

纳米精度波像差检测随机点源阵列照明优化分析

卢增雄^{1,2} 齐月静^{1,2*} 齐 威^{1,2} 苏佳妮^{1,2} 彭卓君^{1,2}

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094

²北京市准分子激光工程技术研究中心, 北京 100094

摘要 在基于夏克-哈特曼波前传感器的深紫外物镜系统波像差检测中, 均匀高亮度的照明光束是实现纳米精度波像差检测的关键。采用时域有限差分法和部分相干性理论对随机排列微孔阵列衍射波前的强度对比度进行了优化。与周期排列微孔阵列相比, 采用随机排列微孔阵列, 可获得更加光滑的衍射波前强度分布; 对单个微孔衍射波前的分析表明, 微孔直径越大衍射波前强度对比度越大; 衍射波前强度对比度在双孔间为 74 nm 时达到最大值。分析计算得出, 为获得满足纳米精度波像差检测强度对比度要求的波前, 随机排列微孔阵列中宜采用直径 170 nm 的微孔, 且微孔间距大于等于 306 nm, 此时, 微孔阵列中微孔个数为 428, 衍射波前强度对比度为 11.70。

关键词 测量; 部分相干性理论; 微孔阵列; 随机排列; 强度对比度

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0612007

Optimized Analysis of Random Point Array Illumination Source for Nanometer Accuracy Wavefront Error Testing

Lu Zengxiong^{1,2} Qi Yuejing^{1,2} Qi Wei^{1,2} Su Jiani^{1,2} Peng Zhuojun^{1,2}

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

²Beijing Excimer Laser Technology and Engineering Center, Beijing 100094, China

Abstract The uniform and high brightness illumination light is the key for testing the projection objective lens in deep ultraviolet region with nanometer accuracy by using the method of Shack-Hartmann wavefront sensor. The intensity contrast of the wavefront diffracted by the random arrangement pinhole array is optimized by using finite-difference time domain method and the theory of partial coherence. The wavefront diffracted by the pinhole array with random arrangement is smoother compared with that with periodic arrangement. Analyzing the wavefront diffracted by the single pinhole shows that the larger the pinhole diameter is, the bigger the intensity contrast of the wavefront will be. The intensity contrast of the wavefront diffracted by double pinholes reaches to maximum value when their separation is 74 nm. The calculation and analysis show that, to obtain the wavefront whose intensity contrast meets the requirement of nanometer accuracy wavefront error metrology, the diameters of the pinholes in pinhole array with random arrangement should be 170 nm and their separations should not be less than 306 nm. In this case, there are 428 pinholes in the pinhole array, and the intensity contrast of the wavefront diffracted by them is 11.70.

Key words measurement; theory of partial coherence; pinhole array; random arrangement; intensity contrast

OCIS codes 120.4630; 120.5050; 030.1640; 050.1940; 070.7345

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^[1]。作为光刻机核心部件之一的投影物镜系统, 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^[2-3]。对于 90 nm 工艺节点的深紫外光刻投影曝光物镜系统, 其数值孔径(NA)为 0.75, 放大倍率为 1/4, 波像差小于 10.0 nm[均方根(RMS)值]^[4]。为保证该投影物镜系统的成像性能, 要求其波像差的检测精度达到纳米量级。

收稿日期: 2015-01-20; 收到修改稿日期: 2015-03-23

基金项目: 中国科学院光电研究院创新项目(Y40B06A12Y)

作者简介: 卢增雄(1984—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光学检测等方面的研究。E-mail: luzengxiong@aoe.ac.cn

*通信联系人。E-mail: qiyejing@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^[4-5],需提供一个 $NA=0.75$ 的无遮拦式准直物镜,但该准直物镜加工难度大,为克服该问题,在物镜像面上放置 $NA=0.75$ 的球面波点源,而物方仅需采用 $NA=0.1875$ 的准直物镜。但为得到 $NA=0.75$ 、球面偏差不大于 1.0 nm(RMS) 的球面波,要求采用直径小于 300 nm 的微孔^[6-8],同时为实现纳米精度的波像差检测,需使SHWS中间像素的强度与边缘像素的强度之比小于 $12.0^{[9-10]}$,这就要采用更小直径的微孔而使能量透射率过低。

