

文章编号: 0253-2239(2010)10-2849-06

极紫外三维小孔矢量衍射波面质量分析

卢增雄^{1,2} 金春水¹ 张立超¹ 王丽萍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 相移点衍射干涉仪中参考球面波的质量取决于小孔的直径、圆度和厚度, 其中小孔的直径是最主要的因素, 在实际加工前, 需给出小孔直径的要求。基于矢量衍射理论, 分析计算了三维结构小孔的衍射。分析了在均匀的TE偏振光和TM偏振光入射情况下, 小孔直径大小对衍射波面质量的影响。入射光的线性偏振, 给衍射波面中引入了像散和彗差。分析计算得出, 为了获得数值孔径(NA)为0.1, 相对于理想球面波的均方根(RMS)偏差不大于 0.005λ ($\lambda=13.55\text{ nm}$), 强度均匀性为0.4的参考球面波, 对90 nm厚的小孔选择直径大小为70 nm较为适宜。

关键词 光学检测; 相移点衍射干涉仪; 矢量衍射; 三维小孔; 波面误差; 强度均匀性

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.2849

Wave-Front Quality Analysis of Three-Dimension Pinhole Vector Diffractive in Extreme Ultraviolet Region

Lu Zengxiong^{1,2} Jin Chunshui¹ Zhang Lichao¹ Wang Liping¹

(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 phase shifting point diffraction interferometer depends on the pinhole diameter, roundness and thickness, where the first one is the most critical factor. The requirement for pinhole diameter should be known before the manufacture in actual machining. Three-dimensional pinhole diffraction is calculated based on the vector diffraction theory. How the pinhole diameter affects the diffracted wave-front quality is analyzed under the uniform incident light with TE and TM polarization. The appearance of the astigmatism and coma in the wave front is brought about by the linear polarization of incident light. The calculation and analysis show that in order to obtain reference wave front with 0.1 numerical aperture (NA), the root mean square of (RMS) wave-front error below 0.005λ ($\lambda=13.55\text{ nm}$), together with 0.4 intensity uniformity, for a 90 nm thickness pinhole, the diameter of 70 nm is suitable.

Key words optical testing; phase shifting point diffraction interferometer; vector diffraction; three-dimensional pinhole; wave-front error; intensity uniformity

1 引言

极紫外光刻投影物镜包括4~6个非球面, 各非球面的均方根(RMS)抛光精度必须达到0.2~0.3 nm。要制造出如此高精度要求的非球面, 就要有更高精度的检测工具^[1]。普通商用斐佐干涉仪或

泰曼-格林干涉仪由于受参考元件的限制, 其检测精度远远无法满足超高精度检测任务的要求^[2]。

相移点衍射干涉仪(PS/PDI)^[3,4]不需参考元件, 而是用小孔来产生参考球面波, 其检测精度可达深亚纳米量级。点衍射干涉仪各个部件中, 最富挑

收稿日期: 2009-12-15; 收到修改稿日期: 2010-04-02

基金项目: 应用光学国家重点实验室基金(09Q03FQ090)资助课题。

作者简介: 卢增雄(1984—), 男, 硕士研究生, 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、极紫外光学技术方面的研究。

E-mail: jincs@sklao.ac.cn(通信联系人)

战性的是小孔的制作^[3], J. P. Spallas 等^[5]介绍了小孔的制作情况。要制造出满足要求的高质量的小孔,在实际制作前,需对影响参考球面波质量的诸要素进行严格的仿真计算和分析。

在点衍射干涉仪中用于产生近于理想球面波的小孔,其尺寸与波长同数量级,不满足标量衍射的条件^[6],并且,所研究的小孔具有三维结构,入射光又是不同偏振的,再加上制作小孔的金属薄膜对极紫外光波的强烈吸收作用,必须通过矢量电磁场仿真对小孔附近的场做数值求解。

