

照明物镜数值孔径对微孔衍射波前质量影响分析

齐月静 卢增雄* 杨光华 刘成涛 彭卓君

中国科学院光电研究院, 北京 100094

摘要 通过微孔衍射产生高质量的球面波是进行夏克-哈特曼波前传感器(SHWS)高精度标定的关键。采用时域有限差分(FDTD)法,进行了193 nm准分子激光照明下有限厚度有限电导率微孔的衍射仿真计算,分析了照明物镜数值孔径(NA)对微孔衍射波前质量的影响,确定了满足SHWS高精度标定所需微孔直径和照明物镜NA的大小。分析计算得出,采用直径为200 nm的微孔及NA为0.6~0.75的照明物镜时,衍射波前均方根(RMS)偏差为 $3.50 \times 10^{-3} \lambda$,强度均匀性为0.10,微孔透射率约为0.15,满足SHWS进行纳米精度波像差检测对参考球面波质量的要求。

关键词 测量; 时域有限差分法; 数值孔径; 微孔衍射; 波前质量

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0208001

Analysis of Effect of Numerical Aperture of Illumination Objective Lens on Quality of Wavefront Diffracted by Tiny Pinhole

Qi Yuejing Lu Zengxiong Yang Guanghua Liu Chengtao Peng Zhuojun

Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract High quality spherical wave, which is generated by the pinhole diffraction, is the core for the calibration of the Shack-Hartmann wavefront sensor (SHWS) with high-accuracy. The diffraction of the tiny pinhole under the illumination of the excimer laser with wavelength of 193 nm is calculated based on finite-difference time-domain (FDTD) method. The finite thickness and real conductivity of the pinhole are considered. The effect of numerical aperture (NA) of the illumination objective lens on the quality of the wavefront diffracted by the tiny pinhole is analyzed. The diameter of the tiny pinhole and the NA of the illumination objective lens needed to calibrate the SHWS with high accuracy are determined. The calculation and analysis show that, to obtain the wavefront whose quality meets the requirement of wavefront error measurement by using SHWS method with nanometer accuracy, the diameter of the tiny pinhole should be 200 nm and the NA of the illumination objective lens should be in the range of 0.6 to 0.75. In this situation, the RMS deviation of the wavefront diffracted by the tiny pinhole is $3.50 \times 10^{-3} \lambda$; the intensity uniformity is 0.10; the transmission of the tiny pinhole is about 0.15.

Key words measurement; finite-difference time-domain method; numerical aperture; tiny pinhole diffraction; wavefront quality

OCIS codes 050.1940; 070.7345; 120.4630; 120.5050

1 引 言

光学投影光刻是目前半导体制造中采用的主流光刻技术。投影物镜系统作为光刻机的核心部件,其波像差是影响光刻成像质量、分辨率和特征尺寸均匀性等光刻技术指标的重要因素。因此,投影物镜系统波像差的高精度检测是实现投影物镜系统成像性能的重要保证。

收稿日期: 2014-07-29; 收到修改稿日期: 2014-08-29

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02206)

作者简介: 齐月静(1977—),女,博士,副研究员,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: qiyuejing@aoe.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: luzengxiong@aoe.ac.cn

在基于夏克-哈特曼波前传感器(SHWS)的投影物镜系统波像差检测中,准直物镜的波像差和SHWS的误差是检测结果中系统误差的主要来源^[1-2]。对于90 nm工艺节点的投影物镜系统,其数值孔径为0.75,波像差均方根(RMS)值约为10.0 nm,要求检测精度达到2.0 nm(RMS)。为实现该检测精度,需提供数值孔径(NA)达0.75、波面RMS误差优于 $5.2 \times 10^{-3} \lambda$ 、强度均匀性优于0.083的高质量球面波,进行SHWS检测中系统误差的高精度标定。该球面波通常由微孔衍射产生,影响微孔衍射波前质量(波面误差和强度均匀性)的因素包括微孔的材料、厚度、直径大小、圆度、对准误差、照明物镜的像差和数值孔径等。