采用微孔阵列代替单个微孔,是解决能量透射率问题的一个方法。Murakami等^[11]采用六角排列孔阵列进行极紫外光刻(EUVL)投影物镜系统波像差检测,克服了激光等离子体光源(LPP)^[12]或放电等离子体光源(DPP)^[13]能量较弱的问题。Liu等^[14]在基于夏克-哈特曼的物镜系统波像差检测中分析了采用方形排列孔阵列进行波像差检测和标定时孔阵列的结构参数。然而,按周期排列的微孔阵列,其结构和光栅类似,衍射图案中将会出现多个次级大,形成类似于激光散斑的效果。本文在投影物镜像面上采用随机排列微孔阵列,克服了用单个微孔产生大 NA 球面波能量透射率低的问题的同时,可获得均匀的强度分布。采用时域有限差分(FDTD)法^[15]和部分相干性理论^[16]对随机排列微孔阵列中微孔的直径大小和分布进行了优化,获得了满足纳米精度波像差检测所需的随机排列微孔阵列的结构参数。

2 分析计算模型

图1所示为采用点源阵列照明的投影物镜系统波像差测量原理。采用单孔照明时,单孔衍射产生的球面波经过待测物镜后携带其波像差信息,经准直镜和微透镜阵列后,在探测器上形成一组包含待测物镜波像差信息的光斑阵列,由此求得待测物镜的波像差。采用单孔产生 $NA=0.75$ 的球面波时,探测器上的信噪比较差。采用微孔阵列照明后,各微孔衍射产生的球面波在探测器上形成各自的一组光斑阵列。通过控制微孔阵列区域大小和微孔的排列方式,微透镜阵列中某个单元形成的多个光斑将基本重合在一起,从而使信噪比大大提高。

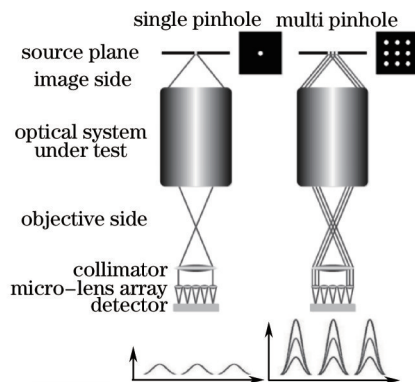


图1 采用点源阵列照明的投影物镜系统波像差测量原理

Fig.1 Principle of wavefront error metrology for projection objective lens by using point array illumination source

图1中,若各点源产生的球面波彼此是空间非相干的,则它们叠加后的强度将是单个微孔时的 N 倍(N 为微孔个数),且强度分布与单个微孔衍射产生的强度分布相似,故只需优化单个微孔衍射波前的强度对比度。然而,根据范西特-泽尼克定理^[16],即使照明光源是空间非相干的,其产生的光波传播到微孔阵列所在平面上时,各微孔所在位置处的光场之间将具有一定的相干度,从而使各微孔衍射产生的球面波之间也具有一定的相干度。这些球面波阵列叠加后,将使SHWS中间像素的强度远大于边缘像素的强度。因此,为获得满足SHWS强度对比度要求的光强分布,需同时优化微孔阵列中微孔的直径大小和分布。

点源阵列空间相干性分析计算模型如图2所示,半径为 a 的空间非相干均匀圆形光源位于平面 Σ_1 上,距离 Σ_2 为 L 的平面 Σ_2 上放置微孔阵列,其上的 N 个微孔按特定方式排列(方形排列、六角排列或随机排列)。光源上任意点 S 到微孔 $P_m(x_m, y_m)$ 和 $P_n(x_n, y_n)$ 的距离分别为 R_m 和 R_n 。微孔阵列中各微孔之间的空间相干性和光源半径 a 、光源到微孔阵列的距离 L 及微孔的位置有关。根据范西特-泽尼克定理^[16],微孔 P_m 和 P_n 之间的复相干系数 μ_{mn} 为

$$\mu_{mn} = \frac{\exp(i\varphi) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(\xi, \eta) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda L} (\Delta x \xi + \Delta y \eta)\right] d\xi d\eta}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(\xi, \eta) d\xi d\eta}, \quad (1)$$

