

点衍射干涉仪系统误差标定

许嘉俊^{1,2} 邢廷文¹ 徐富超¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所应用光学实验室, 四川 成都 610209)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 点衍射干涉仪是现代超高精度面形测量中常用干涉仪,其参考波由一定尺寸针孔衍射产生,因此摆脱了参考元件面形误差对测量精度的限制,使纳米及纳米级以下精度测量成为可能。点衍射干涉仪由于其结构特点,主要的系统误差来源于针孔衍射波与理想球面波的偏差。设计了一种新的点衍射干涉仪系统误差标定结构,降低了对准难度。同时提出了利用干涉图信息计算 CCD 位置,去除几何结构慧差的方法。搭建了基于双孔干涉的系统误差标定系统,在针孔直径为 3 μm 时,系统误差为 0.009 λ 。

关键词 测量;光学检测;点衍射干涉仪;双孔干涉;误差标定

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0712003

Calibration of the System Errors in Pinhole Diffracted Interferometer

Xu Jiajun^{1,2} Xing Tingwen¹ Xu Fuchao¹

(¹ Laboratory of Applied Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The point diffraction interferometer is a common instrument used in modern ultra-precision surface testing. It can be used in the sub-nanometer measurement because its reference wave is produced by pinhole diffraction instead of optic surface, which dramatically limits the measurement accuracy. A new calibration system, which can reduce the alignment difficulty and a new method that takes advantage of the background intensity of the interferogram to locate the CCD sensor have been proposed. The experimental result indicates that the system error is 0.009 λ , when the pinhole has a diameter of 3 μm .

Key words measurement; optical testing; point diffraction interferometer; two-hole interference; error calibration

OCIS codes 120.3180; 220.4840; 260.3160

1 引言

干涉仪是光学加工过程中面形检测必不可少的仪器设备,随着现代光学系统的高速发展,其检测精度遭遇到了前所未有的挑战。例如,极紫外波段(工作波长 $\lambda=13.4\text{ nm}$)投影光刻物镜,为了达到良好的成像效果,系统像差均方根(RMS)值应该在 $\lambda/14$ (0.95 nm)以下^[1-2]。如果是最简单的两镜系统,如 Schwarzschild 物镜结构^[3],每一个反射镜的面形误差 RMS 值应该小于 0.33nm(假设反射面缺陷引

入系统像差互不相关)。如此高的检测精度,常规的斐索干涉仪和泰曼-格林干涉仪^[4],因为需要参考元件作为基准,很难做到。而点衍射干涉仪^[5-7]采用针孔衍射波作为参考波,摆脱了参考元件的限制,能够达到这一要求。

点衍射干涉仪由于其结构特点,主要的系统误差来源于针孔衍射波与理想球面波的偏差^[8-11]。标定这一误差的方法,可以分为两类:一类通过绝对测量的方法,分别将旋转对称的系统误差和非旋转

收稿日期: 2013-01-22; 收到修改稿日期: 2013-03-12

作者简介: 许嘉俊(1986—),男,博士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: frog_0123@hotmail.com

导师简介: 邢廷文(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学系统、光学仪器等方面的研究。

E-mail: xingtww@ioe.ac.cn

对称的系统误差从测量结果中剥离^[12-14]。这类方法能够通过多次测量,同时得到被测件面形和系统误差,但其测量方式对系统结构有很大的依赖,通常是不同的结构需要不同的测量方法;另一类采用直接测量的方法,将两个衍射波进行干涉,再解出带误差的波前^[15-16]。本文建立的标定系统,正是基于第二类方法,采用双孔干涉的原理,标定系统误差。

2 点衍射干涉仪检测面形的基本结构

点衍射干涉仪检测面形的基本结构^[17]如图 1 所示。聚焦透镜将平行光聚焦入射到针孔中心,其衍射波面一部分通过被测件反射,携带被测件信息,聚焦到针孔附近,再通过金属膜反射,从而与另一部分的衍射波面重合,通过成像透镜,在 CCD 上形成干涉图像。被测件与压电陶瓷驱动器(PZT)相连,

