

文章编号 2095-1531(2014)05-0855-08

点衍射干涉仪波面参考源误差及公差分析

代晓珂^{1,2} 金春水^{1*} 于杰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. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 为了保留光纤点衍射干涉仪容易对准以及衍射光束易于控制的优点, 同时又能实现大数值孔径(NA) 光学系统的检测, 设计了一种新型的波面参考源(WRS), 它保留了光纤点衍射和微孔点衍射的优点, 可满足大 NA 极紫外光刻物镜系统波像差检测的要求。本文在分析各种误差的基础上, 搭建了WRS原理光路并对WRS的系统误差标定算法进行详细的研究, 得到WRS标定时旋转平台的角度公差为 0.5° , 跳径时偏离系数为 0.5% 。这一新型WRS误差分析及标定对于实现高精度的检测具有十分重要的意义, 最终为实现WRS系统误差标定提供理论基础。

关键词: 光学检测; 点衍射干涉仪; 波面参考源; 误差研究; 公差分析

中图分类号: O436.1 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20140705.0855

Analysis on error and tolerance for the wavefront reference source of point diffraction interferometer

DAI Xiao-ke^{1,2}, JIN Chun-shui^{1*}, Yu Jie¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

* Corresponding author. E-mail: jincs@sklao.ac.cn

Abstract: To keep the advantages of fiber point diffraction interferometer which is easy to align and control the diffracted light, we design a new wavefront reference source(WRS). WRS can keep the advantages of fiber point diffraction interferometer and pin-hole point diffraction interferometer, and it also can be used to test the wavefront aberration of larger NA optical system for Extreme Ultraviolet Lithography(EUVL). The analysis of error for this new WRS and calibration of the system error is very important for realizing a more accurate test of wavefront aberration. Based on the analysis of various errors, we study the calibration algorithm in detail, and obtain the tolerance of several WRS important components including that the angle tolerance of rotation stage is 0.5° and the deviation factor is 0.5% when rotation is away optical axis.

Key words: optical test; point diffraction interferometer; wavefront reference source(WRS); system error; tolerance

收稿日期: 2014-06-12; 修订日期: 2014-08-14

基金项目: 应用光学国家重点实验室基金资助项目(No. 09Q03FQM90)

1 引言

极紫外光刻(EUVL)技术被认为是最具潜力的下一代光刻技术之一,它最大程度地承袭了现有光刻技术的发展成果。EUVL是以13.5 nm的极紫外光将掩膜上的图形成像在涂敷有光刻胶的硅片上,为实现投影光学系统衍射极限的分辨率,根据Marachel判据,要求投影物镜系统的波像差小于 $\lambda/14$,也就是要求小于1 nm RMS。对如此高的检测精度,传统的干涉仪由于受参考元件面型精度的限制很难满足要求,而以小孔衍射产生的近似理想的球面波作为参考波面已成为EUVL光学检测的常用方法^[1-4]。

自从1974年Smartt和Strong将点衍射技术应用到光学检测中,该工作得到了中外学者极大的关注并进行相应的研究。1996年,Sommargren提出利用光纤实现点衍射的光纤相移点衍射干涉仪,并将其用在EUVL光学元件面形及波像差检测之中^[5-6]。相对于微孔点衍射,光纤可以避免微孔对准的麻烦,并且由于单模光纤只传输单一模式光束,还可以实现很好的光束滤波,降低出射光束质量受聚焦物镜像差的影响,但是由于光纤线芯直径很大(3~5 μm),衍射球面波的可用数值孔径(NA)通常小于0.2,不能直接对 $NA=0.3$ 的大数值孔径极紫外光刻光学系统的进行检测。国内也有大量光纤点衍射的相关研究:刘国淦在国内较早提出了用光纤实现点衍射的思想^[7],此后张宇等人设计了双光纤相移点衍射干涉仪以满足EUVL高精度波像差检测的需求^[8]。