关于圆孔衍射的仿真与理论计算,在一些文献中可见,马强等^[7]采用标量衍射分析了可见光情况下平面小孔的直径大小对衍射波面误差的影响情况, K. Otake 等^[1]在可见光情况下采用矢量衍射理论对二维结构的小孔衍射做了仿真计算,邓小玖等^[8]对矢量衍射场的级数解、非傍轴近似解及精确解进行了详细的数值计算和比较研究。这些研究对实际工作有一定的指导作用,但要制作出实际的满足要求的小孔,必须结合实际情况的需要做更深入的分析,并给出定量的结果。本文采用矢量衍射理论,在波长为 13.55 nm 情况下,对 90 nm 的钴(Co)膜上的圆孔衍射进行了详细的数值仿真计算,分析了衍射波面相对理想球面的偏差(即衍射波面误差),通过泽尼克(Zernike)多项式拟合,分析了衍射波面中的像散和彗差成分,最后分析了衍射波面的强度均匀性。作为比较,还给出了 81,99 和 108 nm 厚的小孔衍射波面误差和强度均匀性。

2 模型与分析处理过程

模型如图 1 所示,箭头表示垂直入射的极紫外光波,黑色矩形部分是金属 Co 膜,小孔位于其中心。AB 表示由时域有限差分^[9](FDTD)方法计算得到的近场分布,CD 表示远场球面上的波面,虚线椭圆内的波面即为数值孔径 NA 内的波面。

整个处理过程分为三步:第一步,TE 偏振或 TM 偏振的均匀平面波垂直入射到小孔上,由 FDTD 法计算得小孔附近的场分布;第二步,根据惠更斯-菲涅耳原理将近场分布传播到远场,得到远场分布。以靠近小孔的观察平面 AB 上的场作为初始场(近场),将其传播到远场球面 CD 上,采样得到 NA 范围内的场(远场);第三步,对远场波面做泽尼克(Zernike)多项式拟合,计算去除平移、离焦、倾斜后衍射波面误差的峰谷(PV)值和 RMS 值以及强度均匀性。

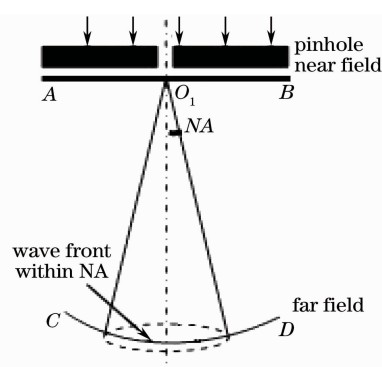


图 1 分析计算模型

Fig. 1 Model for analysis and calculation

计算采用参数如表 1 所示,入射光波波长为 13.55 nm, Co 膜厚度为 81~108 nm, Co 膜的折射率为 $0.93411 + 0.06574i$,膜的面积为 $230 \text{ nm} \times 230 \text{ nm}$,小孔直径为 40~150 nm,所研究的衍射波面的数值孔径(NA)为 0.06~0.11。

表 1 计算参数

Table 1 Parameters for calculation

Parameters	Value
Wavelength /nm	13.55
Thickness of Co film /nm	81~108
Refractive index of Co film	$0.93411 + 0.06574i$
Area of Co film /nm ²	230×230
Pinhole diameter /nm	40~150
NA	0.06~0.11

参照基尔霍夫衍射理论^[10]来计算衍射波面的 NA。平行光束入射到开有圆孔的衍射屏上,在衍射屏后一定距离处得到的衍射图样是艾里斑,艾里斑内的波前是一个球面。因此,对于直径为 d 的小孔,衍射波面的 NA 为

$$NA \approx \sin \theta = 1.22\lambda/d. \quad (1)$$

3 结果与分析

3.1 数值仿真计算的收敛性

收敛速度的快慢是电磁场数值仿真计算的一个重要问题,它是衡量电磁仿真难易的依据之一。如图 2 所示,在配置为 Intel Celeron CPU 2.60 GHz, 760 MB 内存的计算机上,对厚度为 90 nm,直径大小不同的小孔,分别在 TE 偏振和 TM 偏振下,采用 FDTD 在近场区域计算所用的时间。FDTD 计算时采用的是在空间和时间都差半个步长的网格结构,通过类似蛙步跳跃式的步骤用前一时刻的磁、电场值得到当前时刻的电、磁场值,并在每一时刻上将此过程算遍整个空间,于是可得到整个空间中随时