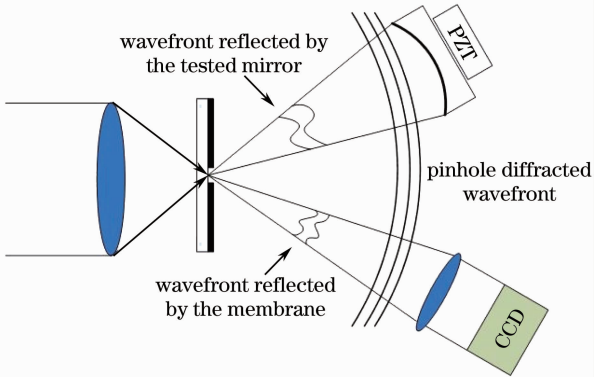


图 1 点衍射干涉仪检测面形的基本结构

Fig.1 Sketch of the point diffraction interferometer

通过移相方法,解出干涉条纹,就能得到被测件的面形信息。

如果衍射波面与理想球面波完全一致,则解出的面形应该和被测件面形一致。但在实际测量系统中,由于入射波带有像差、针孔的有限孔径和加工误差^[10],衍射波面总是与理想球面波存在一定偏差,这部分偏差将会被带入求解面形中,引入系统误差,降低测量精度。

3 系统误差标定系统

图 2 是现有的两种通过波面干涉标定系统误差的结构原理图。图 2(a)中采用光纤 F1、F2 取代针孔,降低了对准难度,但受限于纤芯尺寸^[15]。图 2(b)中采用光栅分光,针孔衍射,但两个聚焦斑同时对准,难度较大^[16]。本文在这两种结构的基础上,建立一种新的衍射标定系统结构,如图 3 所示。单纵模激光器发出的相干光束经过 S1 准直扩束系统后,被分光棱镜分为两部分。一部分经过反射镜 M1 反射,入射到聚光镜 L1,被聚焦到衍射模板上的针孔 A (见图 3 针孔衍射标定模板示意图),产生衍射波面 1,如图 2 中实线所示。另外一路光束,经过略微倾斜的反射镜 M2 反射,被聚光镜 L1 聚焦到衍射模板上的针孔 B,产生衍射波面 2(图 2 中虚线所示)。反射镜 M1 与 PZT 相连,通过移相方法处理 CCD 上采集到的干涉条纹,就能解出衍射波面形。M2 与转台相连,能够通过偏转,独立调节光斑位置,避免两个光斑同时对准。

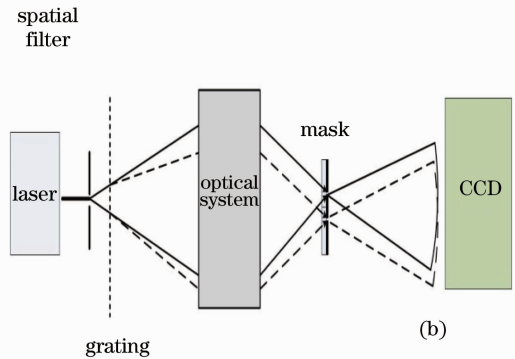
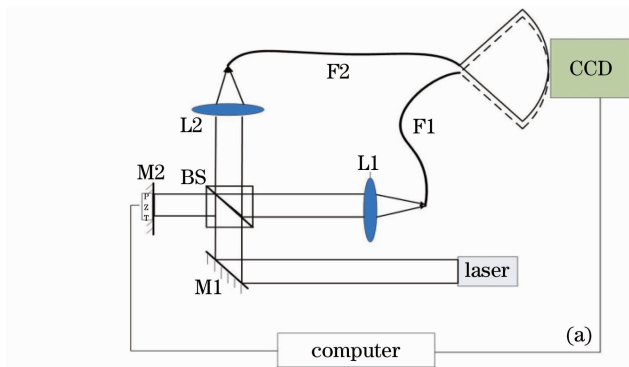


图 2 衍射误差测量系统。(a)光纤结构;(b)光栅结构

Fig.2 Measurement systems of the diffracted wave. (a) With fiber; (b) with grating

针孔衍射标定模板示意图如图 4 所示。模板尺寸为 30 mm×30 mm,上有两个衍射孔和两个定位孔,关于中心线左右对称分布。定位孔直径在 20~50 μm,相隔距离 L,便于系统预对准。针孔 A 和 B 直径相同,为 3 μm,相隔距离 S,用于产生衍射波,

形成干涉。

按图 5 建立全局坐标,由于模板上两个针孔并未重合,沿 x 轴方向偏离,到 CCD 上任一点 P 的距离不同($\Delta r = r_1 - r_2$),将导致几何慧差,其拟合 Zernike 多项式系数大小为^[3,16]

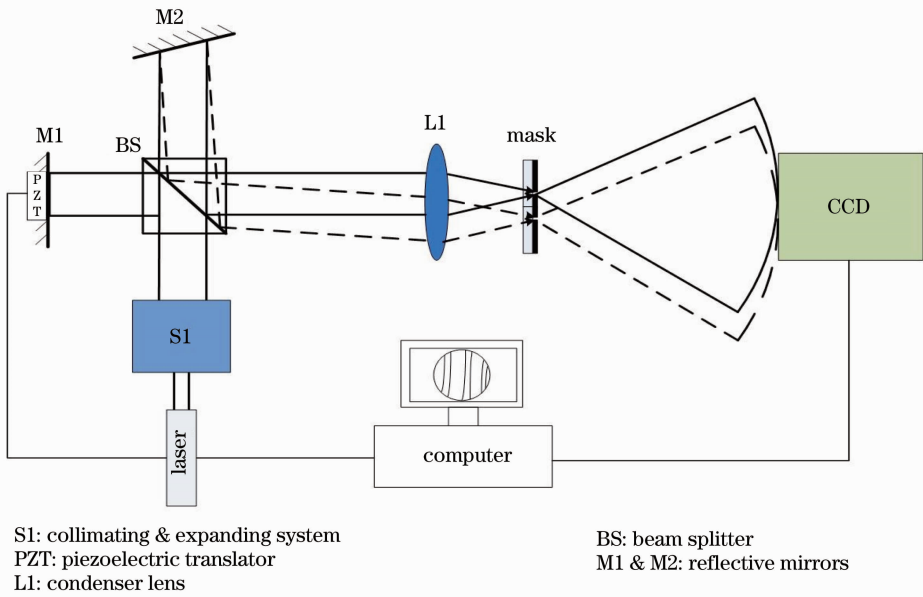


图 3 点衍射干涉仪系统误差标定系统基本结构

Fig. 3 Sketch of the calibration system based on two-hole interference

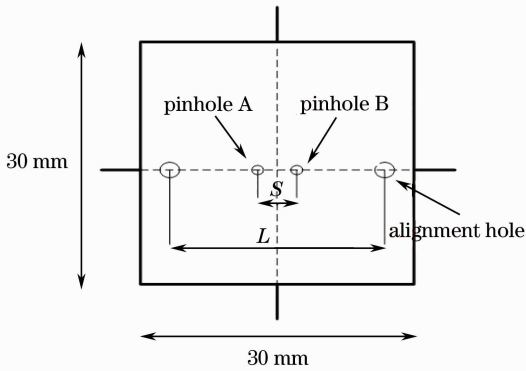


图 4 系统误差标定系统模板

Fig. 4 Mask of the calibration system

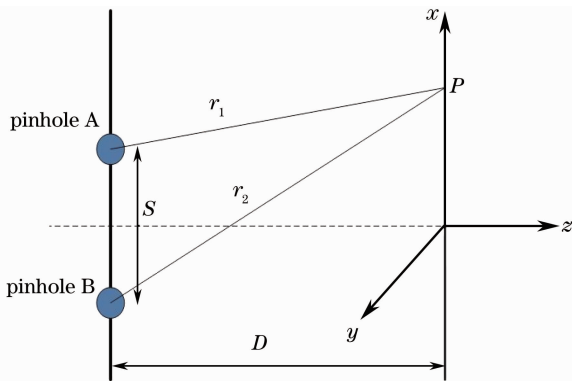


图 5 几何结构引入慧差

Fig. 5 Measurement geometry leading to systematic coma

$$C_{\text{coma}} = \frac{S}{6} \left(\frac{r_{\text{max}}}{D} \right)^3, \quad (1)$$

式中 S 为两个针孔间的距离, r_{max} 是衍射波面在 CCD

上成像区域的最大线尺度, D 为 CCD 到模板的距离。实际测量时, 可根据 S, D 和 CCD 面上每一个点的 Δr , 计算出几何慧差大小, 将其从测量结果中减除。

4 实验数据与分析

4.1 单次测量结果

搭建的实验系统, 采用 532 nm 波长的单纵模激光器作为光源, 针孔尺寸为 $3 \mu\text{m}$, 相隔距离 1 mm, 膜层材料为铬, 厚度为 100 nm。CCD 相机靶面尺寸为 $2/3''$, 像素大小为 $6.45 \mu\text{m}$, 分辨率为 $1390 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$ 。采集到的干涉条纹如图 6 所示, 近乎直线的条纹形状说明了误差较小的衍射波面, 而光强的不均匀性是由于 CCD 偏离两个针孔中心(图 5 中 z 轴与针孔连线的交点)以模拟被件的真实位置。在满足良好信噪比的情况下, 利用移相方法解条纹,

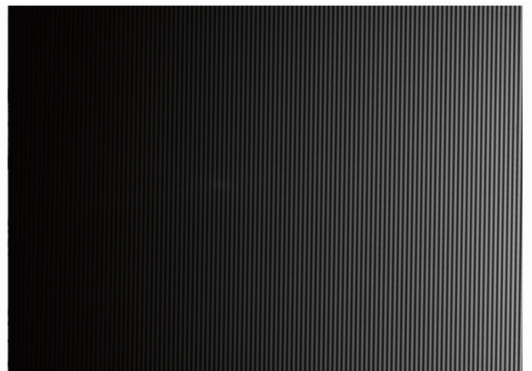


图 6 误差标定系统产生的干涉图

Fig. 6 Interferogram of the calibration system

不均匀性带来的影响将会被消除^[4]。通过五步移相法求解相位,再用 Zernike 多项式拟合,去掉前 4 项之后,重建得到的相位图如图 7 所示,峰谷(PV)值为 0.24λ ,RMS 值为 0.023λ 。但是此相位图中含有几何慧差,需要将其去除。

4.2 几何慧差去除

如上所述,计算几何慧差,需要知道针孔间隔 S ,CCD 到衍射模板距离 D 和 CCD 面上每一点的坐标值。 S 在加工时确定, D 可以利用杨氏双缝干涉原理,由 CCD 上条纹间隔算出。为了得到 CCD 面上每一点的坐标值,提出了一种利用背景光强对其求解的算法。基本思想为当 $S \ll D$ 时,针孔衍射波光强分布可近似看作旋转对称于光轴(图 5 中 z 轴),所以 CCD 纪录的光强等值线应该是一系列同心圆,其圆心位置是光轴与 CCD 所在平面的交点。

图 8(a)为经过低通高斯滤波去掉条纹后的背景光强图,红色虚线为其中一条光强等值线;图 8(b)为(a)中等值线及其拟合圆曲线(逆时针旋转了 90°)。

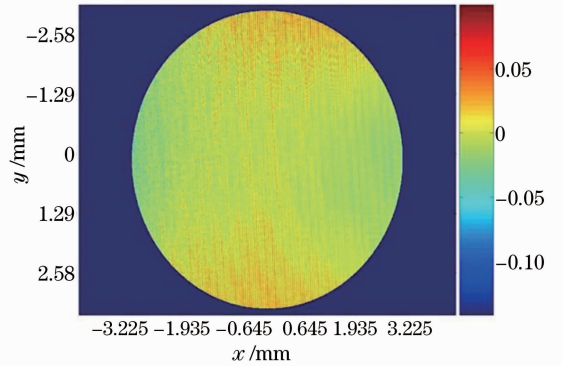


图 7 单次测量结果(单位: λ)

Fig. 7 Wavefront map reconstructed from a single measurement (unit: λ)

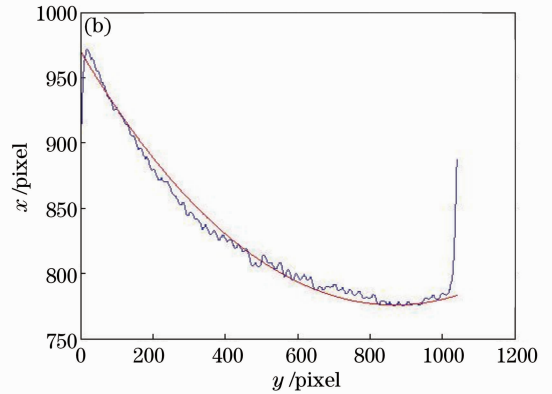
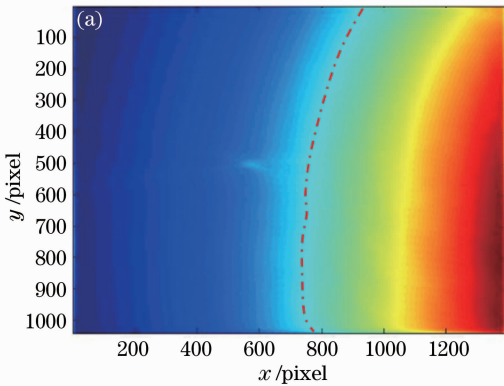


图 8 (a)背景光强图; (b)等值线及其拟合曲线

Fig. 8 (a) Background intensity; (b) contour line & fitted curve

以像素为基本单位,CCD 上(0,0)点为坐标原点,建立本地坐标系。拟合圆方程的半径为 2038,圆心坐标为(2814,869)。CCD 中心点坐标(696,520),像素尺寸大小为 $6.45 \mu\text{m}$,因此 CCD 中心在全局坐标系(见图 5)中,与系统光轴 x 方向偏离 13.661 mm , y 方向偏离 2.251 mm 处。由此,CCD 上每一个点的坐标即可确定,并计算出几何慧差大小。

4.3 多次测量结果分析

利用 4.2 节中的方法去掉几何慧差后,图 9 为 48 次测量的 RMS 值变化,均值为 0.014λ ,48 次测量结果的变化范围为 0.01λ 。图 10 为两次相邻测量的差值,体现出两组周期性条纹,与干涉条纹方向不同,周期较大的一组条纹,是由于部分杂散光所引起,需要对系统结构进行改进。另一组条纹主要来源于振动、空气扰动等环境因素,可以通过多次测量平均的方法,减小其影响。经过 48 次平均后,RMS

值为 0.009λ ,其相位图如图 11 所示。平均后的测量值与单次测量相比,下降了 1 个数量级,可以认为点衍射干涉仪系统误差大小。

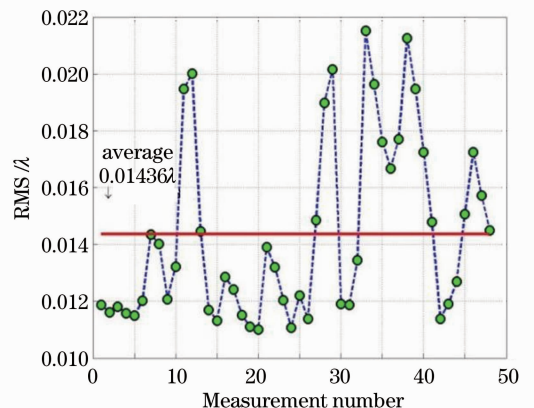


图 9 48 次测量 RMS 值

Fig. 9 RMS of the 48 measurements

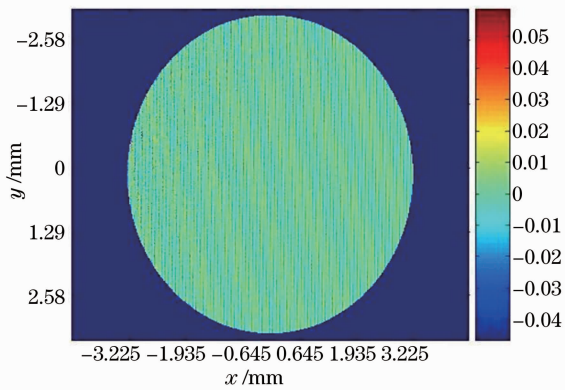


图 10 相邻测量之间的差值相位图

Fig. 10 Difference between two measurements

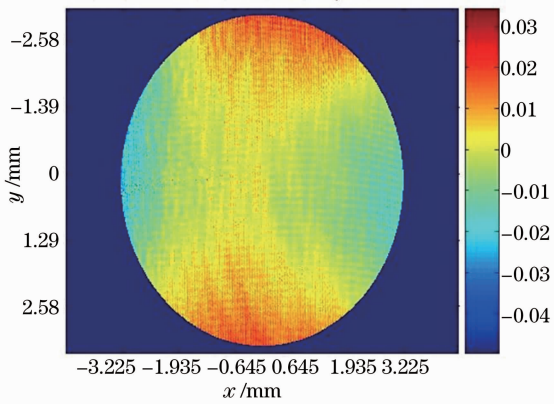


图 11 经过 48 次平均后的相位图

Fig. 11 Average result of 48 measurements in Fig. 9

另外,点衍射干涉仪中只使用单个针孔。在这种标定结构中,两个针孔直径和形状的差异将影响干涉结果。随着直径的减小,针孔形状控制的难度也将增大。但值得庆幸的是,针孔直径减小以后,形状误差带来的衍射波前变化也随之减小,这在相关的仿真计算中得到了验证^[10]。同时,在模板加工上,对两个针孔形状差异严格控制,也能够减小这一影响。

5 结 论

设计了一种基于反射镜分光,结合双孔衍射模板的点衍射干涉仪系统误差标定结构,并利用 CCD 面上背景光强计算 CCD 位置信息,从而去除几何结构误差。实验结果表明,在针孔尺寸为 $3 \mu\text{m}$ 时,通过 48 次平均,有效去除振动等环境影响因素后,系统误差大小为 0.009λ 。这为点衍射干涉仪测量精度的分析提供了实验基础。

参 考 文 献

1 G E Sommargren, D W Phillion, M A Johnson, *et al.*. 100-picometer interferometry for EUVL [C]. SPIE, 2002, 4688;

316–328.
 2 Sugisaki Katsumi, Zhu Yucong. Present status of the ASET at-wavelength phase-shifting point diffraction interferometer [C]. SPIE, 2000, 4146: 47–53.
 3 Patrick Naulleau, Kenneth Goldberg, Sang Lee, *et al.*. Characterization of the accuracy of EUV phase-shifting point diffraction interferometry [C]. SPIE, 1998, 3331: 114–122.
 4 Daniel Malacara. Optical Shop Testing [M]. 3rd edition, Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2007. 19–54.
 5 Sang Hun Lee, Patrick P Naulleau, Kenneth A Goldberg, *et al.*. Phase shifting point diffraction interferometry at 193 nm [J]. Appl Opt, 2000, 39(31): 5768–5772.
 6 Patrick P Naulleau, Kenneth A Goldberg. Dual-domain point diffraction interferometer [J]. Appl Opt, 1999, 38(16): 3523–3532.
 7 Zhou Wanzhi, Lu Zhenwu. A point-diffraction holographic interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 1986, 6(12): 1130–1135.
 周万治, 卢振武. 点衍射全息干涉仪 [J]. 光学学报, 1986, 6(12): 1130–1135.
 8 Xing Tingwen, He Guoliang, Shu Liang. Measurement error in the 193 nm phase-shifting point diffraction interferometer [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(2): 67–72.
 邢廷文, 何国良, 舒亮. 193 nm 移相点衍射干涉仪的测量误差分析 [J]. 光电工程, 2009, 36(2): 67–72.
 9 K A Goldberg, E Tejnil, J Bokor. A 3D numerical study of pinhole diffraction to predict the accuracy of EUV point diffraction interferometry [C]. Boston: Proceedings of Extreme Ultraviolet Litho Graphyy, 1996. 133–137.
 10 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.
 11 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.
 12 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.
 13 Donald W Phillion, Gary E Sommargren, Michael A Johnson, *et al.*. Calibration of symmetric and non-symmetric errors for interferometry of ultra-precise imaging systems [C]. SPIE, 2005, 5869: 58690R.
 14 Zhang Yu, Jin Chunshui, Ma Dongmei, *et al.*. Study of calibrating algorithm for wavefront reference source of point diffraction interferometer [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0308001.
 张宇, 金春水, 马冬梅, 等. 点衍射干涉仪波前参考源标定算法的研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0308001.
 15 Toshiaki Matsuura, Satoru Okagaki, Takaaki Nakamura, *et al.*. Measurement accuracy in phase-shifting point diffraction interferometer with two optical fibers [J]. Opt Rev, 2007, 14(6): 401–405.
 16 Patrick Naulleau, Kenneth A Goldberg, Sang H. Lee, *et al.*. Extreme-ultraviolet phase-shifting point-diffraction interferometer a wave-front metrology tool with sub-angstrom reference-wave accuracy [J]. Appl Opt, 1999, 38(35): 7252–7263.
 17 Kazuya Ota, Takahiro Yamamoto, Yusuke Fukuda, *et al.*. Advanced point diffraction interferometer for EUV aspherical mirrors [C]. SPIE, 2001, 4343: 543–550.