目前,国内外已有不少微孔衍射波前质量研究工作的报道。马强等^[3]采用标量衍射理论分析了可见光情况下微孔的直径大小对衍射波前误差的影响情况。卢增雄等^[4-6]采用时域有限差分法(FDTD)分析了极紫外波段下三维微孔直径大小和厚度对衍射波前质量的影响及可见光情况下照明物镜像差对微孔衍射波前质量的影响,采用标量衍射理论分析了微孔圆度误差对衍射波前质量的影响。陈琛等^[7]采用FDTD方法分析了可见光下微孔直径大小对衍射波前质量的影响。许嘉俊等^[8]采用有限元法(FEM)分析了可见光下微孔厚度、直径大小和对准误差对衍射波前质量的影响。王俐等^[9]采用FDTD法分析了193 nm波段下微孔厚度、直径大小、加工误差和对准误差对衍射波前质量的影响。郑猛等^[10]采用FDTD法分析了微孔厚度、直径大小、加工误差,照明物镜像差对衍射波前质量的影响。高芬等^[11]采用矢量瑞利-索末菲衍射积分公式分析了微孔对准误差对衍射波前质量的影响。Sekine等^[12]采用FDTD法分析了极紫外波段微孔的直径大小和材料对衍射波前质量的影响。Otaki等^[13]采用严格耦合波(RCW)法分析了可见光情况下微孔厚度、直径大小和对准误差对衍射波前质量的影响。然而,照明物镜NA大小对衍射波前质量影响的研究未见报道。由于在线偏振光照明下,照明物镜NA越大,聚焦光斑越小,能量分布的不对称性越明显,这将影响微孔衍射波前的质量。

本文采用FDTD方法,分析193 nm波段下照明物镜的NA对微孔衍射波前质量的影响情况。研究不同NA的照明物镜,其聚焦光斑经过不同直径大小的微孔衍射后,衍射波前的偏差和强度均匀性以及微孔的透射率情况,从而确定投影物镜系统波像差检测标定实验中微孔直径和照明物镜NA的大小。分析结果对实现夏克-哈特曼波前传感器的高精度标定具有重要的指导意义。

2 计算模型

微孔衍射模型如图1所示,波长为193 nm的光束经过照明物镜聚焦后照射到微孔上表面中心,经过微孔衍射后产生近于理想的球面波。在整个分析过程中,首先采用FDTD法,计算得到微孔附近的场分布,其次采用近-远场变换法得到远场球面上的场分布^[14],然后采用最小二乘法确定远场衍射波前的最佳参考球并计算其相对于最佳参考球的偏差^[5],最后采用Zernike多项式对该偏差作拟合^[15-16],计算去除平移项、倾斜项和离焦项后远场衍射波前的RMS偏差。

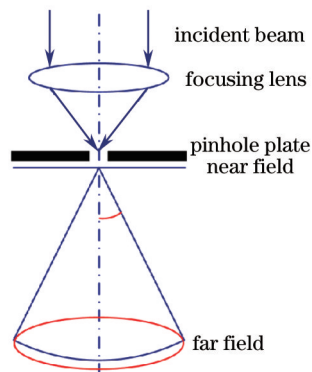


图1 微孔衍射模型

Fig.1 Tiny pinhole diffraction model

入射光波经照明物镜聚焦的模型如图2所示。入射光波沿z轴方向入射到照明系统的入瞳 Ω' 上,入射高度为 h ,传播波矢为 $\mathbf{k}_0=(k_{0x}, k_{0y}, k_{0z})$,传播到出瞳 Ω 后,聚焦到高斯焦点上。 Ω 是以焦距 f 为半径的球面,其最大半孔径角为 α 。设聚焦区域的折射率为 n (照明物镜 $NA = n \sin \alpha$),传播波矢为 $\mathbf{k}=n\mathbf{k}_0=(k_x, k_y, k_z)$ 。设入瞳处的

光场为 \mathbf{E}' , 则柱坐标下焦点附近的场分布为

$$\mathbf{E}(r, \varphi, z) = -\frac{if}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{NAk_0} \sqrt{\frac{k_z}{k}} \frac{\mathbf{L} \cdot \mathbf{E}'(k_r, k_\varphi)}{k_z} \exp[ik_r r \cos(k_\varphi - \varphi) + ik_z z] k_r dk_r dk_\varphi, \quad (1)$$