2005年,Canon和Livermore公司提出了一种改进的光纤相移点衍射干涉仪^[9],可以在保留光纤衍射优点的同时实现大 NA 极紫外光刻光学系统的检测,本文即在此思想基础上设计了这一新型WRS并对其进行一系列研究分析。

2 系统设计

本文所采用的光纤相移点衍射干涉仪光路图如图1所示,关于光束耦合到光纤前的前置光路

优化,已经有人进行了详尽的研究,后置WRS是整个系统能够产生高质量球面波以及实现大 NA 检测的关键所在,它主要由3个部分组成:光束准直系统、偏振检测部分和微孔对准系统组成。

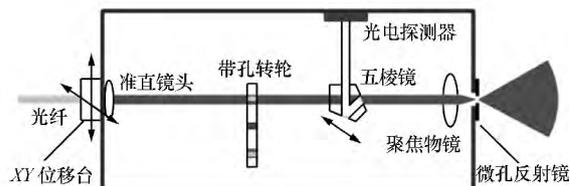


图1 WRS光路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of beam path of WRS

2.1 光束准直系统

一般单模光纤的纤芯直径在3~5 μm ,对于进行波像差检测的532 nm波长,理论上的衍射光束最大 NA 为 $1.22 \times 532/3000 = 0.21$,考虑到光束的强度均匀性,实际可用 NA 通常小于0.21。对于EUVL,为了提高光刻分辨率和进入光学系统的能量,光学系统的 NA 设计的都较大,通常都大于0.3,ASML甚至有 $NA=0.6$ 的光学系统,为了对这些大 NA 光学系统波像差进行检测,需要将光纤衍射球面波 NA 进行“扩大”。首先要对光纤衍射球面波进行准直,而后再将光束聚焦到直径更小的微孔上以产生大 NA 的高质量球面波。另外准直镜头还可以和聚焦镜头配合形成缩小光学系统以缩小光纤出射的光斑,提高聚焦光斑能量。本文的准直系统是将光纤和光纤准直镜头整体固定在 XY 平移台上,以确保光束和WRS光轴的重合,通过与微孔对准系统配合实现光束聚焦于微孔中心。

2.2 偏振检测系统

WRS光束的偏振态对检测结果有很大的影响,这将在下文的偏振态误差中详细阐述。在光纤上安装偏振控制器,通过驱动电压产生应力双折射可实现出射光束偏振态的控制,在WRS内部安装带有波片的带孔转轮,在其后的单轴位移台上安装一五棱镜将光束折向功率计,探测光强大小,以配合偏振态的检测。

本文选用一双层密度盘实现偏振检测,密度盘每一层可以自由转动,每一层的波片安装如图

2 所示, 1/4 波片和偏振方向与 1/4 波片快轴成 45° 的偏振片组合可以实现圆偏振态的检测(第二层的两个偏振片透振方向成 90°, 分别实现左旋和右旋圆偏振态的检测), 通孔和线偏振光的组合可以实现线偏振光的检测, 光栅和通孔的组合是为配合微孔对准设计的。

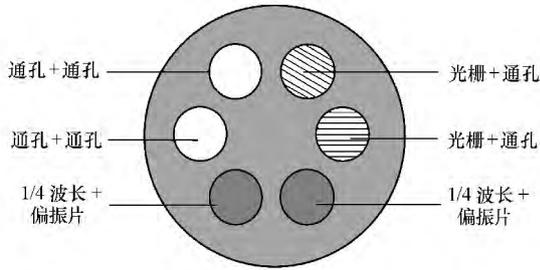


图 2 双层密度盘波片安装示意图

Fig. 2 Diagram of plate installing on double layers

2.3 微孔对准系统

以检测 NA 为 0.3 的光学系统为例, 卢增雄^[10]等人通过对有限厚度有限电导率的微孔进行 FDTD 分析显示: 直径为 800 nm 的微孔衍射球面波可以满足要求。但实现 800 nm 微孔的对准是十分困难的, 如图 3 所示, 在距离微孔毫米量级的 4 个位置各开一方形窗, 以辅助对准经过准直透镜准直的光束在通过带孔转轮的光栅时, 调整三维调整台上的聚焦物镜, 恰好使正负一级衍射光通过窗口, 通过显微镜观察到正负一级衍射光时即可认为光束大致聚焦在微孔中心。光束的精确对准需要继续调节三维调整台并在 CCD 相机上观察光强的变化, 当光强最大时, 光束对准最好。

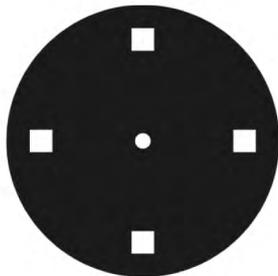


图 3 微孔板示意图

Fig. 3 Diagram of pinhole plate

3 误差分析

相移点衍射干涉仪的误差如相移误差、探测器误差、空气扰动误差, 前人已经进行了充分的研究^[11]。本文主要对引入 WRS 后的误差: 光束的反射误差、WRS 的系统误差以及偏振态误差进行分析。

3.1 光束反射误差

测试光束在经过待测光学系统后, 需要在参考 WRS 的微孔反射镜上反射, 然后与参考 WRS 衍射的球面波干涉。测试 WRS 在参考 WRS 微孔反射镜上的反射点和参考 WRS 光束出射点不可能实现完全重合, 这将导致测量的波像差中包含参考光和测试光不重合引入的像差, 通过对光程差进行泰勒展开并 Zernike 拟合可以得到像差具

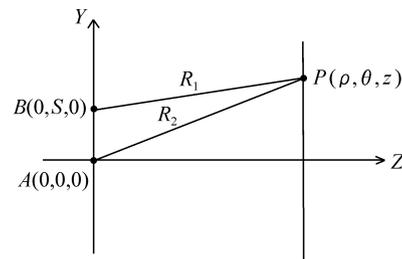


图 4 反射误差计算示意图

Fig. 4 Diagram of calculating reflection error

体大小如图 4 所示, A 点表示参考 WRS 出射点, B 点代表测试 WRS 入射点, P 点表示 CCD 上观测点, 则:

$$\Delta R = R_1 - R_2 = -\frac{s^2}{2z} + \frac{s^2 \rho^2}{2z^3} + \frac{s^4}{8z^3} + \left(\frac{s}{z} - \frac{s^3}{2z^3}\right) \rho \sin\theta - \frac{s}{2z^3} \rho^3 \sin\theta - \frac{s^2 \rho^2}{4z^3} \cos 2\theta, \quad (1)$$

对于 Fringe Zernike 多项式:

$$\begin{aligned} Z_1 &= 1, Z_3 = r \sin\theta, Z_4 = 2r^2 - 1 \\ Z_5 &= r^2 \cos 2\theta, Z_8 = (3r^3 - 2r) \sin\theta, \quad (2) \\ r &= \rho/R_m \end{aligned}$$

式中 r 表示归一化半径 ($r = \rho/R_m$) R_m 是 CCD 面的最大半径, 其中 Z_1, Z_3, Z_4, Z_5, Z_8 分别是 Zernike

像差多项式的平移、倾斜、离焦、像散和彗差项 将 P 点坐标用归一化坐标表示 得到:

$$\Delta R = \frac{s^4 + 2s^2 R_m^2 - 4z^2 s^2}{8z^3} Z_1 + \left(\frac{sR_m}{z} - \frac{s^2 R_m}{2z^3} - \frac{sR_m^3}{3z^3} \right) Z_3 + \frac{s^2 R_m^2}{4z^3} Z_4 - \frac{s^2 R_m^2}{4z^3} Z_5 - \frac{sR_m^3}{6z^3} Z_8 \quad (3)$$

Zernike 多项式的前四项是装调量,可不予考虑,当 s 很小时 将归一化半径分解为 x, y 轴上的归一化坐标得到: Z_5 项和 Z_8 项误差分布相对于归

一化坐标的变化如图 5 所示, Z_8 项比 Z_5 项大 3 个数量级,即像差主要表现出彗差,因此主要考虑消除彗差项:

$$a_8 = -\frac{sR_m^3}{6z^3} \quad (4)$$

分析彗差项可知,当反射点相对微孔中心对称分布时,即 β 相对 A 点对称分布,取平均后彗差项为 0,因此可在微孔周围取对称分布的点多次测量,以有效消除彗差,此方法还可以减小微孔板粗糙度对反射球面波波前的影响。

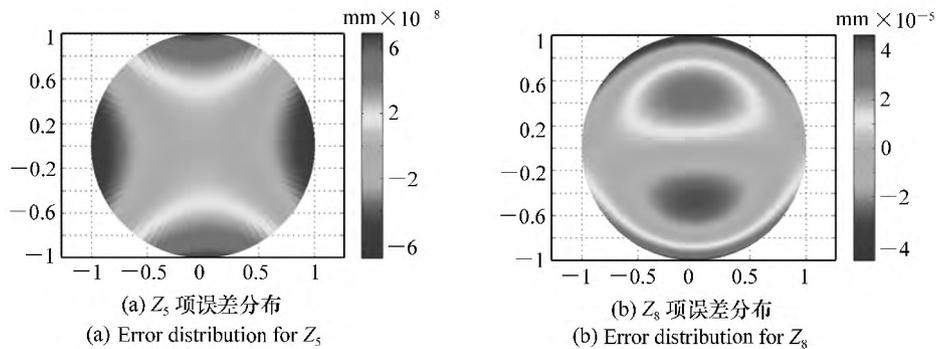


图 5 Z_5 和 Z_8 项误差分布图

Fig. 5 Error distribution for Z_5 and Z_8

3.2 WRS 系统误差

本文提出对新型 WRS 系统误差进行绝对标定的方法,系统误差绝对标定一般采用旋转平移法:待测系统旋转平移或者参考源旋转平移法。鉴于实现 EUVL 投影物镜系统整体旋转的难度较大,本文选择通过 WRS 的旋转和倾斜旋转来实现误差标定。由于前面的偏振控制系统可以确保光束的圆偏振态,在 WRS 旋转过程中,可以认为波像差是不变的,将系统误差分为旋转对称和旋转非对称误差之和并分别予以标定,标定原理^[12]如下:

非对称误差的标定原理如下:

$$T(x, y) = W(x, y) + V(x, y) = W(x, y) + V_s(x, y) + V_{as}(x, y) \quad (5)$$

$T(x, y)$ 表示带误差的波像差测试数据, $W(x, y)$ 表示真实波像差, $V(x, y)$ 表示系统误差, $V_s(x, y)$ 和 $V_{as}(x, y)$ 分别表示旋转对称误差和旋转非对称

误差。

对 WRS 绕中心轴分别进行 4 次旋转,每次旋转 90° :

$$T_\phi(x, y) = W(x, y) + V_s(x, y) + V_{as\phi}(x, y) \quad (\phi = 0, 90, 180, 270^\circ) \quad (6)$$

根据 Zernike 多项式的性质,旋转非对称项(不包括角度四倍频项,角度四倍频项在旋转 90° 时不变,将其考虑为旋转对称项)在 4 次取平均后为 0,因此旋转后取平均:

$$\overline{T_\phi(x, y)} = W(x, y) + V_s(x, y) \quad (7)$$

旋转非对称误差为:

$$V_{as}(x, y) = T(x, y) - \overline{T_\phi(x, y)} \quad (8)$$

对旋转对称误差的标定原理是在不同坐标系下,可用 Zernike 多项式的线性组合表达重合区域的波像差,且两者相等。如图 6 所示。

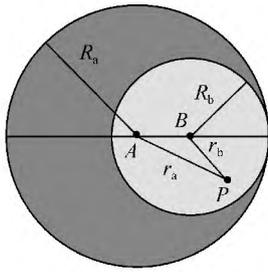


图 6 旋转对称误差标定示意图

Fig. 6 Diagram of calibrating non-symmetric errors

在圆 A 和圆 B 各自坐标系下的 WRS 误差如下:

$$V_A = \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm(n-2k)}^{\pm n} C_{nm}^A Z_{nm} \left(\frac{r_A}{R_A} \phi_A \right) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm 4l} C_{nm}^A Z_{nm} \left(\frac{r_A}{R_A} \phi_A \right) + \sum_{n=0}^N \sum_{m \neq \pm 4l} C_{nm}^A Z_{nm} \left(\frac{r_A}{R_A} \phi_A \right), \quad (9)$$

$$V_B = \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm(n-2k)}^{\pm n} C_{nm}^B Z_{nm} \left(\frac{r_B}{R_B} \phi_B \right) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm 4l} C_{nm}^B Z_{nm} \left(\frac{r_B}{R_B} \phi_B \right) + \sum_{n=0}^N \sum_{m \neq \pm 4l} C_{nm}^B Z_{nm} \left(\frac{r_B}{R_B} \phi_B \right), \quad (10)$$

在重合区域, WRS 波像差相等即: $V_A = V_B$ 移项后:

$$\sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm 4l} C_{nm}^A Z_{nm} \left(\frac{r_A}{R_A} \phi_A \right) - \sum_{n=0}^N \sum_{m=\pm 4l} C_{nm}^B Z_{nm} \left(\frac{r_B}{R_B} \phi_B \right) = \sum_{n=0}^N \sum_{m \neq \pm 4l} C_{nm}^B Z_{nm} \left(\frac{r_B}{R_B} \phi_B \right) - \sum_{n=0}^N \sum_{m \neq \pm 4l} C_{nm}^A Z_{nm} \left(\frac{r_A}{R_A} \phi_A \right) = V_{as}^{dif}, \quad (11)$$

式中 V_{as}^{dif} 为绕过 A 点和 B 点轴的旋转非对称误差之差, 对重合区域用最小二乘法^[13]即可求得旋转对称项的 Zernike 项系数 C_{nm} 。将旋转非对称误差和旋转对称误差相加可得到总的系统误差。

3.3 偏振态误差

从光纤中衍射出的光束偏振态直接决定了微

孔衍射后光束的误差以及干涉图的对比度。根据计算, 线偏振光束经过微孔衍射后, 波前表现出很大的像散, 微孔很难滤除像散; 而圆偏振光经微孔衍射后波前主要像差是球差, 在进行系统误差标定时, WRS 绕光轴旋转时球差是不变的, 因此选择圆偏振光作为微孔衍射的照明光束。

当使用不同旋向的圆偏振光时, 干涉条纹的对比度为 $(1 - \cos\theta) / 2$ (θ 表示两束光的夹角); 而相同旋向的圆偏振光干涉时, 干涉条纹的对比度为 $(1 + \cos\theta) / 2$ 。进行波像差检测时, 两束光的夹角很小, 近似为零, 因此使进行干涉的两束光为相同旋向的圆偏振光, 对于消除偏振态误差十分重要。

4 WRS 公差分析

WRS 的精确构建对于波像差检测实验的精度具有至关重要的影响, 因此应该对包括 WRS 内部各器件的公差和旋转平台的公差进行分析。内部各器件的公差分析是为了尽可能得到标准的衍射球面波, 而对旋转平台的公差分析则是为了在旋转标定系统误差时得到可信的数据。

4.1 WRS 内部器件公差分析

微孔点衍射球面波质量主要和光束的聚焦质量以及小孔的对准质量有关。聚焦光束是由光纤衍射的球面波经过光纤准直镜准直后再经聚焦物镜聚焦获得, 因此聚焦光束质量主要与两个镜头有关。采用纤芯直径为 $3.5 \mu\text{m}$ 的光纤, 可由标量瑞利-索末菲衍射积分公式得光纤衍射的远场分布, 根据前期分析结果, 衍射波前在 0.2 的数值孔径内波前偏差达到 $10^{-6} \lambda$ RMS, 满足球面波要求, 因此光纤准直镜头的可用 NA 应该小于 0.2。聚焦光斑的大小直接决定了微孔是否能够有效滤除球面波的像差, 研究表明: 当聚焦光斑直径大于 2 倍微孔直径时, 微孔才能有效滤除光束中所携带的像差, 对于 800 nm 的微孔, 聚焦光束艾利斑直径大小为: $1.22\lambda / NA > 800 \times 2 \text{ nm}$ 得到聚焦物镜 $NA < 0.4$ 。

小孔的对准质量主要取决于聚焦物镜下面的三维调整台精度, 光斑的对准精度取决于漂移量

和离焦量,对小孔衍射的 FDTD 分析表明:微孔的漂移量不大于 125 nm,离焦不大于 175 nm 时,在 0.6 的数值孔径内衍射非对称偏差不大于 $8.85 \times 10^{-5} \lambda$,满足检测要求。聚焦镜头下面的三轴调整台的精度决定了漂移量和离焦的大小:XY 方向精度应小于 125 nm,Z 方向精度应该小于 175 nm。

4.2 旋转平台公差分析

WRS 系统误差的标定对于实现高精度的波像差检测至关重要,在标定系统误差的过程中采用旋转平台,因此需要对旋转平台的角度公差、跳

径公差和摆角公差进行计算以保证标定精度。

旋转平台的角度公差:标定算法中旋转平台每次需要旋转 90° ,由于旋转平台精度所限,每次旋转角度会在 90° 左右浮动,在旋转非对称误差的标定时会导致 90° 非对称项取平均后并不为 0,得到的结果并不是旋转非对称误差,从而对标定结果产生影响。下面用模拟标定的方法得到旋转平台的旋转角度公差:实验测得的物镜波像差为 6.903 4 nm RMS,模拟标定结果图 7 所示(横纵坐标均为归一化坐标)。

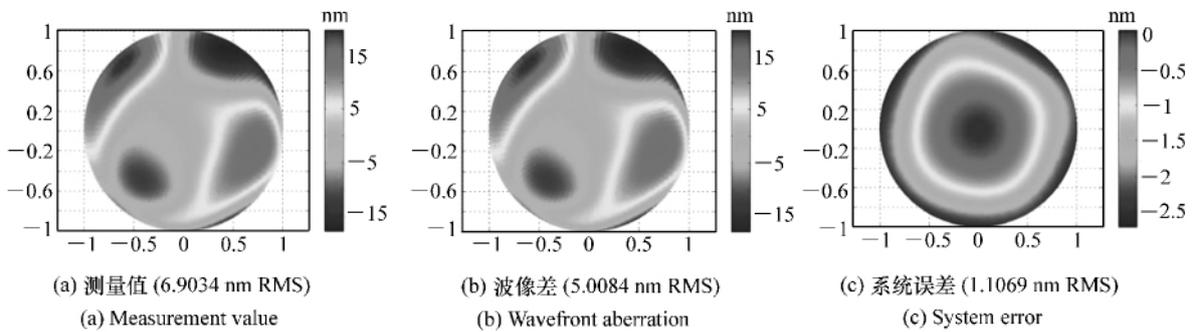


图 7 模拟标定结果

Fig. 7 Simulation for system error calibration

旋转角度公差和旋转平台的角度分辨率在数值上具有相等关系,公差为 1° 时 50 次模拟,误差分布如图 8 所示。

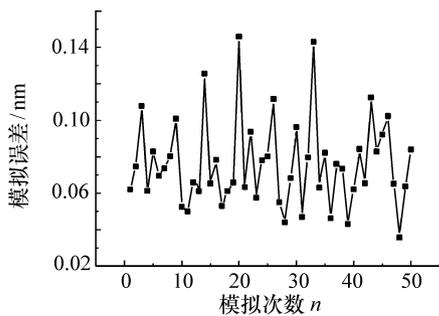


图 8 旋转角度公差为 1 度时标定误差

Fig. 8 Calibration error when rotation angle tolerance is 1°

公差为 0.5° 时 50 次模拟,误差分布如图 9 所示。

对模拟标定,标定误差应小于系统误差的

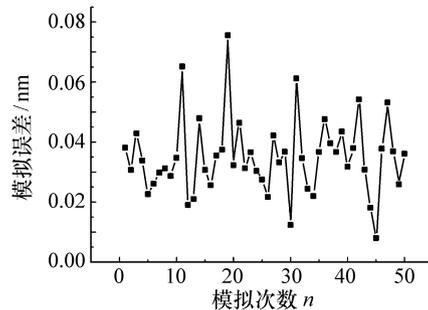


图 9 旋转角度公差为 0.5 度时标定误差

Fig. 9 Calibration error when rotation angle tolerance is 0.5°

10% (0.110 69 nm RMS),对于 1 度角度分辨率,见图 9 标定误差超过系统误差的 10%,而 0.5° 分辨率的旋转平台满足标定要求。因此当旋转角度公差在 0.5° 时对标定结果的影响在可以接受的范围内。

旋转平台的跳径公差:旋转平台在旋转过程

中, 旋转轴和光轴不重合, 即出现跳径, 同样会对标定结果产生影响。跳径大小以转轴偏离的距离相对旋转半径的比例即偏离系数来表示。

跳径时模拟误差随偏离系数变化如图 10 所示, 图中虚线表示模拟误差为系统误差 10% 的位置对应的偏离系数为 0.5%, 所以当偏离系数小于 0.5% 时, 模拟标定误差小于系统误差 10% 即小于 0.110 69 nm RMS。

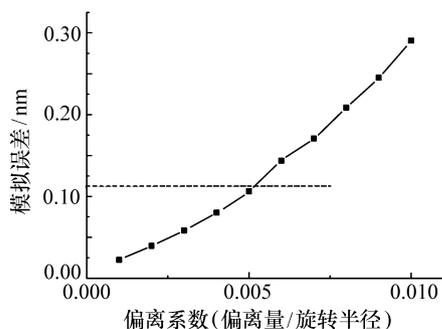


图 10 跳径时的标定误差

Fig. 10 Calibration error when the rotation axis is away from optical axis

旋转平台的摆角公差: 旋转平台在转动时, 转轴会有一定的摆动, 实际转轴相对于理想转轴的夹角称为摆角, 摆角的大小对系统误差标定的影响主要表现在提取数据的圆平面上转轴偏离圆心的距离, 相当于跳径引起的误差, 对于检测 NA 为 0.3 的系统, 根据偏离系数 0.5%, 计算出的摆角公差为 0.090° 。

5 WRS 原理光路

在对 WRS 误差和公差分析后构建了原理光路, 如图 11 所示。

前置光路的光束经过光纤导入到 WRS 光路中, 双层密度盘、五棱镜及功率计配合进行偏振控

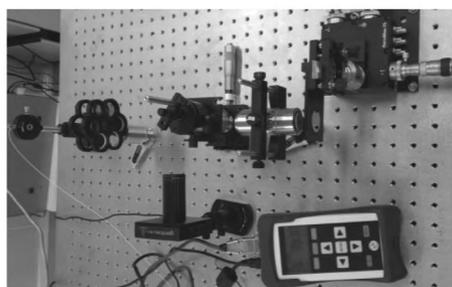


图 11 WRS 实物图

Fig. 11 True picture of WRS

制, 经过聚焦物镜聚焦, 最后在小孔上衍射。现已完成小孔对准, 得到了能量较强的球面波, 与光纤衍射相比, 球面波 NA 明显得到提高, 并验证了方法的可行性。由于直接评定此球面波的质量有一定难度, 下一步将利用此球面波完成波像差检测实验从而验证此球面波质量。

6 结论

在双光纤点衍射干涉仪中加入 WRS, 从而在保持光纤点衍射干涉仪优点的同时可以满足对大 NA 极紫外投影物镜系统波像差的检测。在对 WRS 所需实现功能进行分析基础上, 设计出了 WRS 原理装置; 对带有 WRS 的点衍射干涉仪误差进行分析, 提出解决三大误差的方法; 在以上基础上对构造 WRS 的器件进行公差分析, 得到主要光学元件的参数, 在此基础上构建了 WRS 光路, 得到能量较高的球面波; 重点对旋转平台这一影响系统误差标定精度的器件进行了公差分析, 得到其角度旋转公差不大于 0.5° , 转轴偏离系数应小于 0.5%, 摆角公差为 0.090° , 此时转台对标定结果的影响在可以接受的范围内, 为下一步实现标定系统误差打下理论基础。

参考文献:

- [1] OTAKIK, YAMAMOTOT. Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, 20(1): 295-300.
- [2] SOMMARGRENG E, PHILLIOND W, JOHNM A, et al. . 100-picometer interferometry for EUVL [J]. *SPIE*, 2002, 4688: 316.
- [3] TAYLORJ S, SOMMARGRENG E, SWEENEYD W, et al. . The fabrication and testing of optics for EUV projection lithog-

- raphy [J]. *SPIE*, 1998, 3331: 580-590.
- [4] TAKEUCHI S, KAKUCHI O, YAMAZOEK, *et al.*. Visible light point-diffraction interferometer for testing of EUVL optics [J]. *SPIE*, 2006: 61510E-1-8.
- [5] SMARTT R N, STRONG J. Point diffraction interferometer [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1974, 62: 737-742.
- [6] SOMMARGREN G E. Diffraction methods raise interferometer accuracy [J]. *Laser Focus World*, 1996, 32(8): 61-66.
- [7] 刘国淦, 张学军, 王权陡, 等. 光纤点衍射干涉仪技术研究 [J]. *光学精密工程* 2001 9(2): 142-145.
LIU G G ZHANG X J, WANG Q D *et al.*. Fiber point diffraction [J]. *Opt. Precision Eng.* 2001 9(2): 142-145. (in Chinese)
- [8] 张宇. 极紫外光刻物镜系统波像差检测技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 2012.
ZHANG Y. Research of measuring technology for wavefront aberration of EUVL objective system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences 2012. (in Chinese)
- [9] JOHNSONM A, PHILLIOND W, SOMMARGRENG E *et al.*. Construction and testing of wavefront reference sources for interferometry of ultra-precise imaging systems [J]. *SPIE* 2005 5869: 156.
- [10] 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* 2012 30(10): 2849-2854.
LU Z X, JIN CH SH, ZHANG L CH *et al.*. Wavefront quality analysis of three-dimension pinhole vector diffractive in extreme ultraviolet region [J]. *Acta Optica Sinica* 2012 30(10): 2849-2854. (in Chinese)
- [11] 师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术 [J]. *中国光学* 2014 7(1): 26-46.
SHI T, YANG YY, ZHANG L *et al.*. Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics* 2014 7(1): 26-46. (in Chinese)
- [12] PHILLION D W, SOMMARGRENG E. Calibration of symmetric and non-symmetric errors for interferometry of ultra-precise imaging systems [J]. *SPIE* 2005 58690R-1-12.
- [13] 于杰. 用于相移点衍射干涉仪的加权最小二乘相位提取算法 [J]. *中国光学* 2010 3(6): 605-615.
YU J. Weighted least square phase extraction algorithm for phase-shifting diffraction interferometer [J]. *Chinese Optics*, 2010 3(6): 605-615. (in Chinese)

作者简介:



代晓珂(1989—),男,河南南阳人,硕士研究生,2012年于西北工业大学获得学士学位,主要从事光学检测方面的研究。
E-mail: daixk1989@163.com



于杰(1984—),男,湖南岳阳人,助理研究员,2007年、2009年于北京理工大学分别获得学士和硕士学位,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: yujie98@gmail.com



金春水(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获得学士学位,1990年、2003年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事短波光学技术方面的研究。E-mail: jincs@sklao.ac.cn