间变化的电、磁场值的解。由图 2 可见,小孔直径从 40 nm 增到 150 nm 时,TE 偏振所需时间从 1183 s 增到 2933 s, TM 偏振则由 1081 s 增到 2927 s。因此 TE 偏振和 TM 偏振都随着小孔直径的增大,计算时间增长,或者说所需的收敛时间增长。对同一直径的小孔来说,TE 偏振和 TM 偏振的收敛时间基本是一致的。

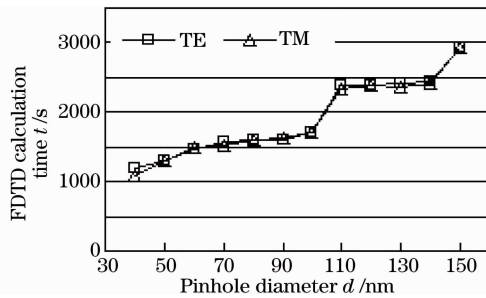


图 2 FDTD 计算时间与小孔直径大小的关系
Fig. 2 Time of FDTD calculation versus pinhole diameter

3.2 衍射波面误差分析

使用 FDTD 法计算得到近场值后,根据惠更斯-菲涅耳原理^[11],将近场分布传播到远场球面上。对衍射波面做 Zernike 多项式拟合^[12~15],计算去除平移、离焦、倾斜成分后衍射波面误差的 PV 值和 RMS 值。

3.2.1 衍射波面误差的 PV 值和 RMS 值

如图 3 所示为 90 nm 厚的不同直径的小孔衍射波面误差的 PV 值和 RMS 值。对 TE 偏振和 TM 偏振,衍射波面误差的 PV 值和 RMS 值都随 NA 的减小而减小,即 NA 越小,衍射波面质量越好。实际圆孔衍射中,以强度第一极小值为边界的艾里斑内的波面认为是完好的球面,越靠近艾里斑中心,即 NA 越小,衍射波面误差越小。当直径大小从 150 nm 变化到 40 nm 时,衍射波面误差并非单调减小,而是在 70 nm 附近达到最小。如对 NA=0.1 的情况,对 TE 偏振,直径为 70 nm 的小孔,PV 值和 RMS 值分别为 0.0013 λ 和 0.0005 λ ,直径减小到 40 nm 时,PV 值和 RMS 值分别增大到 0.0044 λ 和 0.0013 λ ;直径增大到 150 nm 时,PV 值和 RMS 值分别增大到 0.031 λ 和 0.01 λ ,这种情况看来是反常的。直径越大,波面误差越大,这是显然的。在标量衍射中,对于厚度为零的圆孔衍射(即平面圆孔衍射)而言,直径越小,衍射波面误差越小。但小孔具有一定厚度时,小孔除了扮演空间滤波的作用外,还起到光波导^[16,17]的作用。同时,由于入射光波是线性偏振的,光波与孔壁的作用是各向异性的,小孔越小,这种作用就越强,从而衍射波面误差就越大。Yoshiyuki Sekine 等^[18]对基底材料钼所作的计算也同样出现衍射波面误差非单调性的情况。