式中 \mathbf{L} 为聚焦物镜的变换矩阵, 其作用包含直角坐标系和柱坐标系间的相互转换以及场矢量的旋转。 \mathbf{L} 的表达式为

$$\mathbf{L} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} k_z \cos^2 k_\varphi + k \sin^2 k_\varphi & (k_z - k) \sin k_\varphi \cos k_\varphi & 0 \\ (k_z - k) \sin k_\varphi \cos k_\varphi & k_z \sin^2 k_\varphi + k \cos^2 k_\varphi & 0 \\ -k_r \cos k_\varphi & -k_r \sin k_\varphi & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

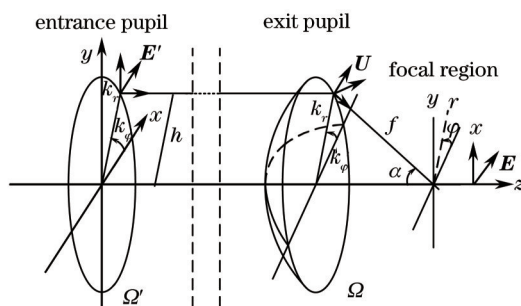


图2 光波场聚焦模型

Fig.2 Model of light field focusing

远场衍射波前偏差 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0 \quad (3)$$

式中 φ 为微孔衍射波前的相位, φ_0 为微孔衍射波前最佳拟合球的相位。衍射波前的 RMS 偏差(记为 R_{MS})

$$R_{MS} = \text{std}(\Delta\varphi), \quad (4)$$

式中 $\text{std}()$ 函数的作用为求方差。作为衍射波前质量的另一个重要指标即衍射波前的强度均匀性 η , 定义为在考察的 NA 内衍射波前强度的最小值 I_{\min} 与最大值 I_{\max} 之比, 表示为

$$\eta = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}. \quad (5)$$

此外, 为了提高探测器的信噪比, 要求微孔具有足够高的透射率, 这可通过增大照明物镜的 NA 和微孔的直径大小来实现。因此, 在保证衍射波前的偏差和强度均匀性的同时, 应使微孔的透射率尽量高。微孔的透射率 T 为

$$T(f) = \frac{\frac{1}{2} \int \text{real}\{[\mathbf{P}(f)_o] \cdot d\mathbf{S}\}}{P_s}, \quad (6)$$

式中 f 为照明光波的频率, $\mathbf{P}(f)_o$ 为输出面的坡印亭矢量, $d\mathbf{S}$ 为输出面面元法向矢量, 积分区域为整个输出面, P_s 为照明光源的功率。

3 结果与讨论

这里计算采用的参数如表1所示。入射 X 偏振光波波长为 193 nm, 经过照明物镜聚焦到微孔顶部中心; 照明物镜 NA 为 0.3~0.9, 步长为 0.15; 微孔直径大小为 100~250 nm, 步长为 10 nm, 厚度为 200 nm, 材料采用金(Au), 在 193 nm 波段下的光学常数为 $n=1.2528, k=1.0443$; 仿真区域大小为 1100 nm×1100 nm×800 nm。这里考察 NA 为 0.75 内衍射波前的偏差和强度均匀性。

3.1 照明物镜焦面上的强度和相位分布

照明物镜 NA 决定了微孔照明光斑的大小与形状, 进而影响到微孔衍射波前的质量。根据(1)式和(2)式, 采用 Matlab 计算 NA 分别为 0.3、0.45、0.6、0.75、0.9 的照明物镜焦面上的强度和相位分布, 结果如图3所示。强度分布如图3(a)、(c)、(e)、(g)和(i)所示, 随着照明物镜 NA 的增大, 照明光斑逐渐减小, 强度逐渐增强, 但是光

