

照明物镜像差对远场衍射波前质量影响的严格矢量分析

卢增雄^{1,2} 金春水¹ 马冬梅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)中衍射参考球面波的质量受照明物镜像差和小孔的质量、状态的影响。基于矢量衍射理论,分析计算了可见光经过带像差的照明物镜聚焦后经过有限厚度具有实际电导率小孔板的衍射。分析了照明物镜像差对远场衍射波前质量的影响,确定了 PDI 检测极紫外光刻(EUVL)元件和系统时的最佳直径大小。分析计算得出,当用 PDI 检测数值孔径(NA)为 0.3 的系统时,采用直径大小为 800 nm 的小孔较为适宜,其衍射波前均方根(RMS)偏差为 $6.51 \times 10^{-5} \lambda$,强度均匀性为 0.812。当用 PDI 检测 NA 为 0.3 的元件时,采用直径大小为 500 nm 的小孔较为适宜,其衍射波前的 RMS 非对称偏差为 $8.40 \times 10^{-5} \lambda$,强度均匀性为 0.664。

关键词 光学设计;点衍射干涉仪;矢量衍射;照明物镜像差;波面偏差;强度均匀性

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0812001

Rigorous Vector Analysis of the Effect of Illumination Objective Lens Aberration on the Quality of Far-Field Diffracted Wave Front

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

(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 diffracted reference spherical wave in point diffraction interferometer (PDI) depends on the aberrations in the illumination objective lens and the quality and status of the pinhole. The pinhole diffraction of the visible light focused by the aberrated illumination objective lens is calculated based on the vector diffraction theory, the finite thickness and real conductivity of the pinhole are considered. The effect of illumination objective lens aberration on the quality of far-field diffracted wave front is analyzed. The best pinhole diameter of the PDI used to test the extreme ultraviolet lithography (EUVL) system and its element are determined. The calculation and analysis show that, when a system with NA of 0.3 is tested by PDI, the appropriate pinhole diameter is 800 nm, the RMS deviation of the diffracted wave front is $6.51 \times 10^{-5} \lambda$, intensity uniformity is 0.812, when an optical element with NA of 0.3 is tested by PDI, the appropriate pinhole diameter is 500 nm, the RMS deviation of the diffracted wave front is $8.40 \times 10^{-5} \lambda$, intensity uniformity is 0.664.

Key words optical design; point diffraction interferometer (PDI); vector diffraction; aberration of illumination objective lens; wave-front deviation; intensity uniformity

OCIS codes 120.4640; 260.1960; 120.3180

1 引 言

极紫外光刻(EUVL)投影物镜中包括 4~6 个

非球面,为实现系统衍射极限的性能,要求各非球面
面形误差方均根(RMS)值达到 0.2~0.3 nm^[1]。普

收稿日期: 2012-02-05; 收到修改稿日期: 2012-03-26

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,主要从事紫外及极紫外光学技术方面的研究。

E-mail: jincs@sklao.ac.cn(通信联系人)

通菲佐干涉仪或泰曼-格林干涉仪由于受参考元件的限制,无法实现如此高精度的检测^[2]。

点衍射干涉仪(PDI)^[3~5]不需要参考元件,而是通过衍射产生近于理想的球面波作为参考波,从而实现绝对检测,其检测精度可达深亚纳米量级^[6]。因此,PDI是超高精度球面检测^[7],超高精度非球面检测^[2,8,9]和系统波像差检测^[10]的重要工具。PDI所能达到的检测精度主要取决于参考球面波的质量,参考球面波的质量主要受制于小孔的状态和照明物镜像差。小孔起到的是一个空间滤波的作用,它的直径大小决定对照明物镜像差的滤除效果。小孔的加工制作是一项颇具挑战性的工作^[8],在实际制作小孔前分析照明物镜的像差对衍射波前质量的影响情况是非常重要的。

在可见光波段,PDI中小孔的直径大小与波长同数量级,小孔具有一定的厚度,入射会聚光波具有偏振性,同时实际金属膜的电导率是有限的,而非理想导体。因此,采用矢量衍射理论分析入射光波经过带像差的照明物镜聚焦后的衍射更符合实际情况。