式中 $I(\xi, \eta)$ 为 Σ_1 上光源的强度分布, Δx 和 Δy 分别为微孔 P_m 和 P_n 横坐标之差和纵坐标之差, 即 $\Delta x = x_m - x_n$, $\Delta y = y_m - y_n$, φ 为相位因子, 表达式为

$$\varphi = \frac{\pi}{\lambda L} [(x_m^2 + y_m^2) - (x_n^2 + y_n^2)]. \quad (2)$$

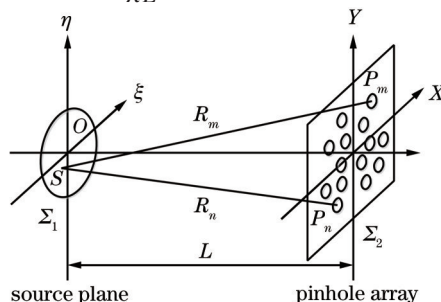


图2 点源阵列空间相干性分析计算模型

Fig.2 Model for calculation and analysis of spatial coherence between pinholes within point source array

由于光源是均匀分布的圆形光源, 其强度分布可表示为

$$I(\xi, \eta) = I_0 \text{circ}\left(\frac{r}{a}\right). \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式积分得

$$\mu_{mn} = \exp(i\varphi) \left\{ \frac{2J_1 \left[2\pi a \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} / (\lambda L) \right]}{2\pi a \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} / (\lambda L)} \right\}. \quad (4)$$

于是, 微孔阵列中各微孔衍射叠加后的强度分布为

$$I(p, q) = I^0(p, q) \left\{ N + 2 \sum_{m=2}^N \sum_{n=1}^{m-1} |\mu_{mn}| \exp\{-ik[p(x_m - x_n) + q(y_m - y_n)]\} \right\}, \quad (5)$$

式中 $I^0(p, q)$ 为单个微孔在微孔阵列后某观察点 (p, q) 上的强度分布, 可通过 FDTD 法计算得到^[6-7]。 $|\mu_{mn}|$ 为复相干系数的模, 即相干度。

微孔阵列衍射波前强度对比度(强度均匀性的倒数) χ 定义为

$$\chi = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}, \quad (6)$$

式中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别为观察面上考察的 NA 内强度 $I(p, q)$ 的最大值和最小值。

3 结果与讨论

3.1 微孔直径大小对衍射波前强度对比度的影响

图3所示为单个微孔衍射波前强度对比度随微孔直径大小的变化关系。其中, 微孔衍射波前的强度分布是由 FDTD 计算得到近场分布后, 通过等效原理传播到远场球面上得到的^[6-7,17]。由图可知, 当微孔直径从 110 nm 增大到 200 nm 时, 在 NA=0.75 范围内, 衍射波前的强度对比度从 3.55 增大到 11.22。因此, 采用单个微孔时, 衍射波前的强度对比度均能满足纳米精度波像差检测的要求。

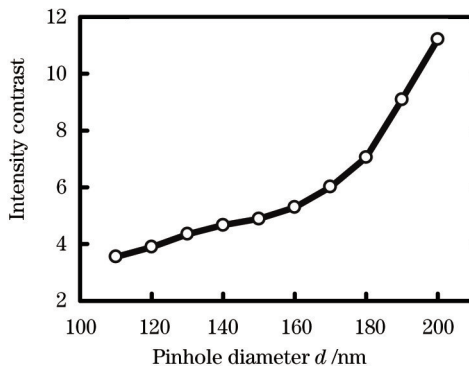


图3 不同直径微孔衍射波前的强度对比度

Fig.3 Intensity contrast of wavefront diffracted by pinholes with different diameters

3.2 微孔间距对衍射波前强度对比度的影响

两个微孔之间的相干度和微孔间距的关系如图4所示,二者满足贝塞尔函数的分布规律。其中,非相干照明光源的半径 a 为 3.0 mm,波长为 193.368 nm,光源到微孔阵列的距离 L 为 4.0 mm。因此,通过控制微孔间距为 157.3, 288.0, 417.5 nm, ..., 可取得贝塞尔函数的零点,即得到两个非相干的衍射波前。

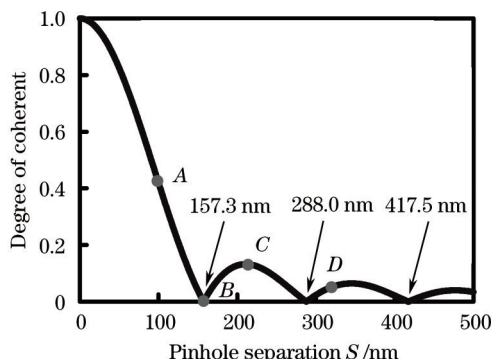


图4 两个微孔之间的相干度和微孔间距的关系

Fig.4 Relationship between degree of coherent of two pinholes and their separation

图4中A、B、C和D四点处两个微孔的间距分别为100.0、157.3、215.0、320.0 nm,两微孔之间的相干度分别为0.4202、0、0.1316和0.0516。直径200 nm的两个微孔,当它们的间距分别为上述四点所表示的间距时,衍射波前叠加后的强度分布如图5所示。为了便于比较,将单孔强度分布、双孔衍射波前非相干叠加和相干叠加的强度分布也表示在图中。如图可知,A、B、C和D四个位置处,两衍射波前相干叠加后,强度峰值大小均为单孔情况下的4倍,但干涉条纹的数目则与微孔间距有关。当双孔衍射波前部分相干叠加时,强度大小将随微孔间距发生变化,因此,强度对比度也将发生变化。

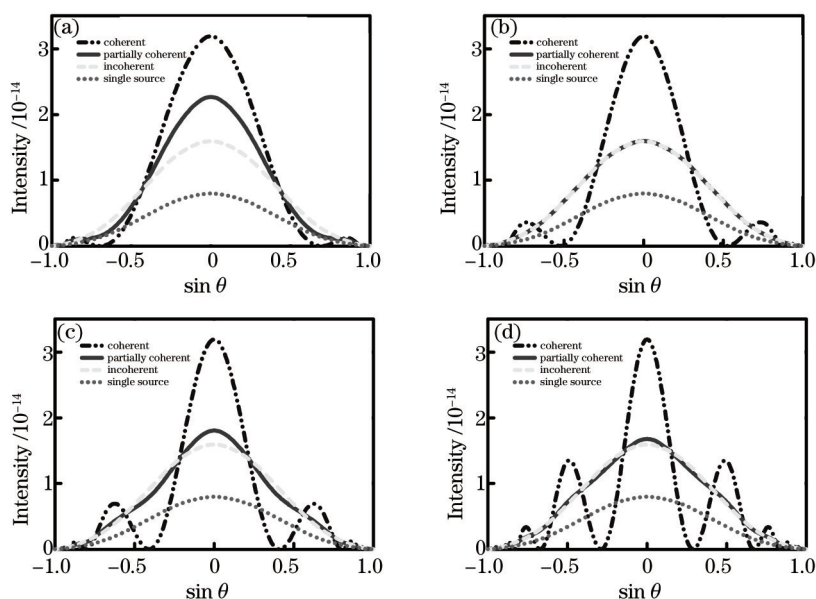


图5 不同微孔间距处衍射波前强度叠加结果。(a) $S=100.0$ nm;(b) $S=157.3$ nm;(c) $S=215.0$ nm;(d) $S=320.0$ nm

Fig.5 Results of addition of intensity diffracted by two pinholes with different separations.

(a) $S=100.0$ nm;(b) $S=157.3$ nm;(c) $S=215.0$ nm;(d) $S=320.0$ nm

图6所示为直径分别取120、140、160、180、200 nm时的两个微孔的衍射波前按图4所示的相干度叠加后的强度对比度随微孔间距的变化关系。由图可知,不同直径的微孔,当间距为74 nm时,强度对比度均达到最大值,分别为15.6、18.7、21.3、27.0和34.0。在其他位置处,强度对比度均随微孔间距的增大出现多个极大值和极小值,且极大值和极小值的位置一致。因此,微孔衍射波前强度对比度的变化规律只与微孔间距有关,而与微孔直径大小无关,但微孔直径大小会影响某一间距处的强度对比度。

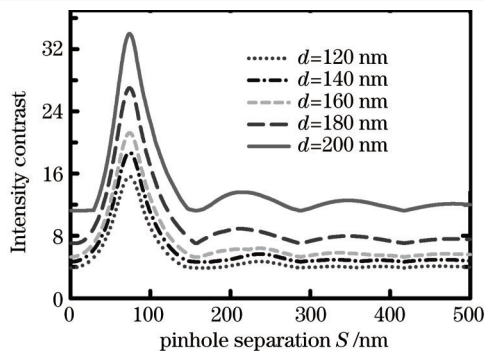


图 6 衍射波前强度对比度随微孔间距的变化

Fig.6 Variation of intensity contrast versus pinhole separation

3.3 微孔排列方式对衍射波前强度分布的影响

由 3.2 节可知,两个微孔之间距离的变化将会影响衍射波前的强度分布,进而影响衍射波前的强度对比度。当微孔阵列中有多个微孔时,微孔的排列方式也将影响衍射波前的强度分布。

图 7 所示为六角排列孔阵列和随机排列孔阵列在完全相干光、部分相干光和完全非相干光照明下衍射波前的强度分布。为方便比较,同时给出了单孔衍射波前的强度分布。孔阵列中,微孔直径大小为 200 nm,微孔个数为 800 个。由图可知,在完全非相干光照明下,六角排列孔阵列和随机排列孔阵列衍射波前强度分布和单孔情况下是一致的,且强度大小是单孔情况下的 800 倍。在完全相干光照明下,六角排列孔阵列和随机排列孔阵列衍射波前中央都出现了极强的零级,该极强零级的出现,将使探测器中间像素达到饱和时,边缘像素仍然探测不到信号。另外,六角排列孔阵列衍射波前中还出现了次级,而随机排列孔阵列中无任何

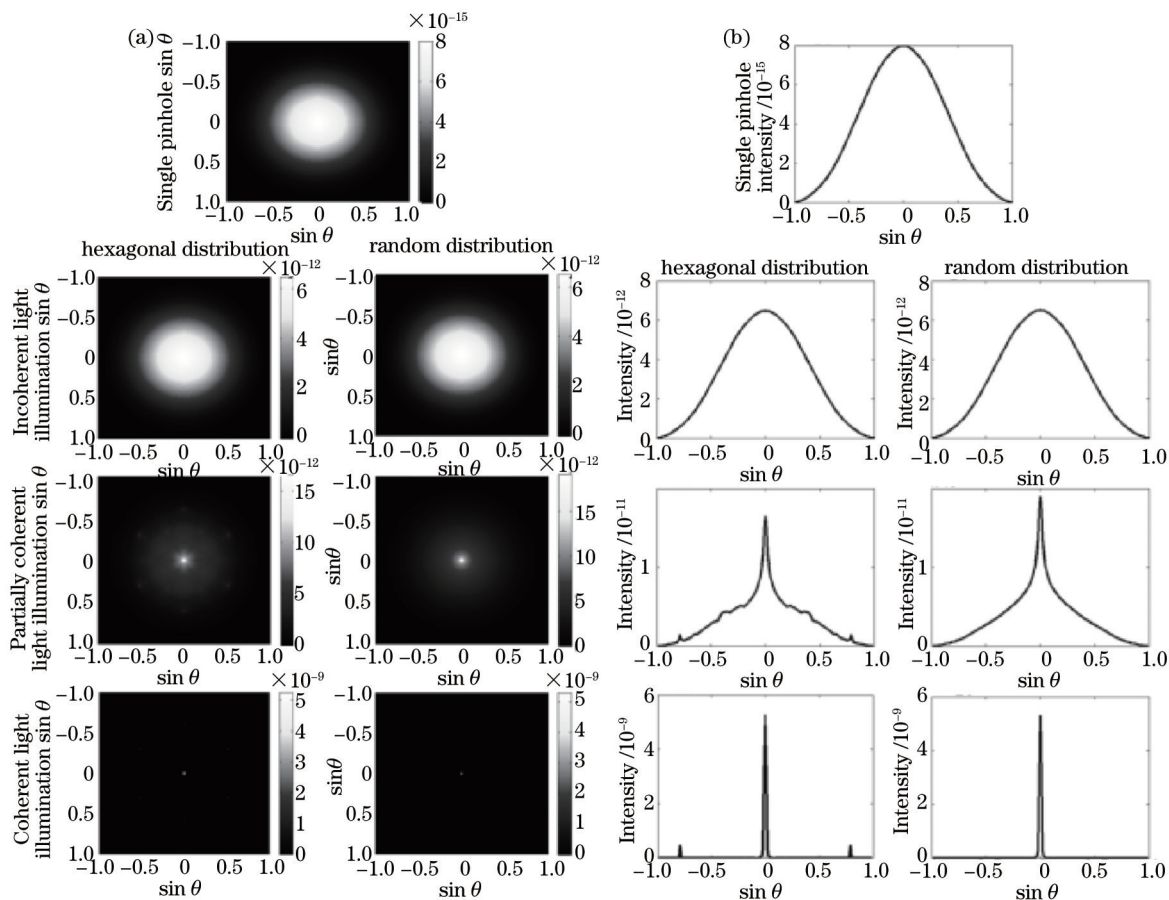


图 7 不同排列方式的微孔衍射波前的强度分布。(a) 二维分布; (b) 截面图

Fig.7 Intensity distribution of wavefront diffracted by pinhole array with different arrangements. (a) 2D distribution; (b) cross section

次级。在部分相干光照明下,六角排列孔阵列和随机排列孔阵列衍射波前中仍有零级,但零级的强度比完全相干光照明时弱很多。另外,六角排列孔阵列衍射波前零级周围存在旁瓣(方形分布孔阵列与此类似,这里不做分析),使衍射波前强度分布出现涨落,而随机排列孔阵列衍射波前零级周围无旁瓣,衍射波前强度分布整体是平滑的。因此,下面将对随机排列微孔阵列进行优化分析,通过控制微孔的直径大小和间距实现零级强度的控制,获得满足纳米精度波像差检测精度要求的衍射波前强度对比度。

3.4 随机排列微孔阵列衍射波前强度对比度优化

由前几节可知,微孔阵列衍射波前的强度对比度与微孔的直径大小、微孔间距和排列方式有关。本节考虑随机分布微孔阵列中微孔的直径大小和微孔的排列对衍射波前强度对比度的影响。由于随机排列微孔阵列中,各微孔之间的间距是随机的,在强度对比度优化过程中,将通过控制微孔阵列中距离最近的微孔的距离来控制微孔阵列中微孔的位置。

图 8 所示为随机排列微孔阵列中,衍射波前的强度对比度随微孔间距 S 的变化关系,此处 S 为微孔阵列中距离最近的微孔的间距。由图可知,当微孔间距从 250 nm 增大到 600 nm 时,衍射波前的强度对比度不断减小。对于相同间距的微孔,直径越小,衍射波前的强度对比度也越小。当微孔直径小于 150 nm 时,衍射波前强度对比度均小于 12.0;直径 190 nm 和 200 nm 的微孔,衍射波前强度对比度在间距 250~600 nm 范围内均大于 12.0,故不能满足要求。在衍射波前强度对比度满足要求的情况下,为了获得尽量大的透射率,要求微孔直径尽量大,孔间距尽量小(孔阵列中,微孔间距越小,微孔个数越多)。将图 8 的曲线画成二维图像,如图 9 所示。图中白色曲线右下方点对应的微孔间距和直径大小均能满足强度对比度小于 12.0 的要求,而左上方的点对应的微孔间距和直径大小均不能满足要求。通过优化微孔透射率和衍射波前强度对比度后,采用直径 170 nm 的微孔,间距 S 为 306 nm,此时,微孔阵列中孔个数为 428,衍射波前的强度对比度为 11.70。

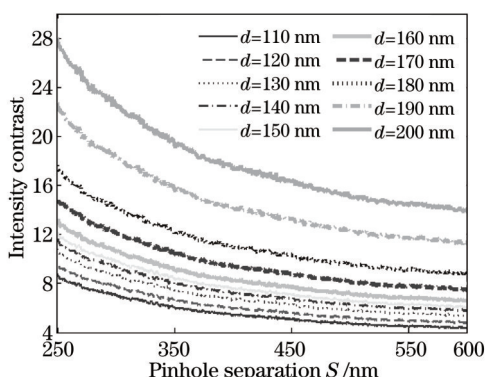


图 8 衍射波前强度对比度与微孔间距的关系
Fig.8 Relationship between intensity contrast of diffracted wavefront and pinhole separation

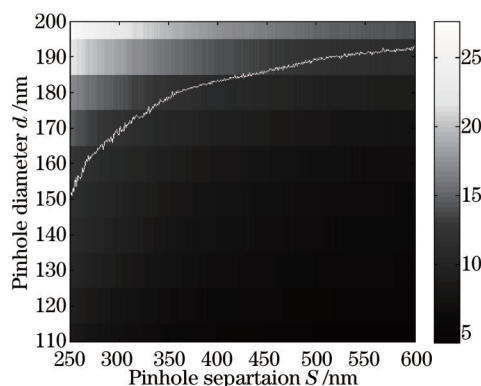


图 9 衍射波前强度对比度与微孔间距和直径大小的关系
Fig.9 Relationship between intensity contrast of diffracted wavefront versus pinhole diameter and separation

3.5 微孔位置误差对衍射波前强度对比度的影响

按照 3.4 节得到的微孔阵列中微孔的直径大小和位置信息后可用于实际微孔阵列的加工。然而,由于加工误差,微孔的直径大小和位置坐标将和理论设计结果存在偏差。该偏差对最终衍射波前强度对比度的影响程度需进行评估。对于目前的电子束加工水平来说,加工 170 nm 直径大小的微孔时,直径大小控制在 ± 10.0 nm 是可以实现的^[18-20],由图 3 可知,该直径大小的变化对单个微孔衍射波前强度对比度的影响较小。因此,这里不予以考虑。

图 10 所示为随机排列微孔阵列中,微孔的位置存在 0、 ± 5.0 、 ± 10.0 、 ± 15.0 、 ± 20.0 nm 峰谷(PV)值的加工误差时,衍射波前强度对比度随微孔间距的变化情况。其中微孔的直径大小为 170 nm,由图可知,微孔位置的加工误差基本不影响衍射波前的强度对比度。

4 结 论

采用 FDTD 法和部分相干性理论分析了随机排列微孔阵列中微孔的直径大小、间距、位置以及微孔位置加工误差对衍射波前强度对比度的影响,获得了满足纳米精度波像差检测所需的微孔阵列的最优参数。与

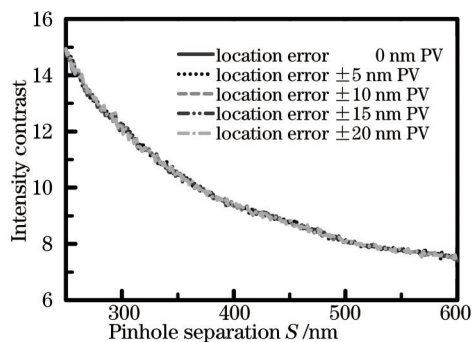


图 10 微孔位置加工误差对衍射波前强度对比度的影响

Fig.10 Effect of fabrication errors of pinhole location on intensity contrast of diffracted wavefront

周期排列微孔阵列相比,随机排列微孔阵列可获得更加光滑的衍射波前强度分布。随机排列微孔阵列中微孔直径大小、间距和排列方式均会影响衍射波前的强度对比度,而微孔位置的加工误差基本不影响衍射波前的强度对比度。为了使衍射波前的强度对比度小于12,微孔阵列中需采用间距大于等于306 nm、直径170 nm的微孔,此时,微孔阵列中微孔个数为428,衍射波前的强度对比度为11.70。分析结果对实现投影物镜系统波像差纳米精度的检测具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Cai Yanmin, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Design of Wollaston prism used for polarization illumination system in ArF lithography tool[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0616002.
蔡燕民, 王向朝, 黄惠杰. 用于 ArF 光刻机偏振照明系统的沃拉斯顿棱镜的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0616002.
- 2 B Peng, X Wang, Z Qiu, *et al.*. Aberration-induced intensity imbalance of alternating phase-shifting mask in lithographic imaging[J]. Opt Lett, 2010, 35(9): 1404-1406.
- 3 F Wang, X Wang, M Ma. Measurement technique for in situ characterizing aberrations of projection optics in lithographic tools[J]. Appl Opt, 2006, 45(24): 6086-6093.
- 4 T Fujii, J Kougo, Y Mizuno, *et al.*. Portable phase measuring interferometer using Shack-Hartmann method[C]. SPIE, 2003, 5038: 726-732.
- 5 T Fujii, K Suzuki, Y Mizuno, *et al.*. Integrated projecting optics tester for inspection of immersion ArF scanner[C]. SPIE, 2006, 6152: 615237.
- 6 Qi Yuejing, Lu Zengxiong, Yang Guanghua, *et al.*. Analysis of effect of numerical aperture of illumination objective lens on quality of wavefront diffracted by tiny pinhole[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0208001.
齐月静, 卢增雄, 杨光华, 等. 照明物镜数值孔径对微孔衍射波前质量影响分析[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0208001.
- 7 G Ding, Y Qi, Z Lu, *et al.*. Effect of illumination parameters on the quality of wavefront diffracted by pinhole[C]. SPIE, 2014, 9282: 92821U.
- 8 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.
- 9 G Cao, X Yu. Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object[J]. Opt Eng, 1994, 33(7): 2331-2335.
- 10 J Arines, J Ares. Minimum variance centroid thresholding[J]. Opt Lett, 2002, 27(7): 497-499.
- 11 K Murakami, T Oshino, H Kondo, *et al.*. Development of EUV lithography tools at nikon[C]. SPIE, 2011, 7969: 79690P.
- 12 C-S Koay, C Keyser, K Takenoshita, *et al.*. High conversion efficiency tin material laser plasma source for EUVL[C]. SPIE, 2003, 5037: 801-806.
- 13 W T Silfvast, M Klosner, G M Shimkaveg, *et al.*. High-power plasma discharge source at 13.5 nm and 11.4 nm for EUV lithography[C]. SPIE, 1999, 3676: 272-277.
- 14 K Liu, Y Li, M Zheng, *et al.*. High numerical aperture Hartmann wavefront sensor with pinhole array extended source[C]. SPIE, 2012, 8550: 85503M.
- 15 T Alien. Computational Electromagnetic: Finite-Difference Time-Domain method[M]. Boston: Artech House, 2005: 329-352.

- 16 M Born, E Wolf. Principles of Optics[M]. Yang Jiasun, Transl. 7th edition. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 459-525.
玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙, 译. 第7版. 北京: 电子工业出版社, 2005: 459-525.
- 17 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.
- 18 Xie Changqing, Zhu Xiaoli, Niu Jiebin, *et al.*. Micro- and nano-metal structures fabrication technology and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900128.
谢常青, 朱效立, 牛洁斌, 等. 微纳金属光学结构制备技术及应用[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900128.
- 19 N Kobayashi, K Goto, T Wakatsuki, *et al.*. Improvement of position accuracy in mask-writing electron beam lithography with a multi-pass writing strategy for reducing position errors due to resist charging[C]. SPIE, 2008, 7028: 70281Y.
- 20 Du Yuchan, Li Hailiang, Shi Lina, *et al.*. Integrated development of extreme ultraviolet lithography mask at 32 nm node[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1034002.
杜宇禅, 李海亮, 史丽娜, 等. 32 nm节点极紫外光刻掩模的集成研制[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1034002.

栏目编辑: 何卓铭