

文章编号: 0258-7025(2010)07-1845-05

相移点衍射干涉仪的高精度对准

刘 克 李艳秋

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 相移点衍射干涉仪(PS/PDI)的绝对测量精度和重复精度都直接受干涉仪装调误差的影响,因此采用具有高灵敏度的计算机辅助装调技术进行干涉仪的高精度对准是必要的。在 PS/PDI 空间频域特性分析的基础上,开发了一套高灵敏度的计算机辅助装调方法来实现干涉仪的对准。在粗装调阶段,对光电传感器采集的光场分布进行离散傅里叶变换,利用频谱图中的信息调整 PS/PDI;在精密装调阶段,采用干涉条纹的频域对比度作为评价函数,以得到对比度的最大值为目标微调干涉仪。装调实验结果表明,对于可见光波段 PS/PDI 中直径为 $1.5 \mu\text{m}$ 的针孔,可以达到优于 $0.1 \mu\text{m}$ 的重复对准精度。

关键词 光学测量;光刻;移相干涉术;点衍射干涉仪;计算机辅助装调

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1845

High Precision Alignment of Phase-Shifting Point Diffraction Interferometer

Liu Ke Li Yanqiu

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Both the absolute accuracy and repeatability of phase-shifting point diffraction interferometer (PS/PDI) are influenced by the alignment errors of interferometer, so a highly sensitive computer aided alignment method is necessary. A highly sensitive computer aided alignment method based on the spatial frequency domain characteristic of PS/PDI is developed. In the coarse alignment stage, the information provided by the discrete Fourier transform of the light field distribution on CCD is used to align the PS/PDI. In the fine alignment stage, the frequency domain contrast of fringes on CCD is used as the merit function to align the PS/PDI. Alignment experimental results show that the alignment repeatability of $0.1 \mu\text{m}$ can be achieved for an $1.5 \mu\text{m}$ diameter pinhole used in visible light PS/PDI.

Key words optical measurement; lithography; phase-shifting interferometry; point diffraction interferometer; computer aided alignment

1 引 言

2007 年国际半导体技术路线图(ITRS 2007)指出,极紫外光刻技术(EUVL)是实现 32 nm 及其以下技术节点最有潜力的候选技术。EUVL 投影物镜极为苛刻的波像差容限对光学设计、光学加工以及集成装调等提出了前所未有的要求。为了完成 EUVL 投影物镜高精度的在线装调,波像差在线检测设备的检测精度要高达 0.1 nm 均方根(RMS)^[1]。H. Medeck

等^[2,3]提出的相移点衍射干涉仪(PS/PDI)是迄今为止应用于 EUVL 投影物镜波像差检测精度最高的仪器,美国劳伦斯伯克利国家实验室的研究表明,PS/PDI 的检测精度可以达到 $0.04 \sim 0.08 \text{ nm RMS}$ ^[4~6]。PS/PDI 采用直径约为待测物镜艾里斑直径 $40\% \{\lambda/[2(NA)]\}$, $\lambda = 13.5 \text{ nm}$, NA 为待测物镜像方数值孔径)的针孔衍射产生球面参考波,针孔轴向、径向位置的失调将直接降低参考光强度,增大针孔衍射产生的

收稿日期: 2009-11-24; 收到修改稿日期: 2010-01-06

基金项目: 教育部长江学者奖励计划、国家自然科学基金(60938003)、北京理工大学基础研究基金(20070142008, 20090442019)和国家科技重大专项(2008ZX02501-009)资助课题。

作者简介: 刘 克(1980—),男,博士,讲师,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: liukess2008@gmail.com

球面参考波波面误差,从而降低干涉条纹的对比度,降低 PS/PDI 的检测精度。因此 PS/PDI 的绝对检测精度和重复精度都直接受干涉仪装调误差的影响,研究表明,PS/PDI 的针孔对准误差必须限定在针孔直径的 1/10 以内^[4],必须研究高灵敏度的计算机辅助装调技术来解决这个问题^[7~9]。

由于极紫外波段在线检测实验的条件限制,本课题组采用可见光作为实验光源开展 PS/PDI 的关键技术研究,建立了一套可见光波段 PS/PDI 实验装置。为了实现装置的高精度对准,开发了一套高灵敏度的计算机辅助装调方法,并利用 PS/PDI 空间频域特性分析实时监测干涉仪的装调状态。

2 理论分析

PS/PDI 的工作原理如图 1 所示。光源发出的光束经过待测物镜物面针孔滤波后,由二元光栅分束,经过待测物镜后,携带了待测物镜波像差信息,在待测物镜像面上形成了若干个衍射级;点衍射板位于待测物镜像面,0 级光通过针孔衍射形成球面参考波,1 级光通过窗口携带了待测物镜波像差信息作为测试波,在 CCD 平面形成干涉条纹;沿垂直光栅刻线的方向驱动光栅,可以在 1 级光中引入周期性的相移,利用多幅移相干涉图计算出待测物镜的波像差。PS/PDI 的装调难点在于 0 级衍射光焦点与点衍射板针孔的对准,根据可见光波段 PS/PDI 设计的结果,点衍射板上针孔最小直径仅为 $1.5 \mu\text{m}$,0 级衍射光是否聚焦在针孔的中心仅凭肉眼是难以辨别的。

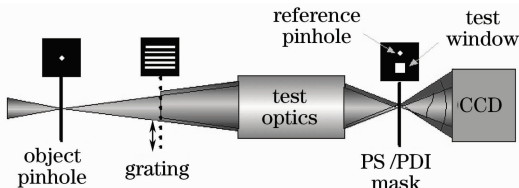


图 1 PS/PDI 原理示意图

Fig. 1 Principle of PS/PDI

开发的 PS/PDI 计算机辅助装调方法利用标量衍射理论建立点衍射板出射光场分布与 CCD 平面光场分布之间的联系。根据自相关定理,CCD 平面光强分布的傅里叶变换等于点衍射板透过光场复振幅分布的自相关,即

$$\mathcal{F}\{|A(r)|^2\} = \mathcal{F}\{A(r)A^*(r)\} = a(\rho) * a^*(-\rho), \quad (1)$$

式中 $A(r)$ 为 CCD 平面光场复振幅分布函数; $|A(r)|^2$ 为 CCD 平面光强分布; $a(\rho)$ 为点衍射板出

射光场复振幅分布函数,等于点衍射板透射率函数与入射光场复振幅的乘积; \mathcal{F} 为傅里叶变换算子,* 为卷积,* 为共轭,根据 Fraunhofer 远场传播理论, $A(r)$ 和 $a(\rho)$ 为一对傅里叶变换对,即满足 $A(r) = \mathcal{F}\{a(\rho)\}$ 。

由(1)式可知,将 CCD 实时采集的光强分布做傅里叶变换得到频谱图,就可以实时反映点衍射板入射光场(0,1 级衍射光焦点)与点衍射板中的窗口、针孔等微结构的相对位置关系,相当于把点衍射板“放大”,起到了一个虚拟显微镜的作用,实时监测点衍射板的装调状态。PS/PDI 计算机辅助装调的主要思想是:1)在粗装调阶段,对 CCD 平面光强分布做离散傅里叶变换,利用频谱图中显示的信息,对点衍射板轴向、径向位置进行调整;2)在精密装调阶段,采用干涉条纹的频域对比度 Γ 作为评价函数,以得到 Γ 的最大值为目标,微调点衍射板使 0 级衍射光焦点对准点衍射板针孔。

2.1 PS/PDI 的粗装调

PS/PDI 的粗装调以点衍射板窗口(宽度约为 $60 \mu\text{m}$)作为对准标记,采用傅里叶变换辅助装调的方法,实现点衍射板的 XYZ 方向粗对准。在 Z 轴方向上,将点衍射板调节到投影物镜像面位置;在 XY 轴方向上,将窗口中心调节到投影物镜焦点处。粗装调光路不需要作为 PS/PDI 分束装置的二元光栅,待测物镜聚焦光束照明窗口,点衍射板透射光场的复振幅分布函数 $a(\rho)$ 可表示为

$$a(\rho) = [\delta(\rho) + c] \cdot w(\rho - \rho_0), \quad (2)$$

式中 $[\delta(\rho) + c]$ 为点衍射板入射光场; $\delta(\rho)$ 为位于坐标原点处的单脉冲函数,表示待测物镜聚焦光束焦点;常数 c 为焦点周围杂散光的复振幅,近似表示为均匀分布; $w(\rho - \rho_0)$ 为窗口的透射率函数,表示窗口中心位于坐标 ρ_0 处。(2)式代入(1)式可得

$$\mathcal{F}\{|A(r)|^2\} = \delta(\rho) + [cw(\rho - \rho_0) + cw^*(\rho_0 - \rho)] + c^2 w(\rho) * w^*(-\rho). \quad (3)$$

由(3)式可知,CCD 平面光强分布的傅里叶变换 $\mathcal{F}\{|A(r)|^2\}$ 由三部分组成:1)位于频域中心的峰值 $\delta(\rho)$,它代表了待测物镜焦点的位置;2) $[cw(\rho - \rho_0) + cw^*(\rho_0 - \rho)]$ 为两个关于频域中心对称分布,窗口中心距频域中心分别为 ρ_0 和 $-\rho_0$ 的窗口透射率函数;3) $c^2 w(\rho) * w^*(-\rho)$ 为窗口透射率函数的自相关,它形成了一个幅值为 c^2 的微弱背景信号,其形状和覆盖范围取决于窗口的透射率函数,在频域中心达到最大值,在窗口边缘处降为零。如图 2 所示,深灰色区域两个窗口中心与频域中心峰值之间的距离表示点

衍射板窗口中心与待测物镜像点间的距离,可以作为点衍射板 XY 方向对准的判据,所以 XY 方向的装调以两个窗口中心在频域中心重合为目标,即 $\rho_0 = 0$ 。当点衍射板远离待测物镜焦平面时,中心峰值 $\delta(\rho)$ 将被展宽,不能用单脉冲函数来表示,势必采用一个具有一定宽度的函数来代替,卷积运算导致窗口 $[c\omega(\rho - \rho_0) + c\omega^*(\rho_0 - \rho)]$ 边缘模糊,因此点衍射板 Z 轴方向对准应以得到清晰的窗口边缘为目标。

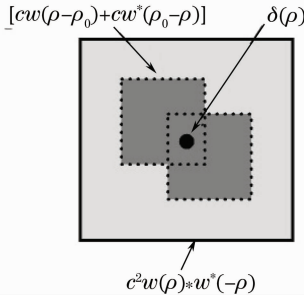


图 2 粗装调过程中 CCD 平面光强分布的傅里叶变换频谱示意图

Fig. 2 Schematic view of frequency spectrum of light intensity on CCD plane obtained by Fourier transform in coarse alignment process

PS/PDI 的粗装调步骤可总结为:1)调整点衍射板 Z 轴方向的位置,直到在频谱图上得到清晰的窗口边缘;2)进行点衍射板 XY 轴对准,直至两个窗口的中心在频域中心重合。图 3 为 PS/PDI 粗装调实验中的 CCD 平面光强分布的傅里叶变换频谱图。图 3(a)为粗装调前的频谱图,图中两个窗口边缘较模糊;图 3(b)为粗装调完成后的频谱图,图中窗口边缘清晰,且两个窗口基本重合,实现了 XYZ 轴的粗对准。

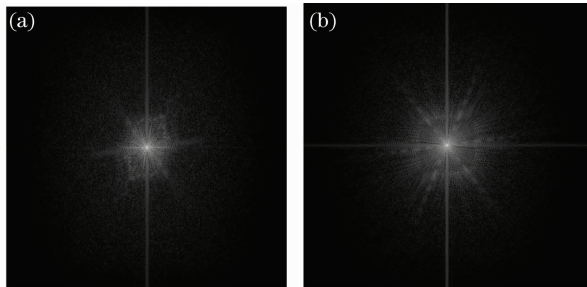


图 3 PS/PDI 粗装调实验中的傅里叶变换频谱图。(a)粗装调前;(b)粗装调后

Fig. 3 Frequency spectrum obtained by Fourier transform in coarse alignment experiment. (a) before alignment; (b) after alignment

2.2 PS/PDI 的精密装调

PS/PDI 精密装调的目标是将针孔中心在 XYZ

方向对准 0 级衍射光焦点,将窗口中心在 XYZ 方向对准 1 级衍射光焦点,使干涉条纹的对比度达到最高。精密装调的光路如图 1 所示,点衍射板的透过光场复振幅分布 $a(\rho)$ 可表示为

$$a(\rho) = \delta_1(\rho) + c \cdot \omega(\rho - \rho_0) + d \cdot \delta_0(\rho - \rho_0 - s), \tag{4}$$

式中 $\delta_1(\rho)$ 为经过窗口的 1 级衍射光焦点强度极大值; $c \cdot \omega(\rho - \rho_0)$ 为透过窗口的 1 级衍射光中的高频分量,近似用常数 c 表示其幅值, ρ_0 为窗口中心与 1 级衍射光焦点的间距; $d \cdot \delta_0(\rho - \rho_0 - s)$ 为 0 级衍射光经过针孔后形成的参考光, s 为点衍射板上针孔与窗口中心的间距,由于针孔的空间滤波作用,采用 d 表示 0 级衍射光 $\delta_0(\rho - \rho_0 - s)$ 的幅值衰减。此时,CCD 平面光强分布的傅里叶变换 $\mathcal{F}\{|A(r)|^2\}$ 可表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{|A(r)|^2\} = & \delta_1(\rho) + d \cdot \delta_0(\rho - \rho_0 - s) + \\ & d \cdot \delta_0^*(-\rho + \rho_0 + s) + \\ & [c \cdot \omega(\rho - \rho_0) + c \cdot \omega^*(\rho_0 - \rho)] + \\ & [d \cdot c \cdot \omega(\rho - s) + d \cdot c \cdot \omega^*(-\rho + s)] + \\ & c^2 \omega(\rho) * \omega^*(-\rho). \end{aligned} \tag{5}$$

由(5)式可知,光栅分束引入测试波和参考波后,CCD 平面光强分布的频谱除了(3)式中的三项之外,增添了新的内容:两个距离频域中心分别为 $(\rho_0 + s)$ 和 $-(\rho_0 + s)$ 的单脉冲函数 $d \cdot \delta_0(\rho - \rho_0 - s)$ 和 $d \cdot \delta_0^*(-\rho + \rho_0 + s)$ 对称分布于频域中心两侧;两个关于频域中心对称,距离频域中心分别为 $\pm s$ 的窗口函数 $d \cdot c \cdot \omega(\rho - s)$ 和 $d \cdot c \cdot \omega^*(-\rho + s)$ 。如图 4 所示,窗口函数中心与单脉冲函数间距为 ρ_0 ,它们的相对位置代表了 1 级衍射光焦点同点衍射板窗口中心的相对位置。

精密装调过程中,在系统其他部分不动的情况下,调节光栅的 Z 轴方向位置,以改变 0, 1 级衍射

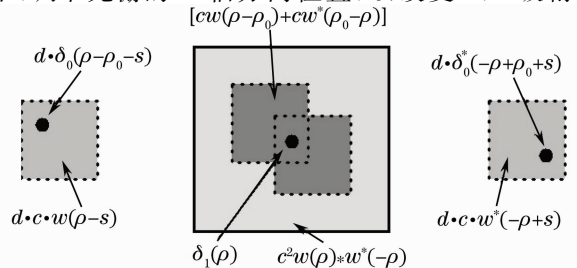


图 4 精密装调过程中 CCD 平面光强分布的傅里叶变换频谱示意图

Fig. 4 Schematic view of frequency spectrum of light intensity on CCD plane obtained by Fourier transform in fine alignment process

光焦点间距同窗口中心和针孔间距相等;调节光栅 θ_z ,使得光栅刻线方向转动,以改变 0,1 级衍射光焦点连线方向同窗口中心和针孔连线方向相同;调节过程中,以窗口边缘是否清晰作为 Z 轴方向对准标志,以频谱图上的单脉冲函数是否位于窗口中心作为 XY 轴方向的对准标志。

由于点衍射板针孔最小尺寸仅为 $1.5 \mu\text{m}$,单靠以上方法不可能实现针孔的对准。因此,在 PS/PDI 精密装调的最后阶段,通过计算干涉条纹的频域对比度,实现针孔中心与 0 级衍射光焦点之间高精度的 XYZ 三轴对准。干涉条纹的对比度直接反映了干涉测量中的信噪比,对于 PS/PDI 而言,对比度的提高意味着参考波强度和质量的提高,进而反映了 0 级衍射光焦点同针孔的对准状态。对比度定义为测试光和参考光的能量之比,根据帕斯瓦尔定律所揭示的空域和空间频域能量守恒性质,干涉条纹的对比度同样可以利用傅里叶变换的方法在频域计算,即频谱图中 1 级谱和 0 级谱包围圆内频域积分之比。干涉条纹的频域对比度 Γ 定义为

$$\Gamma = 2 \frac{\int_{|f-s_f|<R} |\mathcal{F}\{|A(r)|^2\}|^2 df}{\int_{|f|<R} |\mathcal{F}\{|A(r)|^2\}|^2 df}, \quad (6)$$

式中空间频率 $f=r/(\lambda z)$, r 为 CCD 平面空间坐标, z 为点衍射板与 CCD 平面间距; s_f 为 0 级谱中心峰值与 1 级谱峰值间距,同 0,1 级衍射光焦点间距 s 成正比; R 为 0,1 级谱包围圆半径,通常取 s_f 的一半。

PS/PDI 的精密装调步骤可总结为:1)调节光栅的 Z 轴和 θ_z ,使得 0,1 级衍射光焦点分别对准点衍射板针孔和窗口中心,用频谱图上的窗口边缘是否清晰以及单脉冲函数是否位于窗口中心作为对准判据;2)微调点衍射板 XYZ 轴,使 0 级衍射光焦点

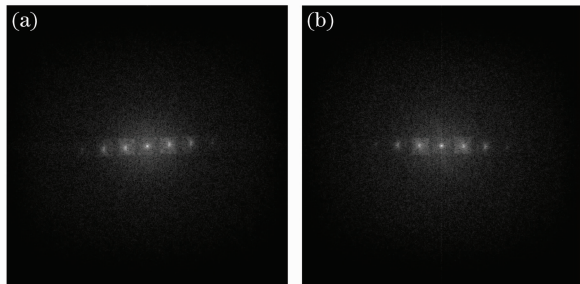


图 5 PS/PDI 精密装调实验中干涉条纹频谱图。(a)精密装调前 $\Gamma=0.28$;(b)精密装调后 $\Gamma=0.36$

Fig. 5 Frequency spectrum obtained by Fourier transform in fine alignment experiment. (a) before alignment, $\Gamma=0.28$; (b) after alignment, $\Gamma=0.36$

对准针孔,采用条纹的对比度 Γ 作为评价函数,以得到 Γ 的最大值为目标。图 5 为 PS/PDI 精密装调实验中 CCD 平面光强分布的傅里叶变换频谱图。图 5(a)为精密装调前的频谱图,1 级谱峰值频率没有位于窗口的中心位置,说明 0,1 级衍射光焦点间距、方向与窗口中心和针孔间距、方向不匹配,频域对比度 Γ 为 0.28;图 5(b)为精密装调完成后的频谱图,频谱图中窗口边缘清晰,且 1 级谱峰值频率位于窗口的中心位置,频域对比度 Γ 达到了 0.36。

3 实验结果与分析

图 6 为自制的可见光波段 PS/PDI 实验装置实物图,主要包括 PS/PDI 主机、干涉条纹处理软件^[10~14]、待测物镜三个部分。计算机辅助装调方法也已经集成在 PS/PDI 实验装置的软件模块,程序采用 Visual C++ 编写,采用 CPU 主频 2.0 GHz,内存 512 M 计算机运行该辅助装调程序,对于像素为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的干涉图,运算速度为 2.2 frame/s,基本实现了实时装调。

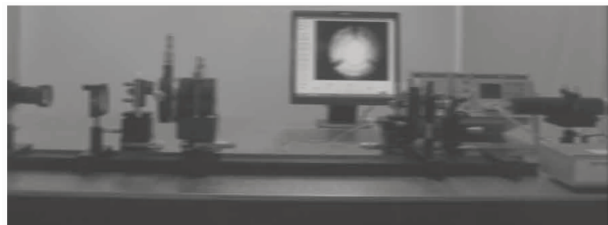


图 6 可见光波段 PS/PDI 实验装置实物图

Fig. 6 Photo of visible light PS/PDI experimental setup

采用可见光波段 PS/PDI 实验装置的重复对准实验检验了该方法的灵敏度和可重复性,具体方法为采用本文的计算机辅助装调方法装调 PS/PDI,通过调节点衍射板的空间位置,使 0,1 级衍射光焦点分别对准点衍射板的针孔和窗口中心,并记录频域对比度达到最大值时点衍射板 XYZ 三轴的相对位置,作为本次装调实验的结果,得到结果后改变点衍射板的空间位置,进行下一次装调实验;重复以上步骤,得到多组频域对比度达到最大值时点衍射板 XYZ 三轴的相对位置;计算多组相对位置的标准差,即为频域对比度法辅助装调的 XYZ 三轴重复对准精度。图 7 给出了利用本文方法对准 PS/PDI 的 20 组装调实验的 XYZ 三轴空间相对位置以及频域对比度数据,实验中针孔直径为 $1.5 \mu\text{m}$ 。实验结果表明,X 轴重复对准精度为 $0.072 \mu\text{m}$,Y 轴重复对准精度为 $0.066 \mu\text{m}$,Z 轴重复对准精度为 $0.042 \mu\text{m}$,XYZ 三轴均达到了优于 $0.1 \mu\text{m}$ 的重复

对准精度, 20 组数据中频域对比度的标准差仅为 0.0019, 说明这种计算机辅助装调方法具有很高的灵敏度和可重复性。

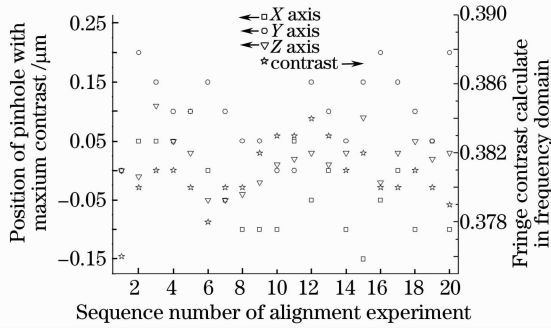


图 7 计算机辅助装调方法的 PS/PDI 重复对准实验数据

Fig. 7 Experimental results of repetitive alignment of PS/PDI using the method in this paper

4 结 论

对 PS/PDI 空间频域特性进行了详细的分析, 在此基础上开发了一套计算机辅助装调方法实现了 PS/PDI 的高精度对准。将该方法应用于可见光波段 PS/PDI 实验装置的对准, 可以达到 2.2 frame/s 的运算速度, 基本实现了干涉仪装调状态的实时监测。可见光波段 PS/PDI 实验装置的重复对准实验结果表明, 对于可见光波段 PS/PDI 中直径为 $1.5 \mu\text{m}$ 的针孔, 该方法可以达到优于 $0.1 \mu\text{m}$ 的 XYZ 三轴重复对准精度, 具有很高的灵敏度和可重复性。该研究结果对于开发应用于 EUVL 投影物镜波像差在线检测的高精度 PS/PDI 具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- 1 K. Sugisaki, M. Hasegawa, M. Okada *et al.*. EUVA's challenges toward 0.1 nm accuracy in EUV at-wavelength interferometry[C]. In Proc. on Fringe 2005, Springer Berlin Heidelberg, 2005. 252~266
- 2 H. Medeck, E. Tejnil, K. A. Goldberg *et al.*. Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1526~1528

- 3 H. Medeck, Phase-shifting point diffraction interferometer[P]. U. S. Patent 5835217, 1998
- 4 P. P. Naulleau, K. A. Goldberg, S. H. Lee. 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
- 5 K. A. Goldberg, P. P. Naulleau, J. Bokor *et al.*. Honing the accuracy of extreme ultraviolet optical system testing: at-wavelength and visible-light measurements of the ETS Set-2 projection optic[C]. *SPIE*, 2002, **4688**: 329~337
- 6 K. A. Goldberg, P. P. Naulleau, P. E. Denham *et al.*. At-wavelength alignment and testing of the 0.3 NA MET optic[J]. *J. Vac. Sci. & Technol. B*, 2004, **22**(6): 2956~2961
- 7 K. A. Goldberg, P. P. Naulleau, J. Bokor. Fourier transform interferometer alignment method [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4477~4483
- 8 K. A. Goldberg, P. P. Naulleau. In situ alignment system for phase-shifting point-diffraction interferometer[P]. U. S. Patent 6118535, 2000
- 9 P. P. Naulleau. Phase-shifting point diffraction interferometer focus-aid enhanced mask[P]. U. S. Patent 6151115, 2000
- 10 Wu Shaoxiang. Research on phase extraction algorithms of phase-shifting point diffraction interferometer [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009
吴少雄. 相移点衍射干涉仪中的相位提取研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009
- 11 Zhang Hen. Research on phase unwrapping techniques of phase-shifting point diffraction interferometer [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009
张 恨. 相移点衍射干涉仪中的相位展开研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009
- 12 Liu Ke, Li Yanqui. Phase unwrapping of interferogram with obscurations in phase-shifting interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1812~1817
刘 克, 李艳秋. 移相干涉术中有分割遮拦干涉图的相位展开 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1812~1817
- 13 Li Sikun, Chen Wenjing, Su Xianyu. Phase unwrapping guided by amplitude of wavelet ridge coefficients in wavelet transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 715~721
李思坤, 陈文静, 苏显渝. 小波变换轮廓术中用小波脊系数幅值引导相位展开的研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 715~721
- 14 Sun Wei, He Xiaoyuan, C. Quan. A new method for phase retrieval on non-monotonous fringes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 876~882
孙 伟, 何小元, C. Quan. 非单调条纹图的相位恢复新方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 876~882