国内外对PDI中小孔衍射波前质量的分析均有报道,卢增雄等^[11]采用时域有限差分法(FDTD)分析了理想的线偏振EUV平面光波经过三维小孔的衍射,Sekine等^[12]采用FDTD分析了在极紫外波段,带像差的会聚光波经过三维小孔的衍射,陈琛等^[13]采用FDTD分析了在可见光情况下理想平面波垂直照射下的二维小孔的衍射,许嘉俊等^[14]采用有限元法(FEM)分析了在可见光情况下理想会聚光波经过二维小孔的衍射,Otaki等^[1]采用严格耦合波(RCW)法分析了在可见光情况下,带像差的会聚光波经过二维小孔的衍射。与EUV波段相比,可见光波段的小孔衍射波前计算收敛慢、精度低^[1],而二维小孔,即狭缝,只能反映一维衍射波前的偏差,入射光波与三维小孔的作用显然和狭缝是不同的。同时,在计算球面偏差时,大多数的做法是对远场相位做泽尼克(Zernike)多项式拟合,没有确定最佳理想球,即使有理想球,也是以某一点的相位作为理想球的相位。为此,本文利用实验室的工作站[Intel(R), Xeon(R) CPU, 2.27 GHz, 24.0 GB RAM],采用FDTD法分析可见光(632.8 nm)经过三维小孔的衍射,通过最小二乘法确定最佳参考球的位置,分析照明物镜像差对远场衍射波前质量的影响情况,从而确定PDI在检测极紫外光刻投影物镜系统及其系统元件时,所应选择的小孔直径大小。本文的分析结果将为PDI针孔的设计、加工提供理

论依据。

2 分析计算模型

如图1所示,为点衍射干涉仪中小孔衍射模型。经准直的激光 W 经过照明物镜聚焦后,得到带像差的会聚光波 W' ,聚焦到小孔中心的光波经过小孔衍射后,产生近于理想球面波前的衍射波前 CD 。在整个分析过程中,先采用矢量电磁场求解的数值方法,即FDTD法^[15],根据照明物镜的数值孔径和仿真区域面积在FDTD中加入带像差的会聚照明光源,通过FDTD将电磁场 \mathbf{E} , \mathbf{H} 分量在空间和时间上交替抽样地离散化,在时间轴上逐步推进地求解得整个空间电磁场分布,从而获得小孔的衍射场。取小孔下方 AB 处的近场,采用Matlab软件编程,基于菲涅耳-基尔霍夫原理^[16],将电磁波传播到远场球面 CD 上,从而获得远场波前。通过最小二乘法确定远场衍射波前的最佳参考球,对远场波前相对于其最佳参考球的偏差做Zernike多项式拟合^[17,18],计算去除平移、倾斜和离焦后的波面偏差和波面非对称成分的偏差以及波面的强度均匀性。

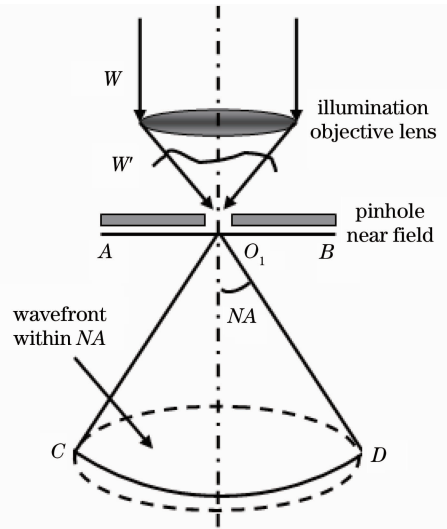


图1 小孔衍射模型

Fig. 1 Pinhole-diffraction model

远场衍射波前最佳参考球按如下方式确定。设衍射波前上任意一点的相位为 $\varphi(x, y, z)$,衍射波前最佳参考球的相位为 φ_r ,最佳参考球的球心坐标为 (x_r, y_r, z_r) ,则最佳参考球球心到衍射波前上任意一点的距离为

$$R = \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2}. \quad (1)$$

最佳参考球在衍射波前上各点的相位为

$$\varphi'_r(x, y, z) = \arg[\exp(ikR)], \quad (2)$$

式中 $\arg[\]$ 表示复数取辐角, 该相位与衍射波前相位的差为

$$D_{\text{Dev}} = \varphi(x, y, z) - \varphi'_r(x, y, z), \quad (3)$$

对(3)式做最小二乘拟合可确定出 (x_r, y_r, z_r) , 再代入(1)~(3)式便可求出衍射波前相对于最佳参考球的偏差 D_{Dev} 。

3 结果与讨论

本文计算条件如表 1 的计算参数所示。入射 X 偏振光波波长为 632.8 nm, 照明物镜的数值孔径

(NA) 为 0.6, 照明物镜携带的像差分别为离焦(Def.)、像散(Ast.)、彗差(COMA)和球差(AS), 这些像差的方均根(RMS)大小均为 0.05λ 。入射光波经照明物镜聚焦到小孔中心, 小孔的材料为铬(Cr), 其厚度为 200 nm, Cr 膜的面积为: $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$, 小孔直径大小为: 500~1000 nm。FDTD 计算中采用的网格大小为 $12.5 \text{ nm} \times 12.5 \text{ nm} \times 12.5 \text{ nm}$, 本文分别考察数值孔径为 0.3 和 0.6 范围内的衍射波前, 计算结果如以下各节所示。