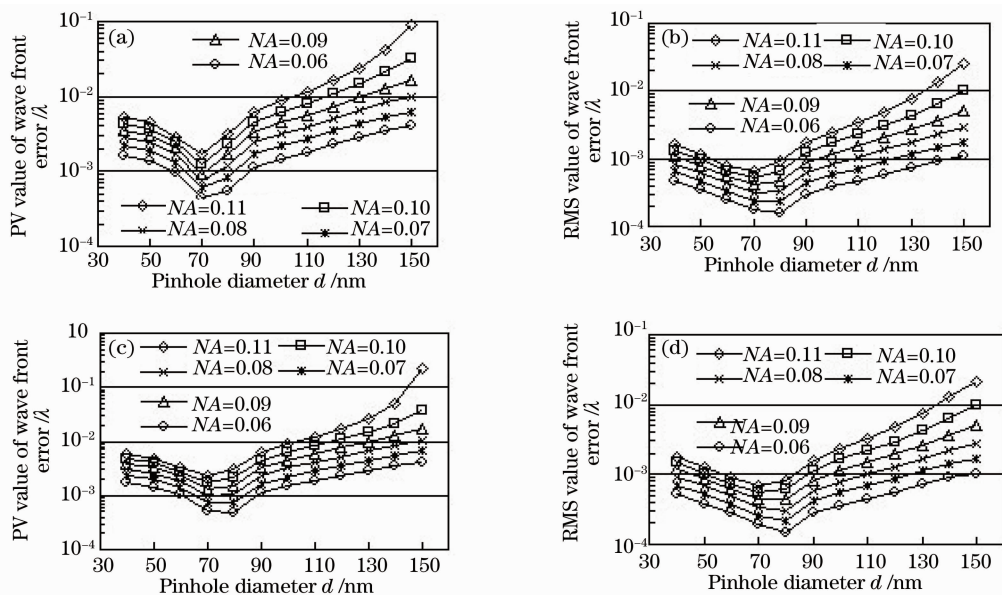


图 3 不同直径的圆孔波面误差 PV 值和 RMS 值。(a) TE 偏振下的 PV 值;(b) TE 偏振下的 RMS 值;(c) TM 偏振下的 PV 值;(d) TM 偏振下的 RMS 值

Fig. 3 PV and RMS value wave-front errors for different pinhole diameter. (a) PV value in the case of TE polarization; (b) RMS value in the case of TE polarization; (c) PV value in the case of TM polarization; (d) RMS value in the case of TM polarization

为了比较不同厚度小孔的衍射波面误差,图4给出了厚度 T 分别为 81, 90, 99 和 108 nm 四种情况下波面误差与小孔直径大小的关系 (TE 偏振, $NA=0.1$)。从图4可以看出,不同厚度的小孔,其波面误差的 PV 值和 RMS 值,开始时随小孔直径的增大而减小,之后则随小孔直径的增大而增大,即不随小孔直径大小做单调变化,而在某一大小处取得了极小值。这极小值的位置和小孔的厚度有关,对厚度为 81 nm 和 90 nm 的小孔,在直径 70 nm 附近出现极小值,而厚度为 99 nm 和 108 nm 的小孔,在直径 60 nm 附近出现极小值,即随着厚度的增加,这个极小值的位置向直径小的方向移动。

对于 TE 偏振和 TM 偏振对衍射波面的影响情况的比较如图5所示 ($NA=0.1$)。相对于 TE 偏

振, TM 偏振的 PV 值出现了一个阱带,在 70~100 nm, TM 偏振的 PV 值要小于 TE 偏振的 PV 值,而在两端则是 TM 偏振的 PV 值大于 TE 偏振的 PV 值。TE 偏振和 TM 偏振两种情况的 RMS 值略有差别,直径大小在 70 nm 及以下时, TM 偏振的 RMS 值略大于 TE 偏振的 RMS 值,而直径大小大于 70 nm 时, TE 偏振的 RMS 值略大于 TM 偏振的 RMS 值。

假定待检的极紫外光刻物镜的 $NA=0.1$, 要求仿真计算中衍射波面均方根误差小于 $\lambda/200$ ^[3], 由图5可见,小孔直径不应大于 130 nm, 由于还没考虑衍射波面强度均匀性,因此,这个值是实际小孔直径大小的上限。