表 1 计算参数

Table 1 Parameters for calculation

Parameter	Value
Wavelength	193 nm
Illumination light	X polarized, converging Gaussian beam; focus on pinhole center and membrane bottom
NA of the illumination lens	0.3~0.9 with step of 0.15
Pinhole diameter	100~250 nm with step of 10 nm
Pinhole thickness	200 nm
Membrane material	Au ($n=1.2528, k=1.0443$ @193 nm)
Size of simulation domain	1100 nm×1100 nm×800 nm
NA of the spherical wave considered	0.75

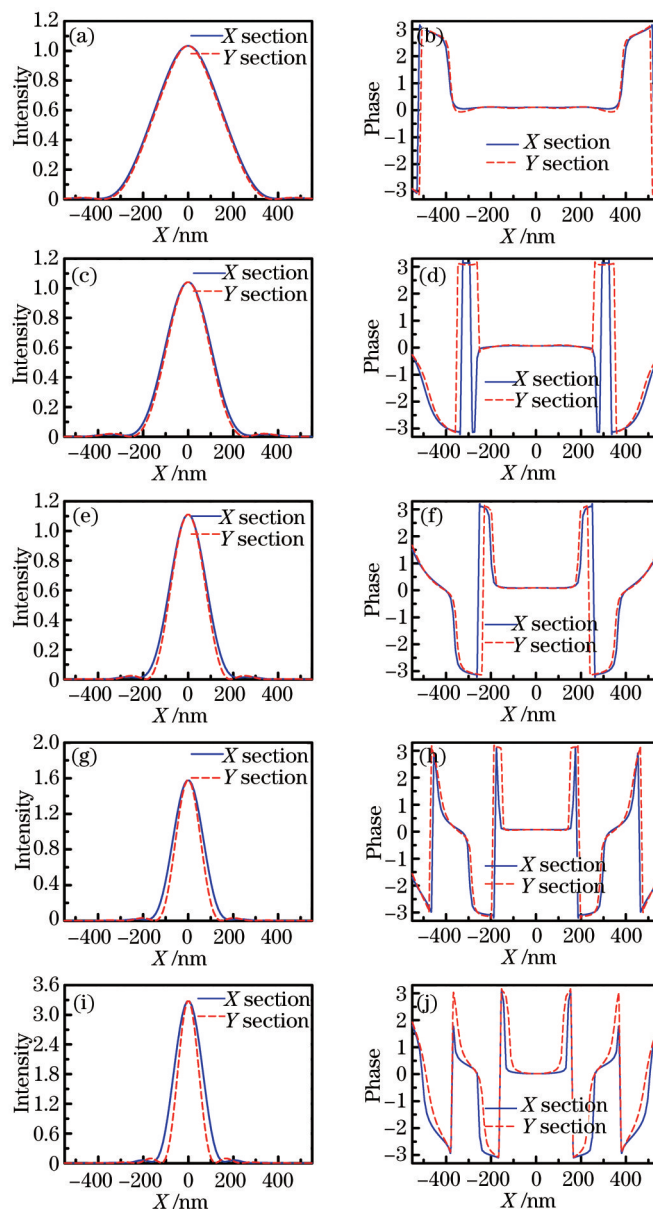


图3 不同NA照明物镜焦面上的强度和相位分布截面图。(a) $NA=0.3$,强度分布;(b) $NA=0.3$,相位分布;(c) $NA=0.45$,强度分布;(d) $NA=0.45$,相位分布;(e) $NA=0.6$,强度分布;(f) $NA=0.6$,相位分布;(g) $NA=0.75$,强度分布;(h) $NA=0.75$,相位分布;(i) $NA=0.9$,强度分布;(j) $NA=0.9$,相位分布

Fig.3 Section of intensity and phase distribution on focal plane of illumination objective lens with different NA . (a) $NA=0.3$, intensity distribution; (b) $NA=0.3$, phase distribution; (c) $NA=0.45$, intensity distribution; (d) $NA=0.45$, phase distribution; (e) $NA=0.6$, intensity distribution; (f) $NA=0.6$, phase distribution; (g) $NA=0.75$, intensity distribution; (h) $NA=0.75$, phase distribution; (i) $NA=0.9$, intensity distribution; (j) $NA=0.9$, phase distribution

斑在 X 和 Y 截面上的大小,即旋转不对称性也越明显;相位分布如图 3(b)、(d)、(f)、(h)和(j)所示,艾里斑内的相位基本上是平坦的,但是随着照明物镜 NA 的增大,相位平坦部分逐渐变窄,并且相位平坦部分的宽度在 X 和 Y 截面上的差别随着照明物镜 NA 的增大而增大。由下文可知,当微孔直径大于该平坦部分的宽度时,照明物镜焦面上强度和相位分布的不对称性将给微孔衍射波前中引入较大的像散,而当微孔直径小于该平坦部分的宽度时,该影响较小。

3.2 微孔附近强度和相位分布

按照上述模型和参数进行计算,直径 200 nm 的微孔在照明物镜 NA 为 0.6 时,微孔附近的强度和相位分布情况如图 4 所示。图 4(a)和(b)分别为 XZ 截面和 YZ 截面上的强度分布,图 4(c)和(d)分别为 XZ 截面和 YZ 截面上的相位分布。由图可知,微孔衍射波前的能量大部分集中在一定范围内,衍射波前是近于理想的球面波。在与照明光波偏振方向平行的截面上,可以看到清晰的微孔轮廓,而与照明光波偏振方向垂直的截面上,微孔轮廓是模糊的。这可通过电磁场的边界条件进行解释^[5]。线偏振照明光波与微孔作用的非旋转对称性也是造成下文微孔衍射波前中出现像散的主要原因。

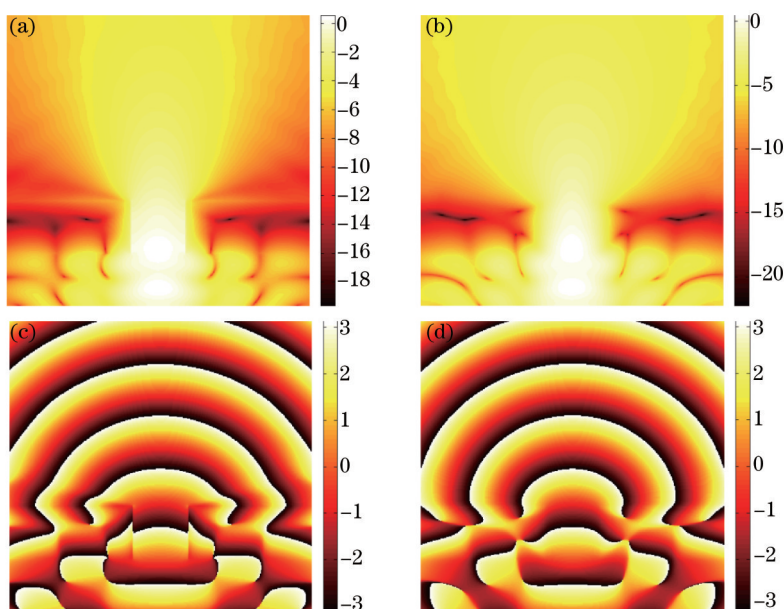


图 4 微孔附近的强度和相位分布。(a) XZ 截面上的强度分布(取 10 的对数); (b) YZ 截面上的强度分布(取 10 的对数); (c) XZ 截面上的相位分布; (d) YZ 截面上的相位分布

Fig.4 Intensity and phase distribution in the vicinity of micro-pinhole. (a) Intensity in XZ plane (in logs base 10); (b) intensity in YZ plane (in logs base 10); (c) phase in XZ plane; (d) phase in YZ plane