表 1 计算参数

Table 1 Parameters for calculation

Parameters	Value
Wavelength /nm	632.8
Incident light	A converging wave of NA 0.60; with 0.05λ RMS Def., Ast., COMA and AS; X polarized; focus on the pinhole center and membrane top
Thickness of Cr membrane /nm	200
Area of Cr membrane /nm	12000×12000
Cell size /nm	$12.5 \times 12.5 \times 12.5$
Pinhole diameter	400~1000 nm
NA of the diffracted wave front considered	0.3 and 0.6

3.1 会聚光波经小孔衍射结果

如图 2 所示, 为入射光波经过小孔衍射的强度分布和相位分布。图 2 中 X、Y 截面分别为与偏振方向垂直和平行的平面。强度图中的水平白线和相

位图中的水平黑线是入射会聚光波所在的位置, 其上方的场是反射场, 其下方到小孔上表面之间的场是入射场和反射场叠加的总场, 小孔下方的场为衍射场。

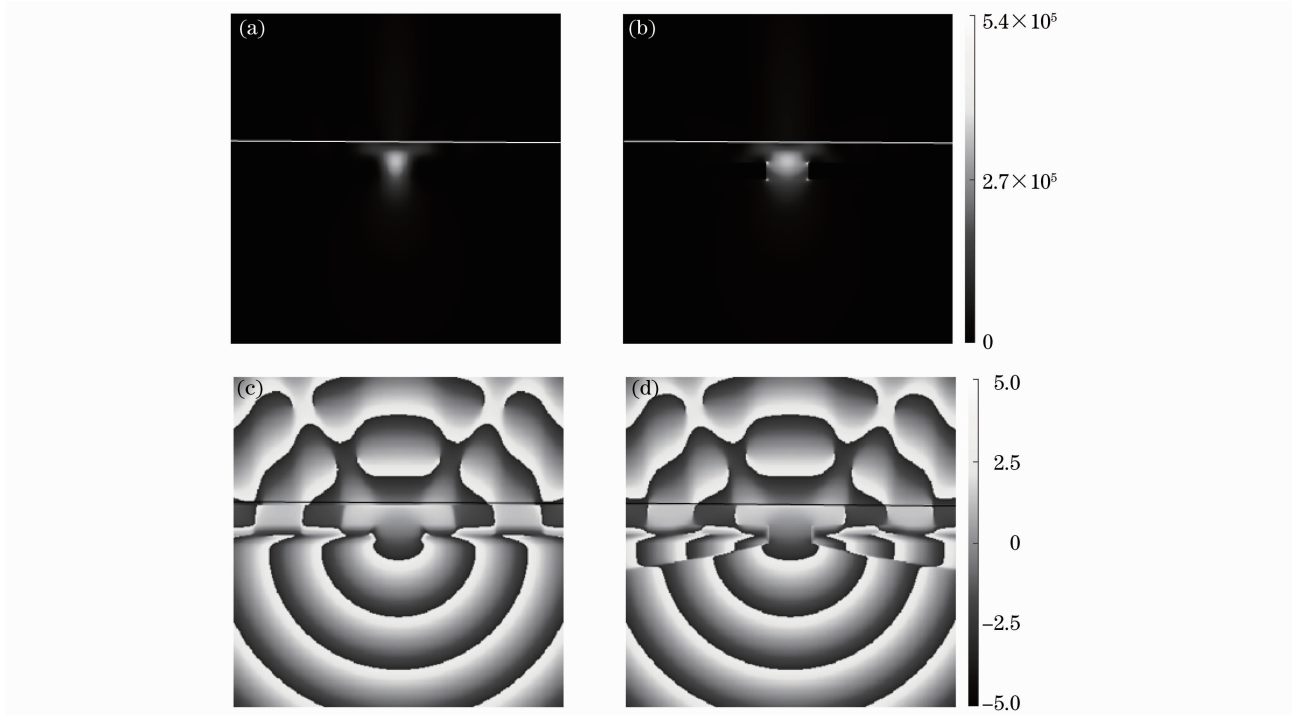


图 2 小孔附近的强度和相位分布。(a) X 截面强度; (b) Y 截面强度; (c) X 截面相位; (d) Y 截面相位

Fig. 2 Intensity and phase distribution near the pinhole. (a) Intensity in X cross section; (b) intensity in Y cross section; (c) phase in X cross section; (d) phase in Y cross section