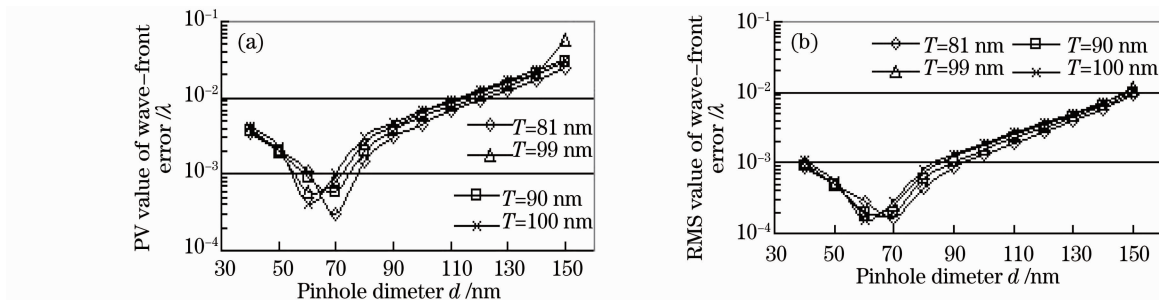


图4 不同厚度的小孔波面误差大小与小孔直径的关系。(a)PV值,(b)RMS值

Fig. 4 Wave-front errors of different thickness pinholes versus pinhole diameter. (a) PV value, (b) RMS value

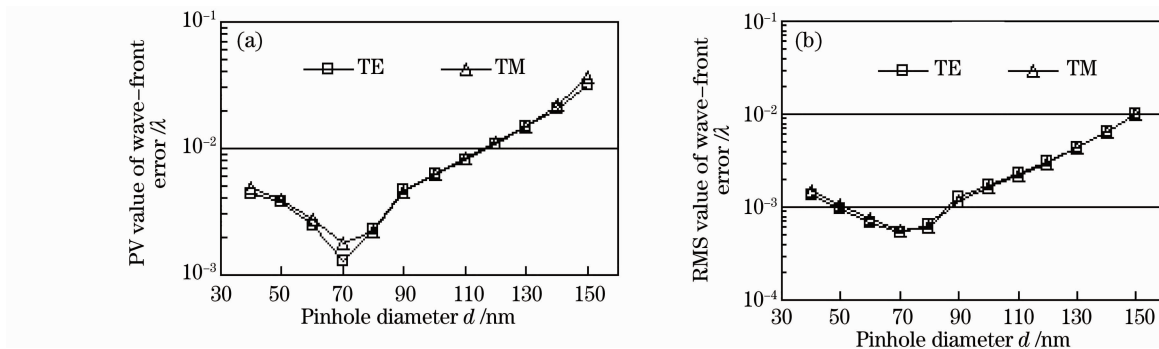


图5 波面误差与小孔直径的关系。(a)PV值,(b)RMS值

Fig. 5 Wave-front errors versus pinhole diameter. (a) PV value, (b) RMS value

3.2.2 衍射波面中的非对称像差

参考波面中的非对称像差,如像散、彗差等在面形测量中对测量精度的影响较大,而对称像差,如球差,对测量精度的影响较小。此处给出不同直径的小孔衍射波面中像散和彗差的大小。

如图6所示,为对衍射波面进行 37 项 Zernike 多项式拟合后得到的 Zernike 多项式系数 Z_5 和 Z_7 , 其中 Z_5 为 45° 方向的初级像散, Z_7 为 y 方向初级彗差。衍射波面的像散和彗差是由入射光的线性偏振引入的。对 Z_5 而言,小孔直径小于 80 nm 时, TM

偏振的值要大于 TE 偏振的值,而小孔直径大于 80 nm 时, TE 偏振的值要大于 TM 偏振的值。TE 偏振在小孔直径 60 nm 附近达到最小 Z_5 为 0.0002λ , 而 TM 偏振在小孔直径 70 nm 附近达到最小 Z_5 为 0.0003λ 。对 Z_7 , TE 偏振的值总是大于 TM 偏振的值,在直径为 80 nm 处, TE 偏振和 TM 偏振均达到最小 Z_7 值,分别为 $1.4 \times 10^{-5} \lambda$ 和 $7.0 \times 10^{-7} \lambda$ 。在实际制作小孔时,应根据测量的要求,选择合适的小孔直径,以控制非对称像差大小在满足要求的范围内。

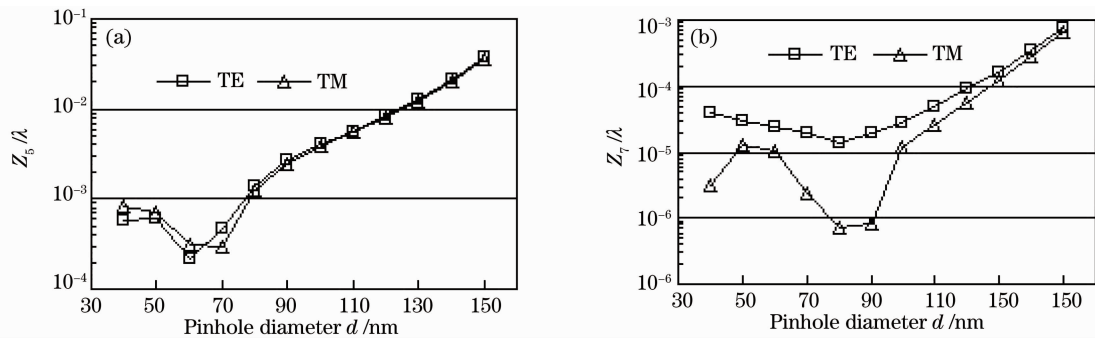


图 6 不同直径的小孔衍射波面泽尼克多项式系数($T=90\text{ nm}$)。(a) Z_5 ; (b) Z_7

Fig. 6 Zernike polynomial coefficient of the diffracted wave front for different pinhole diameter ($T=90\text{ nm}$). (a) Z_5 ; (b) Z_7

3.3 衍射波面强度均匀性

为获得对比度良好的干涉条纹,必须保证参考球面波有良好的强度均匀性。定义 NA 内波面强度的最小值和最大值的比值为波面的强度均匀性,用 γ 表示:

$$\gamma = I_{\min} / I_{\max}, \quad (2)$$

式中 I_{\min} 和 I_{\max} 分别表示 NA 内,衍射波面强度的最小值和最大值。当 $I_{\min} = I_{\max}$ 时, $\gamma = 1$, 表示衍射波面是均匀的;当 $I_{\min} = 0$ 时, $\gamma = 0$, 表示衍射波面是不均匀的。

图 7 所示为 90 nm 厚的小孔衍射波面强度均匀性与小孔直径大小及 NA 之间的关系。对同一直径的小孔, NA 越小,衍射波面强度均匀性越好。如对 80 nm 的小孔, NA 从 0.11 减到 0.06 时, γ 从 0.34 增到 0.74, 这种情况由圆孔衍射中艾里斑强度的分布来看是显然的。图 8 为不同厚度的小孔,在 $NA=0.1$ 内衍射波面强度均匀性与小孔直径的关系。由图可知,对于同一直径的不同厚度小孔而言,衍射波面强度均匀性基本上是一样的。

假如待检的极紫外投影物镜的 $NA=0.1$, 若要求 γ 达到 0.4, 则 d 必须小于 80 nm; 若要求 γ 达到

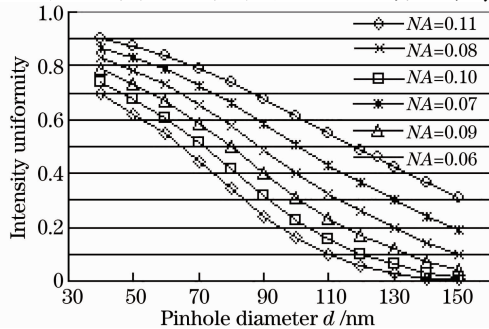


图 7 不同直径大小不同 NA 内衍射波面强度均匀性
Fig. 7 Intensity uniformity of the diffracted wave front for different pinhole diameter and NA

0.7, 则 d 必须小于 60 nm。若用于检测 NA 更小的物镜, 在同样的强度均匀性要求下, 可以选择较大直径的小孔。因此, 应根据具体的检测任务, 对强度均匀性提出具体的要求, 来选择恰当的小孔直径大小。

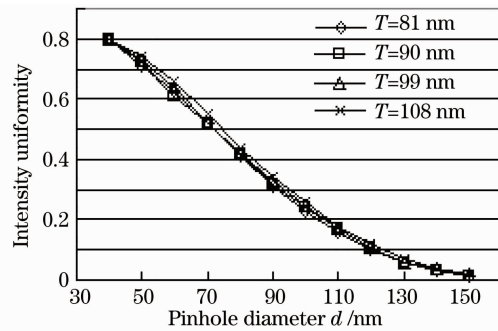


图 8 不同厚度的小孔衍射波面均匀性与小孔直径的关系($NA=0.1$)

Fig. 8 Relation between intensity uniformity of the diffracted wave front and the pinhole diameter for different pinhole thickness ($NA=0.1$)

4 结 论

基于矢量衍射理论, 分析计算了波长为 13.55 nm 的极紫外光波在三维小孔中衍射的波面质量。兼顾了衡量衍射波面质量的两个重要因素: 衍射波面相对理想球面的偏差和波面强度均匀性。分析计算结果得出: 为产生 $NA=0.1$, 相对于理想球面波 RMS 偏差不大于 0.005λ , 衍射波面的强度均匀性 γ 达到 0.4 的参考球面波, 小孔直径应小于 80 nm; 衍射波面误差并非随小孔直径的增大而单调增大, 对厚度为 81 nm 和 90 nm 的小孔, 衍射波面误差在直径为 70 nm 附近时达到最小, 对厚度为 99 nm 和 108 nm 的小孔, 衍射波面误差在直径为 60 nm 附近时达到最小; 入射光的线性偏振给衍射波面中引入了像散和彗差。同时, 由于小孔越小, 通过的光强越弱, 加

工也越困难, 兼顾这些情况, 实际中对 90 nm 厚的小孔选择直径大小为 70 nm 比较适宜, 此时波面误差的 PV 值为 0.0013λ , RMS 值为 0.0005λ , 强度均匀性为 0.51。

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, 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
- 3 H. Medeck, E. Tejnil, K. A. Goldberg *et al.*. Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1526~1528
- 4 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
- 5 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
- 6 Lü Naiguang. Fourier Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006, 65~102
吕乃光. 傅立叶光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006, 65~102
- 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 Deng Xiaojie, Li Huailong, Liu Caixia *et al.*. A comparative study of vectorial diffraction theories and the validity of scalar approximation[J]. *Chinese J. Quant. 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
- 9 Ge Debiao, Yan Yubo. Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Wave [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005, 11~34
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
- 10 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. New York: McGraw-Hill Companies, 1988, 32~62
- 11 Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Electronics Industry Press, 2005, 342~347
玻 恩, 沃尔夫. 光学原理 [M]. 杨葭孙译. 北京: 电子工业出版社, 2005, 342~347
- 12 Daniel Malacara. Optical Shop Testing (Third Edited) [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007, 498~546
- 13 Hui Mei, Niu Hanben. A method of wavefront data fitting using Zernike polynomials [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(12): 1113~1116
惠 梅, 牛憨笨. 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
- 14 Chang Liping, Shen Weixing, Lin Zunqi. Algorithm for digital wavefront fitting based on singular value decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1676~1680
常丽萍, 沈卫星, 林尊琪. 基于奇异值分解的数字波前拟合算法 [J]. 光学学报, 2006, **26**(11): 1676~1680
- 15 Daniel Malacara, J. Martin Carpiovaladéz, J. Javier Sánchezmondragón. Wavefront fitting with discrete orthogonal polynomials in a unit radius circle [J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(6): 672~675
- 16 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
- 17 Zeng Xiahui, Fan Dianyuan, Zhou Ping. Field distributions and transmission property inside a conical waveguide with a sub-wavelength-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
- 18 Yoshiyuki Sekine, Akiyoshi Suzuki, Masanobu Hasegawa. 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