3.3 照明物镜 NA 对微孔衍射波前质量的影响

在不同照明物镜 NA 下,微孔衍射波前的 RMS 偏差随微孔直径大小的变化关系如图 5 所示。由图可知,当照明物镜的 NA 为 0.3、0.45、0.6、0.75、0.9 时,衍射波前的 RMS 偏差均在微孔直径为 210 nm 处达到极小值,分别为 $3.17 \times 10^{-3} \lambda$, $3.12 \times 10^{-3} \lambda$, $3.10 \times 10^{-3} \lambda$, $3.08 \times 10^{-3} \lambda$ 和 $3.04 \times 10^{-3} \lambda$ 。由 3.1 节可知,当微孔直径小于 210 nm 时,不同照明物镜 NA 下,由于聚焦光斑在小孔范围内的不对称不明显,因此,相同直径的微孔衍射波前的 RMS 偏差基本一致。而当微孔直径大于 210 nm 时,照明物镜 NA 越大,聚焦光斑在微孔范围内的不对称性越大,使得衍射波前的 RMS 偏差随 NA 的增大而增大,并且微孔直径越大该偏差也越大。图 6 中给出了照明物镜 NA 为 0.75 时,直径 150、210、230、250 nm 的微孔衍射波前的 Zernike 多项式系数。由图可知,衍射波前的主要像差为第 5 项和第 12 项的像散、第 9 项的球差以及第 17 项的四叶像差。上述微孔衍射波前 RMS 偏差不随微孔直径大小作单调变化,其主要原因在于 Zernike 多项式中起主要作用的第 5 项像散不随微孔直径大小做单调变化。这种非单调变化的出现主要是入射线偏振光和微孔的谐振作用引起的。

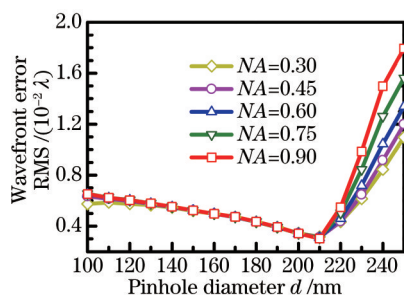


图 5 不同照明物镜 NA 下微孔衍射波前偏差与微孔直径大小的关系

Fig.5 Relationship between wavefront error and pinhole diameter when NA of illumination objective lens differs

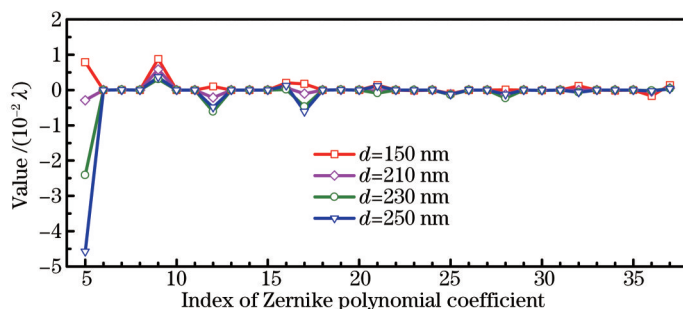


图 6 不同直径的微孔当照明物镜 NA 为 0.75 时衍射波前的 Zernike 多项式系数

Fig.6 Zernike polynomials coefficients of wavefront diffracted by pinhole with different diameters illuminated by objective lens with NA of 0.75

图 7 进一步给出了直径为 100、150、200、250 nm 的微孔衍射波前 RMS 偏差随照明物镜 NA 大小的变化关系。由图可知,直径为 100、150、200 nm 的微孔,衍射波前 RMS 偏差基本不随照明物镜 NA 的变化而变化,分别为 $6.54 \times 10^{-3} \lambda$, $5.24 \times 10^{-3} \lambda$ 和 $3.42 \times 10^{-3} \lambda$,而直径为 250 nm 的微孔,当照明物镜 NA 从 0.3 增大到 0.9 时,衍射波前 RMS 偏差从 $1.10 \times 10^{-2} \lambda$ 单调增大到 $1.80 \times 10^{-2} \lambda$ 。当微孔直径为 250 nm,照明物镜 NA 分别为 0.3、0.45、0.6、0.75、0.9 时,衍射波前的 Zernike 多项式系数如图 8 所示。由图可知,照明物镜 NA 的不同主要引起的是 Zernike 多项式系数第 5 项像散的变化,像散项随着照明物镜 NA 的增大而增大。如上文所述,这与照明物镜 NA 越大时聚焦光斑越不对称有关,此即为直径 250 nm 的微孔的衍射波前的 RMS 偏差随照明物镜 NA 的增大而增大的主要原因。因此,为了使衍射波前偏差小于 $5.0 \times 10^{-3} \lambda$ (RMS),微孔直径大小需控制在 160~220 nm 范围内。

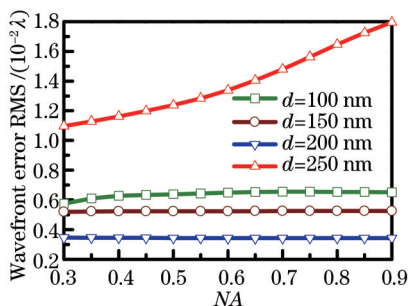


图 7 不同直径的微孔衍射波前偏差与照明物镜 NA 大小的关系

Fig.7 Relationship between wavefront errors of pinholes with different diameters and NA of illumination objective lens

在不同照明物镜 NA 下,微孔衍射波前的强度均匀性如图 9 所示。由图可知,微孔衍射波前的强度均匀性基本不随照明物镜 NA 的变化而变化。随着微孔直径的增大,衍射波前的强度均匀性减小,主要原因是微孔直径大小直接决定了衍射角的大小,微孔直径越大衍射角越小,因此强度均匀性越差。直径为 160~220 nm 的微孔,衍射波前的强度均匀性分别为 0.22、0.18、0.16、0.13、0.10、0.075、0.063。实验室中的夏克-哈特曼波前传感器为了实现 0.01λ 的检测精度,要求衍射波前的强度均匀性大于 0.083,因此,考虑到微孔衍射波前的强度均匀性,微孔直径大小应控制在 160~200 nm 之间。

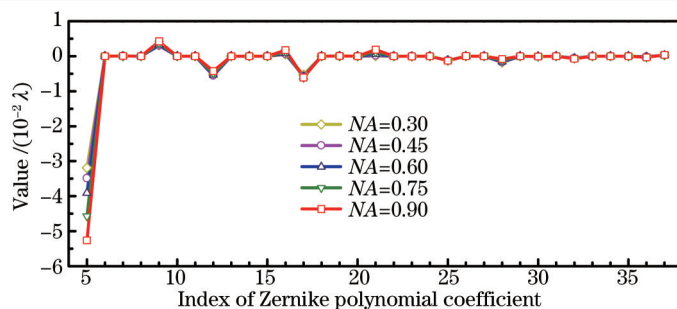


图8 不同照明物镜NA下直径为250 nm的微孔衍射波前的Zernike多项式系数

Fig.8 Zernike polynomials coefficients of wavefront diffracted by pinhole with 250 nm under different illumination light NA

在不同照明物镜NA下,不同直径的微孔透射率如图10所示。由图可知,微孔直径越大,透射率越高,这是显然的。为了获得高透射率且满足衍射波前偏差和强度均匀性的要求,需采用直径为200 nm的微孔。微孔的透射率随照明物镜NA的增大而增大,这是因为照明物镜NA越大,聚焦光斑能量越集中,越多的能量通过微孔发生衍射。但是当微孔直径大于200 nm时,微孔在照明物镜NA为0.9时的透射率反而要低于照明物镜NA为0.75时的透射率。这可能是因为微孔具有一定的厚度,照明物镜NA为0.9时,光束倾角过大,使孔壁反射产生能量损失。直径200 nm的微孔,在照明物镜NA为0.3、0.45、0.6、0.75、0.9时,其透射率分别为0.055、0.10、0.14、0.17、0.17。此外,在193 nm波段,大NA的照明物镜价格十分昂贵。因此,兼顾透射率和价格因素,可采用NA为0.6或0.75的照明物镜。

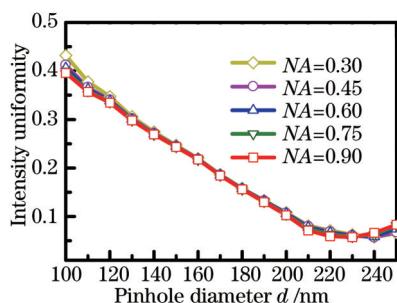


图9 不同照明物镜NA下微孔衍射波前的强度均匀性与微孔直径大小的关系

Fig.9 Relationship between intensity uniformity of wavefront diffracted by pinhole and pinhole diameter under different illumination light NA

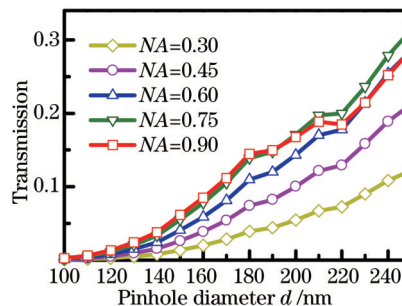


图10 不同照明物镜NA下微孔的透射率与微孔直径大小的关系

Fig.10 Relationship between transmittance of pinhole and the pinhole diameter under different NA of illumination objective lens

4 结 论

采用FDTD法分析了照明物镜NA对微孔衍射波前质量的影响,获得了不同照明物镜NA下微孔衍射波前偏差随微孔直径大小的变化规律。为了实现夏克-哈特曼波前传感器的高精度标定,综合考虑波前偏差、强度均匀性和透射率,宜采用直径为200 nm的微孔及NA为0.6~0.75的照明物镜。此时,衍射波前RMS偏差为 $3.50 \times 10^{-3} \lambda$,强度均匀性约为0.10,微孔透射率约为0.15。本文的研究对实现夏克-哈特曼波前传感器亚纳米精度的标定具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- 1 T Fujii, J Kougo, Y Mizuno, *et al.*. Portable phase measuring interferometer using Shack-Hartmann method[C]. SPIE, 2003, 5038: 726-732.
- 2 T Fujii, K Suzuki, Y Mizuno, *et al.*. Integrated projecting optics tester for inspection of immersion ArF scanner[C]. SPIE, 2006, 6152: 615237.
- 3 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.
- 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 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Ma Dongmei. Rigorous vector analysis of the effect of illumination objective lens aberration on the quality of far-field diffracted wave front[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0812001.
- 卢增雄, 金春水, 马冬梅. 照明物镜像差对远场衍射波前质量影响的严格矢量分析[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0812001.
- 6 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Ma Dongmei, *et al.*. Analysis of effect of tiny pinhole deviation on far-field wave-front quality[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812002.
- 卢增雄, 金春水, 马冬梅, 等. 微小孔偏差对远场波前质量影响分析[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812002.
- 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 Xu Jiajun, Xing Tingwen. Analysis of two-dimensional pinhole vector diffraction in visible light[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1205003.
- 许嘉俊, 邢廷文. 可见光二维小孔矢量衍射分析[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1205003.
- 9 Wang Li, Rao Changhui, Rao Xuejun. Analysis of wave-front error for nanometer pinhole vector diffraction[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 499–505.
- 王 俐, 饶长辉, 饶学军. 纳米级针孔矢量衍射波前误差分析[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(3): 499–505.
- 10 Zheng Meng, Li Yanqiu, Liu Ke. Design of mask for phase-shifting point diffraction interferometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 031201.
- 郑 猛, 李艳秋, 刘 克. 相移点衍射干涉仪用衍射板结构设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 031201.
- 11 Gao Fen, Jiang Zhuangde, Lin Bing. Analysis of diffraction wavefront error caused by alignment error of pinhole[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0812004.
- 高 芬, 蒋庄德, 李 兵. 不同对准误差下的小孔衍射波面误差分析[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0812004.
- 12 Y Sekine, A Suzuki, M Hasegawa, *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.
- 13 K Otaki, Y Zhu, M Ishii, *et al.*. Rigorous wave front analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL[C]. SPIE, 2004, 5193: 182–190.
- 14 Alien T. Computational Electromagnetic: Finite-Difference Time-Domain Method[M]. Boston: Artech House, 2005. 329–352.
- 15 Daniel Malacara-Hernandez, Martin Carpio-Valadez, Jose Javier Sanchez-Mondragon. Wavefront fitting with discrete orthogonal polynomials in a unit radius circle[J]. Opt Eng, 1990, 29(6): 672–675.
- 16 D J Fischer, J T O'Bryan, R Lopez, *et al.*. Vector formulation for interferogram surface fitting[J]. Appl Opt, 1993, 32(25): 4738–4743.

栏目编辑: 何卓铭