当朝针孔下表面离焦时, 衍射波前误差非单调变化。Yoshiyuki Sekine 等^[6]对基底材料钽所作的计算也同样出现非单调性的情况。针孔直径为 180 nm 时, 衍射波前误差的变化量最小。

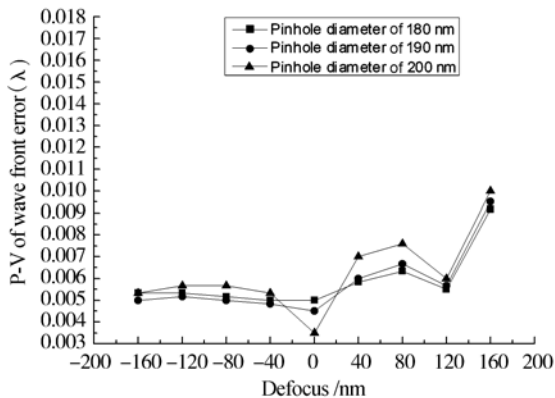


图 9 光束焦点相对针孔上表面中心离焦时衍射波前误差 P-V 值分布

Fig. 9 P-V of wave front error in case that focal position of incident light moves parallel to normal of pinhole

4.6.3 光束倾斜时的衍射波前误差

图 10 所示为针孔厚度为 200 nm, 直径分别为 180, 190 和 200 nm 时, 会聚高斯光束焦点相对针孔上表面中心法线发生倾斜时的衍射波前误差 P-V 值分布。焦点的最大倾斜量为 $\pm 5^\circ$, 随着倾角为 200 nm 时, 衍射波前误差变化量最小。

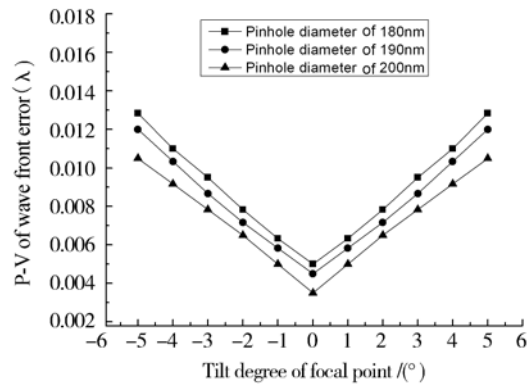


图 10 光束焦点相对针孔上表面中心法线倾斜时衍射波前误差 P-V 值分布

Fig. 10 P-V of wave front error in case that focal position of incident light tilts to normal of pinhole

5 结 论

基于矢量衍射理论, 采用时域有限差分方法对会聚高斯光束通过纳米级针孔的矢量衍射进行建模, 并对衍射波前误差、波前 Zernike 多项式系数、能量透过率、强度均匀性、针孔加工误差和会聚高斯光束相对针孔中心平移、离焦、倾斜进行了数值仿真分析。数值孔径 $NA=0.6$ 时, 要获得衍射波前误差 P-V 值不大于 0.005λ , 需要综合考虑能量透过率、强度均匀性和各种误差对针孔矢量衍射波前误差的影响。当针孔厚度为 200 nm, 直径在 180 nm 时, 衍射波前误差的 P-V 值为 0.005λ , 能量透过率为 0.7, 强度均匀性为 0.29。此时, 针孔直径的加工误差 $< \pm 10$ nm, 会聚高斯光束平移 $< \pm 5$ nm、离焦 $< \pm 120$ nm、倾斜 $< \pm 1^\circ$ 。因此, 在实际针孔的加工制作中, 选取其厚度为 200 nm, 直径在 180 nm 较为适宜。

参考文献:

[1] SANG H L, PATRICK N, GOLDBERG K A, *et al.*. Phase-shifting point-diffraction interferometry at 193nm [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39 (31): 5768-5772.

[2] TORU F, KOSUKE S, YASUSHI M, *et al.*. Integrat-

ed projecting optics tester for inspection of immersion ArF scanner [J]. *SPIE*, 2006, 6152, 37:1-7.

[3] 程少园, 曹召良, 胡立发, 等. 用夏克-哈特曼探测器测量人眼波前像差 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18 (5): 1060-1067.

CHENG SH Y, CAO ZH L, HU L F, *et al.*. Measurement of wavefront aberrations of human eyes with Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Opt. Precision*

- Eng. ,2010,18(5):1060-1067. (in Chinese)
- [4] 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.
MA Q, LIU W Q, LI X B, *et al.*. Analysis of diffraction wavefront error in point diffraction interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12):2321-2324. (in Chinese)
- [5] GOLDBERG K A, TEJNIL E, BOKOR J. A 3-D numerical study of pinhole diffraction to predict of accuracy of EUV point diffraction interferometry[J]. *Optical Society of America*,1996.
- [6] YOSHIYUKI S, AKIYOSHI S, MASANOBU H, *et al.*. Wave-front errors of reference spherical waves in high-numerical aperture point diffraction interferometers[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*,2004,22(1):104-108.
- [7] OTAKI K, ZHU Y, ISHII M, *et al.*. Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL[J]. *SPIE*,2004,5193:182-190.
- [8] YANG J S, WEI L, CHEN H L, *et al.*. Absolute calibration of Hartmann-Shack wavefront sensor by spherical wavefronts[J]. *Opt. Com.*,2010,283:910-916.
- [9] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005:11-34.
GE D B, YAN Y B. *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetic*[M]. Xi'an: Xidian University Press,2005:11-34. (in Chinese)
- [10] 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.
MA D M, CHEN T Q, LIU ZH X, *et al.*. Application of phase retrieval technology in evaluation of optical imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,17(12):2912-2918. (in Chinese)
- [11] 惠梅,牛愁笨. 运用泽尼克多项式进行物面波前数据拟合[J]. 光子学报,1999,28(12):1113-1116.
HUI M, NIU H B. A method of wavefront data fitting using Zernike polynomials[J]. *Acta Photonica Sinica*,1999,28(12):1113-1116. (in Chinese)
- [12] 元波,陈洪斌,刘顺发,等. Zernike 多项式波面拟合的回归分析方法[J]. 光学精密工程,2007,15(3):396-400.
QI B, CHEN H B, LIU SH F, *et al.*. Regression analysis of wavefront fitting using Zernike polynomial[J]. *Opt. Precision Eng.*,2007,15(3):396-400. (in Chinese)

作者简介:

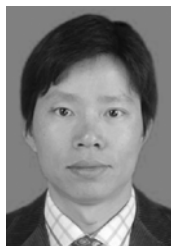


王 俐(1977—),女,四川成都人,博士研究生,2000年于西安工业学院获得学士学位,2007年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事光学检测及精密定位技术方面的研究。E-mail: wangli9613@126.com



饶学军(1967—),男,四川人,硕士,研究员,硕士生导师,1989于北京理工大学获得学士学位,2003年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事哈特曼传感器波前探测及人眼像差测量方面的研究。E-mail: xjrao@ioe.ac.cn

导师简介:



饶长辉(1971—),江西南昌人,博士,研究员,博士生导师,1993年于武汉测绘科技大学电子工程系获学士学位,1997年、2001年于中国科学院光电技术研究所分别获硕士和博士学位,主要从事自适应光学技术与系统研制方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn