

文章编号 1004-924X(2010)11-2390-08

## 点衍射波前位相的测评

马冬梅<sup>1</sup>, 陈土泉<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**提出一种检测点衍射干涉仪关键部件针孔所产生的衍射光学波前的方法。介绍了点衍射波前的产生原理,分析了小孔质量状态、照明光路调整状态与波前各个像差分量之间的关系。基于信息光学基础理论,采用傅里叶变换和迭代算法,采集针孔衍射图像并进行计算分析,实现对衍射波前的位相复原以获得波前信息。阐述了测试方法的理论依据和计算公式,应用研制的位相复原分析软件测试并分析了实际采集的点衍射图像,通过 15 次的迭代,输出的位相值逐渐收敛,图像误差因子下降到 0.12。目前,该方法已用于对针孔的筛选和针孔照明系统的装调中,实验结果证明了该测试方法的可行性。

**关键词:**点衍射;波相差;傅里叶变换;位相复原;迭代算法

**中图分类号:** O436.1; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101811.2390

## Test and evaluation of wavefront phase of point diffraction

MA Dong-mei<sup>1</sup>, CHEN Tu-quan<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physic,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** A testing method was proposed for the diffraction wavefront produced by a pinhole mounted in a point-diffraction interferometer. The producing principle of the point diffraction wavefront was presented, and the relation among the pinhole states, illumination adjustment and the wavefront aberration was analyzed. On the basis of the fundamental theory of information optics, the Fourier transform and an iterative algorithm were used to calculate and analyze the pinhole diffuse image, retrieve the phase of diffraction wavefront and then to obtain the wavefront information. The related theory was discussed and the measured point diffraction image was analyzed through a computing software of phase retrieval. Results indicate that the output phase tends to a convergence after about 15 iterations, and the image error factor has dropped to 0.12. The testing method has been applied to the selection of pinholes and the assembly of pinhole illumination systems, and experimental results prove that the testing method is valid.

**Key words:** point diffraction; wavefront phase; Fourier transform; phase retrieval; iterative algorithm

收稿日期:2010-07-01;修订日期:2010-08-06.

基金项目:中科院长春光学精密机械与物理研究所创新基金资助项目

## 1 引言

点衍射干涉仪在光刻设备研制中主要用于对光刻镜头的光学元件与光学系统的波相差进行高精度测试<sup>[1-4]</sup>。传统的干涉仪多使用基准参考球面产生干涉来测试所用的参考波面,因此其精度往往受限于参考球面误差,而点衍射干涉仪是直接使用针孔衍射产生理想的球面波实现波相差高精度测量的。

点衍射干涉仪中的关键部件针孔通过光源照明来产生衍射球面波,并作为测量基准光学波面。由于要求针孔直径极小( $\leq 1.0 \mu\text{m}$ ),因此加工很困难,对其的质量检测也是难点。针孔的圆度、边缘锐度和厚度等都会影响衍射球面光波的波前位相,同时,点衍射干涉仪中的照明光源也要严格对准针孔才可产生无相差球面波;否则,即使针孔达到加工要求,也将由于照明对准误差引入多种波相差并降低能量。因此,对针孔的质量测评和装调效果评估是点衍射干涉仪研制过程中的重要内容之一。

本文提出了一种检测点衍射干涉仪关键部件针孔所产生的衍射波前的方法。该方法采用显微镜会聚照明针孔得到衍射图像,通过位相复原算法恢复波前拟合出像差。测试方法装置简单,受外界因素影响较小,容易实现。

## 2 针孔波前的产生

点衍射干涉仪的基本工作原理如图 1。会聚照明光源照射薄板上的针孔,入射光波经过针孔发生衍射,产生球面光波。其中一部份作为基准参考光波,另一部份作为测试光波入射到被测试反射镜上后返回,经针孔板表面反射与基准参考波面发生干涉,产生干涉图,从而实现光学元件波面相差的高精度测试。因此,可通过对针孔衍射波前的直接测试了解针孔衍射情况,以实现针孔质量的测评和照明系统安装状态的确认。

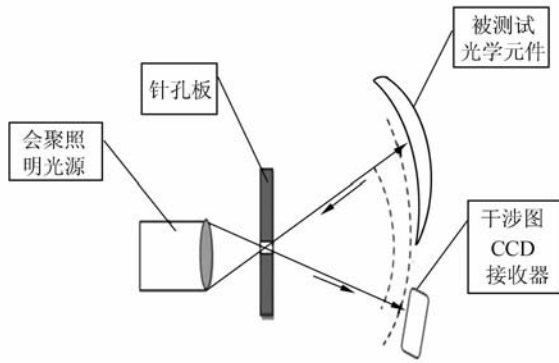


图 1 点衍射干涉仪工作原理图示

Fig. 1 Principle of point-diffraction interferometer

## 3 波前测试计算原理及算法

针孔衍射图像的光强分布形式可认为是点扩散函数(Point Spread Function, PSF)形式,因此,可以基于信息光学理论,采用傅里叶变换和迭代算法通过对针孔衍射图像的采集和计算分析,实现对衍射波前的位相复原以获得针孔衍射波前信息<sup>[5-7]</sup>。

本文的针孔衍射波前测试原理是根据信息光学理论,用光学系统光瞳函数和光强 PSF 之间的数学关系实现由针孔衍射图像的光强分布 PSF 到光瞳函数的复原,从而获得位相信息(波前)。光瞳函数的一次傅里叶变换可获得振幅点扩散函数(Amplitude Spread Function, ASF);从 ASF 可获得光强 PSF。因此,基于位相复原技术,通过获得光强 PSF 即针孔衍射图像,经过对衍射图像的采集、处理与计算来得到针孔衍射的波前位相信息。

图 2 为针孔衍射波前测试原理图。由照明光源产生的会聚光束照射针孔板上的小孔,由小孔衍射产生的波面经过显微物镜成像形成衍射图像。由于针孔直径极小,要观察与采集到衍射图像需要采用高放大倍率、成像质量良好的光学系统并配有信噪比高的 CCD 图像采集装置。

图 3 为显微镜出瞳到像面的光场传播示意图。出瞳的直径为  $D$ ,出瞳中心到像面中心的距离为  $L$ 。理想情况下,出瞳波面为一标准的球面波,由于光波的衍射效应,出瞳波面在焦面上形成

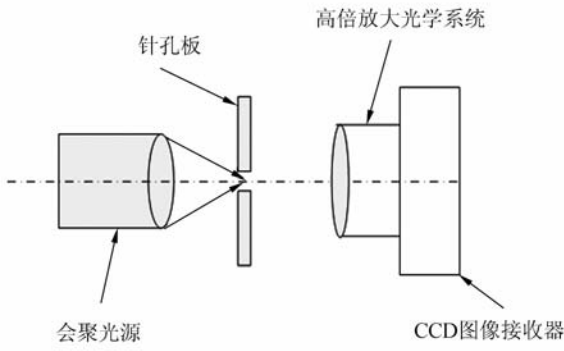


图 2 针孔衍射波前测试原理图

Fig. 2 Principle of pinhole wavefront measurement

面上叠加一些非球面因子, 出射的波面为一不规则的曲面波, 会聚到像面上形成了与像差对应的形状各异的衍射斑。假设显微镜的数值孔径为  $NA$ , 工作波长为  $\lambda$ , 光瞳处的坐标  $(x', y')$  与焦面处的坐标  $(x, y)$  之间的换算关系为:

$$x = x' \cdot NA/\lambda, y = y' \cdot NA/\lambda .$$

光学系统的光瞳函数与 ASF 是傅里叶变换关系, 一般用如下公式表示:

$$ASF(x', y') = \iint P(x, y) \exp[-2\pi i(x x' + y y')] dx dy , \quad (1)$$

其中  $ASF(x', y')$  为振幅点扩散函数,  $P(x, y)$  为光瞳函数, 而

$$P(x, y) = A(x, y) \exp[ik W(x, y)] . \quad (2)$$

$A(x, y)$  为光瞳函数的振幅部分, 是光瞳形状函数, 在通光孔径内取 1, 通光孔径外为 0;  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $W(x, y)$  为光学系统的波像差。而

$$PSF(x', y') = |ASF(x', y')|^2 . \quad (3)$$

因此, 可以根据已知的  $PSF(x', y')$  即星点图和式(1)、(2)、(3), 采用傅里叶变换方法和迭代计算方法实现, 由:

$PSF(x', y') \rightarrow ASF(x', y') \rightarrow P(x, y) \rightarrow W(x, y)$  的数学分析与计算, 使得针孔波前得到复原。图 4 为具体的迭代流程, 算法最后输出了光瞳波面的峰谷值 (PV), 均方根误差 (RMS) 及赛德尔像差系数<sup>[8-11]</sup>。

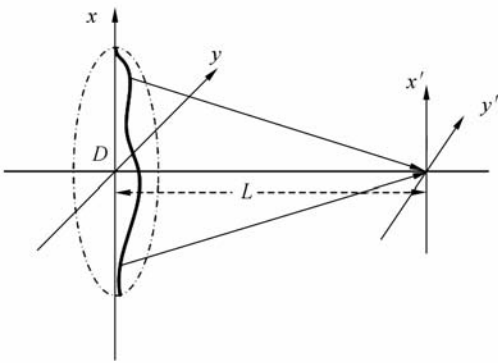


图 3 光场衍射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wave propagation

的是一个艾里斑。当存在像差时, 则等价于在球

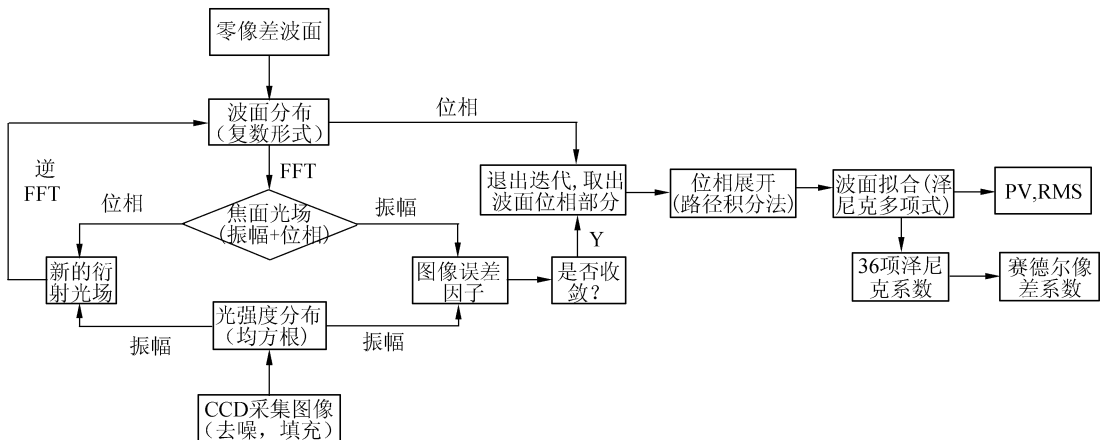


图 4 迭代算法流程

Fig. 4 Flowchart of iterative algorithm

### 4 实验研究

应用上述理论和研制的相关计算软件进行了测试实验分析。通过对带有针孔的光学平板进行目视观测挑选后,选择衍射效果明显的针孔图像进行图像采集与数据分析。图 5 为图像采集实验照片及 CCD 相机采集的衍射图样。由照明光源照射放在工作面上的小孔,由小孔衍射产生的波面经过显微物镜后在显微镜的像面形成衍射图样。

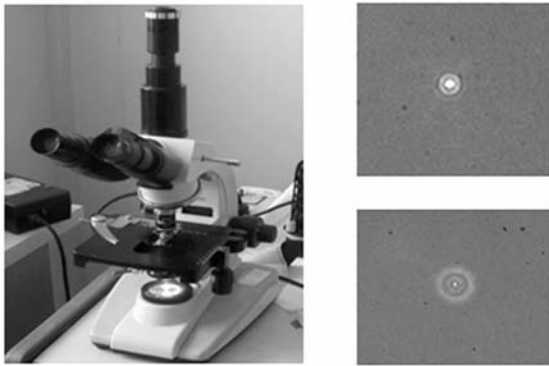


图 5 针孔衍射图像采集装置及衍射图

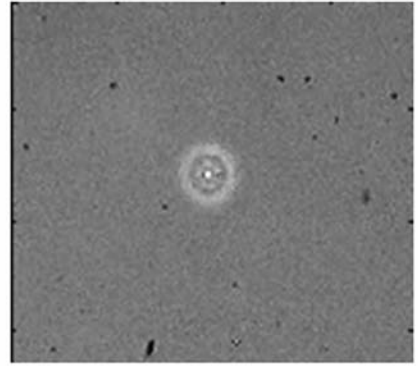
Fig. 5 Experimental mechanism of pinhole diffraction and its images

图 6 为采集到的小孔衍射图像,其中图(a)是 CCD 相机采集的原始图像,图像中带有明显的背景噪声。这是因为受小孔尺寸的限制,出射波面的衍射图像强度较弱,另外图像中的背景噪声及 CCD 的噪声也降低了图像的信噪比。因此,在数据分析计算前对图像进行了去除背景及提取中心有效图像部分的处理,图(b)为处理后的二维灰度衍射图像。

将处理后的衍射图像导入位相复原迭代算法软件中进行计算。由于位相复原的计算是一个多次循环迭代,逐渐收敛的过程,因此其收敛的速度和精度是该算法的重要性能指标。为了评价算法的计算精度和迭代的收敛性,引入衍射图像误差因子  $\epsilon$ ,

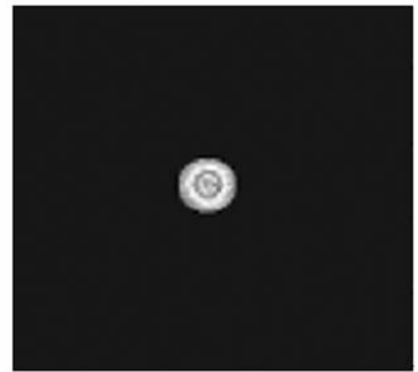
$$\epsilon = \frac{\sum |\sqrt{I_m} - \sqrt{I_2}|^2}{\sum I_m}, \quad (4)$$

式中  $I_2$  为迭代计算得到的光强度值,  $I_m$  为 CCD 测得的光强度值,其均方根值为对应的振幅<sup>[12]</sup>。每次迭代后都计算其误差因子,图 7 给出了迭代



(a)采集的衍射图像

(a) Collected diffraction image



(b)处理后的点像

(b) Point image after processing

图 6 小孔衍射图像

Fig. 6 Point diffraction images

15 次的误差因子曲线,前 5 次的误差因子快速下降,由 0.85 减少到 0.12,继续迭代误差因子的变化趋于平缓,该结果证明了算法具有良好的收敛性,适合于该类衍射图样的计算。

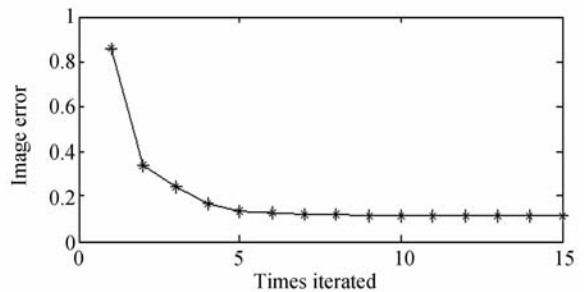


图 7 迭代误差因子

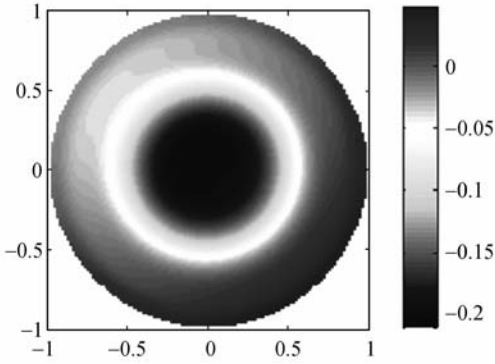
Fig. 7 Iterative error factor

根据误差因子的变化情况,在算法迭代至 30 次时终止计算,然后利用位相与波面之间的关系

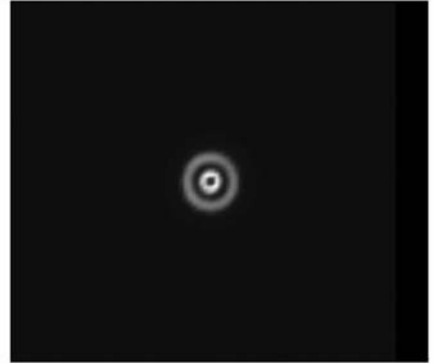
对输出的位相进行展开处理,得到的波面如图 8(a)所示,位相复原后的 PSF 图像如图 8(b)所示。

为了求出波面对应的各种像差参数,利用泽尼克多项式对波面进行拟合处理,拟合计算采用泽尼克多项式的前 36 项,并利用泽尼克多项式与赛德尔像差之间的换算关系,计算出波面的赛德

尔像差系数,见图 9 的右下角。拟合后波面的 PV 值为  $0.651\lambda$ ,均方根误差 RMS 约为  $0.160\lambda$ ,斯特列尔值为 0.364;赛德尔像差系数中离焦与球差的值偏大,分别约为  $0.516\lambda$  与  $-0.651\lambda$ ;像散与彗差的值较小,分别约为  $0.005\lambda$  和  $0.003\lambda$ ;波面倾斜量为  $0.025\lambda$ 。



(a) 复原的波面  
(a) Retrieval wavefront



(b) 复原的图像  
(b) Retrieval image

图 8 位相复原结果  
Fig. 8 Results of phase retrieval

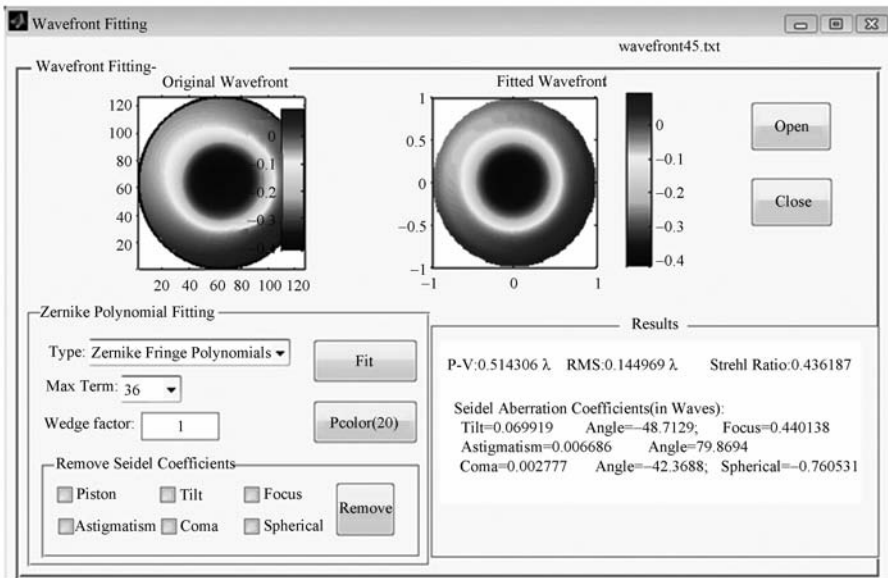


图 9 波面拟合软件界面  
Fig. 9 Program interface of wavefront fit

### 5 结果分析

小孔所产生的波前衍射波面像差与照明系统和观测系统有紧密的关系。如照明系统的像差;

小孔的大小(影响衍射光波的强度和波前质量)、圆度(衍射光波中像散的来源之一)、厚度(影响衍射光波的强度);照明系统与小孔的对准误差以及入射光波的偏振(线偏振也是衍射光波中像散的来源);小孔的离焦、漂移以及小孔反射镜的倾斜

均会对小孔衍射波前状态有较大的影响。图 10 为 3 个状态下的针孔板,第 1 个为良好状态,第 2 和第 3 个为带缺陷的状态。



图 10 小孔的不同状态

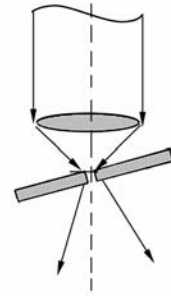
Fig. 10 Different states of the point

图 11(a)为照明光路与小孔精确对准时的示意图,图 11(b)和(c)分别为照明光路偏置状态及照明光路倾斜状态下的示意图。对这些主要情况的理论分析与状态模拟可以通过时域有限差分法来实现<sup>[13-14]</sup>。

为了进行比较,对另外一幅离焦状态不同的星点图像进行位相复原计算,如图 12 所示。

图 13 为迭代计算的误差因子变化曲线图。与前一幅图像相似,前 5 次误差因子快速下降,从 0.75 下降到 0.14,接着下降变缓,趋于收敛。

拟合后波面的 PV 值为  $0.500\lambda$ ,均方根误差 RMS 约为  $0.143\lambda$ ,斯特列尔值为 0.445;赛德尔像差系数中离焦与球差的值分别约为  $0.460\lambda$  与

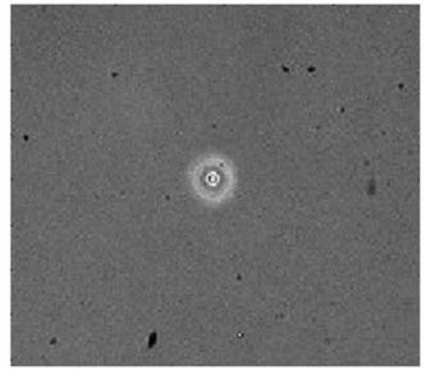


(c)照明光路倾斜

(c) Illumination slope

图 11 照明光路与小孔的对准状态

Fig. 11 Aligning states of illumination and pinhole



(a)衍射采集图像

(a) Collected diffraction image

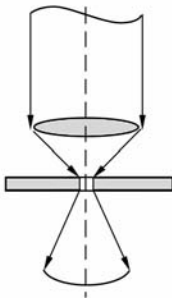


(b)处理后的点像

(b) Point image after processing

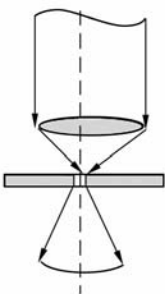
图 12 小孔衍射图像

Fig. 12 Point diffraction images



(a)精确对准

(a) Absolute alignment



(b)照明光路偏置

(b) Illumination displacement

$-0.660\lambda$ ;波面倾斜量为  $0.010\lambda$ ;像散与彗差的值较小,分别约为  $0.003\lambda$  和  $0.006\lambda$ 。

对比图 6 和图 12 的计算结果可以看出,赛德尔像差中除了离焦分量外其它的像差值都很接近;波面倾斜分量是因为迭代运算的时候衍射图

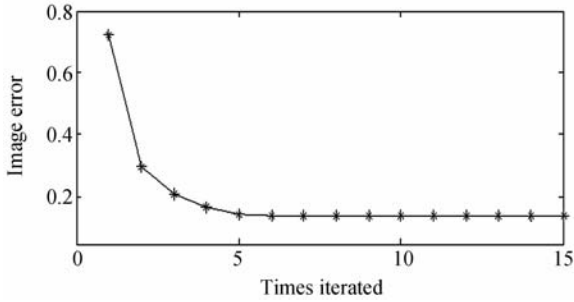


图 13 迭代误差因子

Fig. 13 Iterative error factor

像没有准确地定位到中心所引起的;像散和慧差分量则与前面所分析的小孔状态和照明光路偏置状态有关。

衍射图像除了受到小孔衍射波面影响外还受到了显微成像系统像差的影响,但由于一般测试用的显微物镜像差都得到了很好的校正,而且其像差为一固定值,所以在衍射小孔装调时可将其视为系统误差给以标定修正。

## 参考文献:

- [1] 袁琼雁,王向朝. 国际主流光刻机研发的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007,44(1):57-64.  
YUAN Q Y, WANG X Z. Recent development of international main-stream lithographic tools [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(1): 57-64. (in Chinese)
- [2] SEIJI T, OSAMU K, KENJI Y, *et al.*. Visible light point-diffraction interferometer for testing of EUVL optics[J]. *SPIE*, 2006, 6151: 61510E -1-61510E-8.
- [3] OTAKI K, YAMAMOTO T, FUKUDA Y, *et al.*. Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror[J]. *Microelectronics and Nanometer Structures*. 2002,20(1):295-300.
- [4] 刘国淦,张学军,王权陡,等. 光纤点衍射干涉仪的技术研究[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 interferometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,9(2):142-145. (in Chinese)
- [5] 韩昌元. 信息光学基础理论及其应用[M]. 长春: 长春出版社, 1989.  
HANG CH Y. *Fundamental Theoty and Applica-*

## 6 结 论

本文提出了检测点衍射干涉仪中的针孔产生衍射光学波前的方法,通过测试实验分析可以看出此测试方法在原理上是可行的,技术上是是可以实现的。由于对针孔衍射图像的采集需要通过高放大倍率的光学成像系统和图像采集与处理系统,因此,实际测试的波前是针孔衍射波前和光电信号采集系统共同作用的结果,测试需要高放大倍率的光电成像系统且具有良好的成像质量,同时对其进行测评和标定以便去除测试的影响。

目前,此方法主要用于对针孔的筛选和针孔照明系统的安装调试过程中。随着对波前测试分析方法的深入研究(图像采集方法、光学波前拟合算法等),有望在测试精度上有更大的提高,以实现针孔衍射波前的精确测量,进一步为点衍射干涉仪的研制提供技术支持。

- tion of Information Optics* [M]. Changchun: Changchun Publishing House, 1989. (in Chinese)
- [6] BRUCH H D, DAVID L A, SCOTT J S, *et al.*. Phase retrieval algorithm for JWST flight and test-bed telescope[J]. *SPIE*, 2006,6265:1-11.
- [7] 马冬梅,陈土泉,刘志祥,等. 位相复原技术在光学成像质量测评中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12):2912-2918.  
MA D M, CHEN T Q, LIU Z X, *et al.*. Application of phase retrieval technology to evaluation of optical imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(12):2912-2918.
- [8] 元波,陈洪斌,刘顺发. Zernike 多项式波面拟合的回归分析方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 396-400.  
YUAN B, CHEN H B, LIU S F. Regression analysis of wavefront fitting using Zernike polynomial [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 396-400. (in Chinese)
- [9] KERR D, KAUFMANN G H, GALIZZI G E. Unwrapping of interferometric phase-fringe maps by discrete cosine transform [J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(5):810-816.
- [10] DANIEL M. *Optical Shop Testing (Second edition)* [M]. New York: John Wiley&Sons, Inc. ,

- 1992.
- [11] 唐玉科,何小海,陶青川. 基于泽尼克多项式的显微镜点扩展函数研究[J]. 光学学报,2009,29(1):169-175.  
TANG Y K, HE X H, TAO Q C. Research on the point spread function of microscope based on the zernike polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1):169-175. (in Chinese)
- [12] FIENUP J R. Reconstruction of an object from modulus of its Fourier transform[J]. *Optics Letters*, 1978, 3(1):27-29.
- [13] OTAKI K, ZHU Y, ISHII M, *et al.*. Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL [J]. *SPIE*, 2004, 5193:182-190.
- [14] YOSHIUKI S, AKIYOSHI S, MASANOBU H, *et al.*. 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.

## 作者简介:



马冬梅(1963—),女,吉林人,研究员,博士生导师,1986年于天津大学获得学士学位,1994年、2006年于中科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,主要从事光学检测和光电成像系统性能测评等方面的研究。E-mail:dongmei\_ma2002@yahoo.com.cn



陈土泉(1984—),男,广东湛江人,硕士研究生,2008年于南京理工大学获得学士学位,主要从事光学检测和光电成像系统性能测评等方面的研究。E-mail:myctq@163.com

(本栏目编辑:严寒)

## ●下期预告

## T2 紫铜箔材 U 型弯曲变形规律

王春举,郭 斌,单德彬

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

设计了箔板 U 型弯曲试验,使用不同凹模槽宽尺寸、圆角半径的微型模具,在三思微型试验机上开展试验,分析了模具几何尺寸、箔板厚度等对箔板 U 型弯曲变形中冲头载荷、回弹以及表面质量的影响。研究表明,随着槽宽尺寸或圆角半径减小,最大冲头载荷会显著增加,且冲头载荷上升和下降速率都较大;冲头载荷减小速率快于横截面面积的减小速率,产生了明显的尺寸效应现象;圆角半径或板厚减小,导致回弹角度增大,成形件精度降低;成形件侧面出现划痕。以上研究结果对指导箔板微成形工艺设计具有重要意义。