由相位图可以看出,从小孔衍射出的波是球面波,但在靠近小孔附近,相位分布有所不同,在 X 截面上,小孔附近的相位和远离小孔处的相位是连续的,而在 Y 截面上,小孔附近的相位出现跳变。由强度图可以看到,在 X 截面上,小孔的轮廓是模糊的,而在 Y 截面上,小孔的轮廓清晰可见。上述现象可采用电场所满足的边界条件来分析,在金属内部,电场为零,在 X 截面上,小孔边界与电场平行,电场必须满足连续性边界条件,在靠近孔壁的地方接近于零,从而导致小孔的轮廓变得模糊。在 Y 截面上小孔边界与电场垂直,电场不需要满足连续性边界条件,在边界处仍然很强,但是进入金属内就迅速衰减到零,电场的这种跳变就使得小孔的轮廓清晰可见。另外,也正是电场的这种边界条件的要求,使得线偏振光入射下,衍射波前中出现了像散,具体情况将在 3.3 节给出。

3.2 衍射波前最佳参考球的确定

当照明光波存在不同像差时,不同直径的小孔

衍射波前最佳参考球的球心坐标如图 3 所示。对于 X 坐标,如图 3(a)所示,当照明光波存在彗差时,最佳参考球的 X 坐标值随小孔直径的增大而增大,即越偏离中心;而当照明光波是理想的或存在离焦、像散和球差时,最佳参考球的 X 坐标基本上还是处在中心位置。对于 NA 为 0.3 内的衍射波前,其最佳参考球的 X 坐标要比 NA 为 0.6 内的衍射波前的最佳参考球 X 坐标更靠近中心。衍射波前最佳参考球的 Y 坐标基本上与照明光波的像差无关,NA 为 0.6 和 NA 为 0.3 内的衍射波前,最佳参考球的 Y 坐标分别为 -5.25 nm 和 -4.89 nm 。对于最佳参考球的 Z 坐标,如图 3(c)所示,除了在 900 nm 处,小孔直径越大,最佳参考球越靠近小孔出射端,当小孔直径小于 700 nm 时,不同照明情况 Z 值差别不大,当小孔直径大于 700 nm 时,照明光波中的像散使最佳参考球越靠近小孔出射端,而球差使最佳参考球越远离小孔出射端。

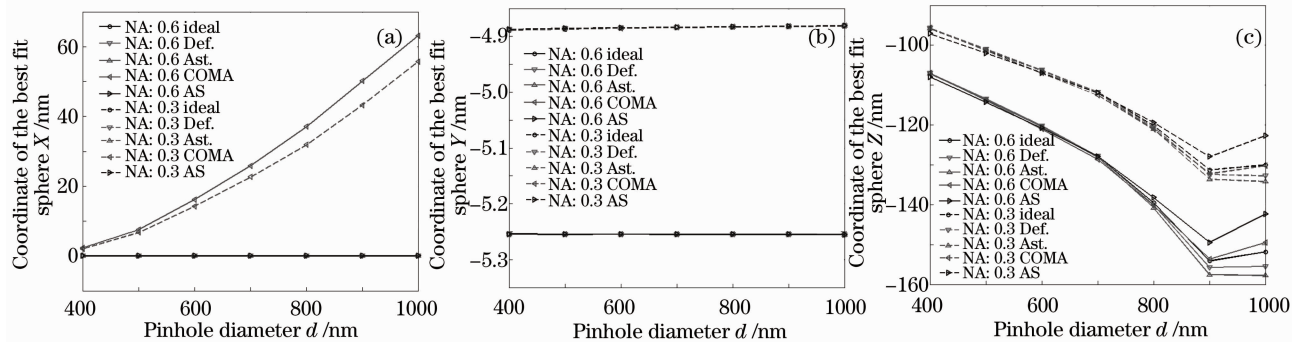


图 3 衍射波前最佳参考球球心坐标和小孔直径大小的关系。(a) X 坐标; (b) Y 坐标; (c) Z 坐标

Fig. 3 Relation between the coordinate of the center of the best fit sphere of the diffracted wave front and the size of pinhole diameter. (a) X coordinate; (b) Y coordinate; (c) Z coordinate

因此,衍射波前最佳参考球与小孔中心轴线并非旋转对称,其最佳参考球球心偏向负 Y 轴,并且落在小孔出射端和近场输出面之间。

3.3 衍射波前的球面偏差和强度分布

当照明光波存在像差时,衍射波前相对于理想球面偏差的 RMS 值如图 4 所示。NA 为 0.6 和 NA 为 0.3 内衍射波前,其 RMS 偏差均呈“V”形,即在小孔直径为 800 nm 时,衍射波前偏差最小。当照明光波分别为理想情况及带离焦、像散、彗差和球差时,NA 为 0.6 内衍射波前 RMS 偏差的最小值分别为: $3.18 \times 10^{-4} \lambda$, $4.36 \times 10^{-4} \lambda$, $6.35 \times 10^{-4} \lambda$, $7.26 \times 10^{-4} \lambda$ 和 $1.07 \times 10^{-4} \lambda$, NA 为 0.3 内衍射波前的 RMS 偏差分别为: $1.01 \times 10^{-5} \lambda$, $2.22 \times 10^{-5} \lambda$, $5.74 \times 10^{-5} \lambda$, $6.51 \times 10^{-5} \lambda$ 和 $5.89 \times 10^{-5} \lambda$ 。因此,

在小孔直径 800 nm 处,照明光波存在彗差时,衍射波前的 RMS 偏差最大。

对于不同直径的小孔,衍射波前 RMS 偏差的非单调变化与入射光波的线偏振有关,入射光波线偏振使得衍射波前中出现了像散。如图 5 所示,为照明光波存在不同像差情况下,衍射波前偏差中的像散项,对应于 Zernike 多项式的 Z_6 项。当小孔直径小于 800 nm 时, Z_6 为负,小孔直径越小, Z_6 绝对值越大,而当小孔直径大于 800 nm 时, Z_6 为正,并且随小孔直径的增大 Z_6 增大,在 800 nm 附近出现拐点,从而使得衍射波前偏差呈现“V”形。该拐点的出现需要做进一步的研究。从上述分析可知,当用 PDI 检测 NA 为 0.3 的系统时,采用直径大小为 800 nm 的小孔较为适宜。

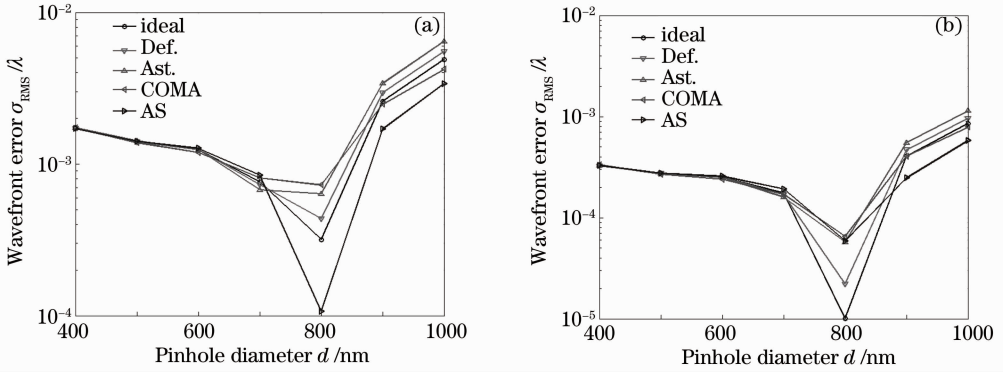


图4 照明物镜存在不同像差情况下的衍射波面偏差与小孔直径大小关系。(a) NA is 0.6; (b) NA is 0.3
 Fig. 4 Relation between the deviation of the diffracted wave front in the case of different aberrations in the illumination objective lens and the size of the pinhole diameter. (a) NA is 0.6; (b) NA is 0.3

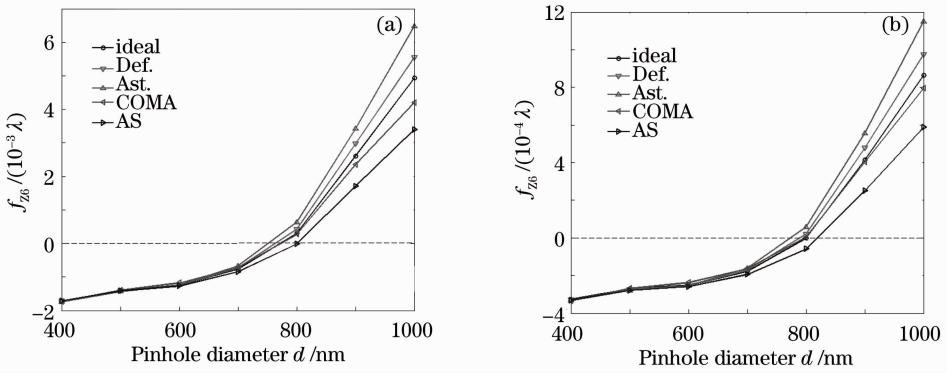


图5 衍射波前中像散项 Z_6 大小与小孔直径大小的关系。(a) NA is 0.6; (b) NA is 0.3

Fig. 5 Relation between the amount of astigmatism Z_6 in the diffracted wave front and the size of pinhole diameter. (a) NA is 0.6; (b) NA is 0.3

直径为 400, 700 和 1000 nm 的小孔, 衍射波前强度分布的 X 截面和 Y 截面如图 6 所示。可知衍射波前的强度分布并非旋转对称, 小孔直径越小, 这种非对称性越明显, 并且小孔直径越小, 衍射波前的强度波纹越大。当照明光波带像差时, 衍射波前的强度相对与理想照明的情况都减小了。照明光波存在彗差时, 衍射波前的强度最小, 并且在 Y 截面上, 强度最大值发生侧移。

3.4 衍射波前的非对称偏差和强度均匀性

在点衍射干涉仪中, 由于测量臂和参考臂是轴对称的, 因此, 180° 对称的像差将不影响测量精度。通过 Zernike 多项式将衍射波前中的 180° 对称的像差去除, 得到衍射波前非对称偏差的 RMS 值如图 7 所示。当照明光波存在彗差时, 衍射波前的非对称偏差随着小孔直径的增大而增大, 直径 400, 500 及 600 nm 的小孔, 在 NA 为 0.6 和 NA 为 0.3 内的衍射波前非对称偏差的 RMS 值分别为 $2.43 \times 10^{-5} \lambda$ 和 $1.39 \times 10^{-5} \lambda$, $8.40 \times 10^{-5} \lambda$ 和 $2.16 \times 10^{-5} \lambda$ 及 $1.85 \times 10^{-5} \lambda$ 和 $3.68 \times 10^{-5} \lambda$ 。

在极紫外光刻 (EUVL) 中, 对于四镜系统或六镜系统, 为达到衍射极限的性能, 要求光学系统的波像差 RMS 值达到 0.05 λ , 即 0.675 nm, 则非球面的检测精度必须达到 0.276 nm, 仿真计算的精度必须达到 0.028 nm^[1], 从而衍射波前的偏差必须小于 0.056 nm, 即 $8.85 \times 10^{-5} \lambda$ 。因此, 当 PDI 用于检测 NA 为 0.3 的元件时, 小孔直径大小不宜大于 500 nm。若待检元件的 NA 小于 0.3, 则可以适当采用更大直径的小孔, 只要其衍射波前的非对称偏差满足要求即可。

在点衍射干涉仪中, 衍射波前强度均匀性也是参考球面波质量的重要因素, 它决定了 CCD 在干涉图采集过程中量化误差的大小^[19,20]。衍射波前的强度均匀性定义为所考察的数值孔径内, 衍射波前强度的最小值与最大值的比值。图 8 为照明光波存在不同像差时, 衍射波前的强度均匀性随小孔直径大小的变化情况。从图可以看出, 随着小孔直径的增大, 衍射波前的强度均匀性减小, 这是由于小孔直径越大对光波的限制越小, 衍射波前强度越尖细。

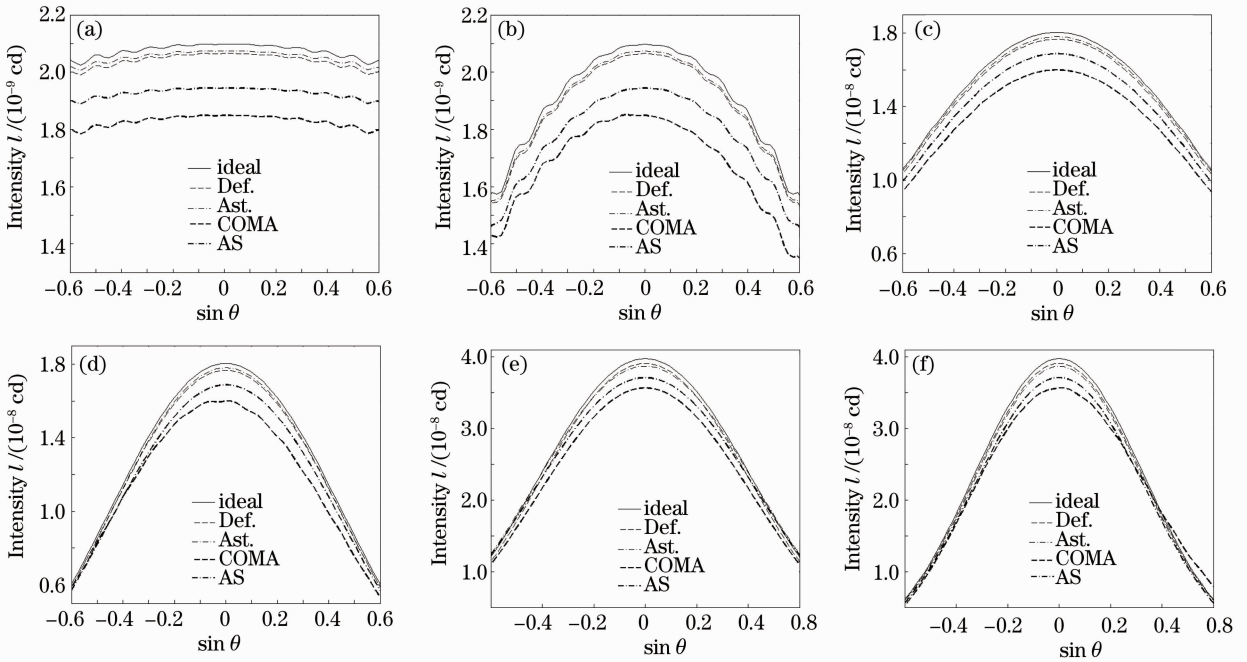


图 6 照明物镜存在不同像差情况下的衍射波面强度分布。(a) $d=400 \text{ nm}$ X 截面；(b) $d=400 \text{ nm}$ Y 截面；(c) $d=700 \text{ nm}$ X 截面；(d) $d=700 \text{ nm}$ Y 截面；(e) $d=1000 \text{ nm}$ X 截面；(f) $d=1000 \text{ nm}$ Y 截面

Fig. 6 Intensity distribution of the diffracted wave front in the case of different aberrations in the illumination objective lens. (a) $d=400 \text{ nm}$ X cross section; (b) $d=400 \text{ nm}$ Y cross section; (c) $d=700 \text{ nm}$ X cross section; (d) $d=700 \text{ nm}$ Y cross section; (e) $d=1000 \text{ nm}$ X cross section; (f) $d=1000 \text{ nm}$ Y cross section

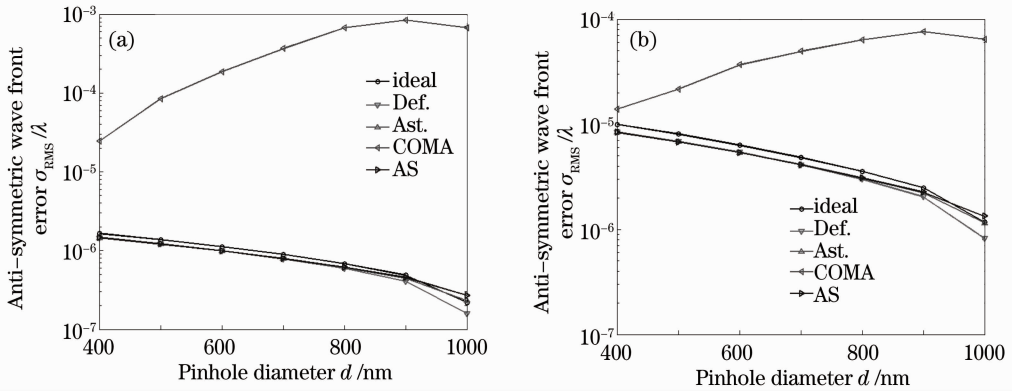


图 7 照明物镜存在不同像差情况下的衍射波面非对称偏差与小孔直径大小关系。(a) NA is 0.6；(b) NA is 0.3

Fig. 7 Relation between the deviation of anti-symmetric wave front of the diffracted wave front in the case of different aberrations in the illumination objective lens and the size of pinhole diameter. (a) NA is 0.6；(b) NA is 0.3

此外, NA 为 0.3 内衍射波前强度均匀性明显优于 NA 为 0.6 内衍射波前的强度均匀性。照明物镜的各种像差中, 彗差对衍射波前强度均匀性的影响最为明显, 在其影响下, 小孔直径大小分别为 400, 500 和 600 nm 时, NA 为 0.6 和 NA 为 0.3 内衍射波前强度均匀性分别为 0.804, 0.664, 0.561 和 0.944, 0.903, 0.873。

4 结 论

在点衍射干涉仪中, 照明物镜像差和小孔直径大小是影响衍射波前质量(衍射波前偏差和强度均匀性)的主要因素。小孔衍射波前是近于理想的球面波, 该球面波的最佳参考球并非相对于小孔中心轴线旋转对称, 而是偏向负 Y 轴方向, 并且位于小孔出射端和近场输出面之间。

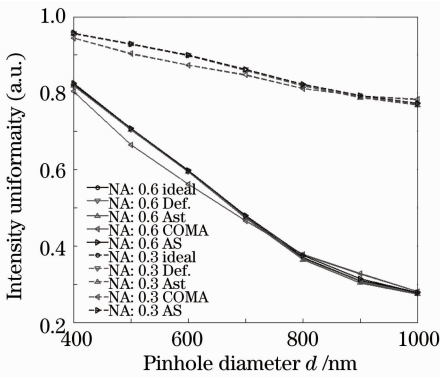


图 8 照明物镜存在不同像差情况下的衍射波面强度均匀性与小孔直径大小关系

Fig. 8 Relation between the intensity uniformity of the diffracted wave front in the case of different aberrations in the illumination objective lens and the size of pinhole diameter

当照明物镜是理想的或带离焦、像散、彗差和球差时，衍射波前的像散都是最大的像差。衍射波前的像散使得衍射波前偏差呈现出“V”形，在小孔直径大小为 800 nm 附近，衍射波前偏差达到极小值。NA 为 0.6 和 NA 为 0.3 的衍射波前，其 RMS 偏差的极小值分别为 $1.07 \times 10^{-4} \lambda$ 和 $1.01 \times 10^{-5} \lambda$ ，这些极小值的大小与照明物镜所携带的像差有关，当照明物镜存在彗差时，极小值达到最大，分别为 $7.26 \times 10^{-4} \lambda$ 和 $6.51 \times 10^{-5} \lambda$ 。因此，在检测系统时，选用直径为 800 nm 的小孔较为适宜。

照明物镜中的彗差对衍射波前中非对称部分的偏差影响最大，从而直接影响到 PDI 检测元件的精度。当元件的 NA 达到 0.3 时，为实现 EUVL 系统衍射极限的性能，要求小孔直径不大于 500 nm，为提高 CCD 的信噪比，应使小孔的透过率尽量高，因此，选择直径大小为 500 nm 的小孔较为适宜，此时，NA 为 0.6 内衍射波前的非对称 RMS 偏差为 $8.40 \times 10^{-5} \lambda$ ，波面强度均匀性为 0.664。

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. Medeck, E. Tejnil, K. A. Goldberg *et al.*. Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1526~1528

- 4 Y. Ichbara. Interferometer[P]. U. S. Patent 5076695, 1991-12-31
- 5 G. E. Sommargren. Phase shifting interferometer[P]. U. S. Patent 5933236, 1999-08-03
- 6 P. P. Naulleau, K. A. Goldberg, S. H. Lee *et al.*. Extreme-ultraviolet phase-shifting point-diffraction interferometer: a wave-front metrology tool with subangstrom reference-wave accuracy [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(35): 7252~7263
- 7 K. Otaki, F. Bonneau, Y. Ichihara. Absolute measurement of spherical surface by point diffraction interferometer[C]. *SPIE*, 1999, **3740**: 602~605
- 8 K. Ota, T. Yamamoto, Y. Fukuda *et al.*. Advanced point diffraction interferometer for EUV aspherical mirrors[C]. *SPIE*, 2001, **4343**: 543~550
- 9 K. Ota, T. Yamamoto, Y. Fukuda *et al.*. Aspherical mirror measurement using a point diffraction interferometer[C]. *SPIE*, 2002, **4688**: 690~694
- 10 K. A. Goldberg, P. Naulleau, S. H. Lee *et al.*. Direct comparison of EUV and visible-light interferometries[C]. *SPIE*, 1999, **3676**: 1~8
- 11 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Zhang Lichao *et al.*. Wave-front quality analysis of three-dimension pinhole vector diffraction 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
- 12 Y. Sekine, A. Suzuki, M. 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
- 13 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, 杨勇英, 王道档等. 基于时域有限差分法的点衍射波前误差分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0908003
- 14 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
- 15 A. Wong. Rigorous Three-Dimensional Time-Domain Finite-Difference Electromagnetic Simulation[D]. California: University of California at Berkeley, 1994. 11~25
- 16 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. Qing Kechneg, Liu Peisen, Chen Jiabi *et al.* Transl.. Beijing: Publishing House of Industry Press, 2006. 40~42
- J. W. Goodman. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧等译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 40~42
- 17 D. Malacara, J. M. Carpio-Valadéz, J. J. Sánchez-Mondragón. Wavefront fitting with discrete orthogonal polynomials in a unit radius circle[J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(6): 672~675
- 18 D. J. Fischer, J. T. O'Bryan, R. Lopez. Vector formulation for interferogram surface fitting[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(25): 4738~4743
- 19 C. P. Brophy. Effect of intensity error correlation on the computed phase of phase-shifting interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(4): 537~541
- 20 Bing Zhao, Y. Surrel. Effect of quantization error on the computed phase of phase-shifting measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(10): 2070~2075

栏目编辑：何卓铭