

文章编号: 0253-2239(2010)10-2923-05

一种新的相移点衍射干涉仪系统误差标定方法

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 相移点衍射干涉仪利用测试波和参考波的横向错位产生载波干涉条纹,因此测量结果中必然引入一定的系统误差。在分析相移点衍射干涉仪主要系统误差源的基础上,提出了一种新的系统误差标定方法,即旋转光栅法。该方法根据光栅在正交方向上的两次测量结果,利用泽尼克多项式在单位圆域的正交特性和奇偶对称性质即可标定干涉仪的系统误差。可见光波段的标定实验结果表明,系统的几何彗差为 -0.116λ ,与理论计算结果 -0.133λ 基本一致,证明了该方法的有效性。

关键词 光学测量;光刻;移相干涉术;点衍射干涉仪;系统误差标定

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.2923

A New Calibration Method of Systematic Errors in 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 Because the phase-shifting point diffraction interferometer (PS/PDI) uses lateral shearing of test and reference waves to generate carrier frequency fringe pattern, significant systematic measurement errors are consequentially introduced. A new calibration method of PS/PDI systematic errors, named rotating grating method, is proposed. Based on the PS/PDI measurement results obtained with two gratings in orthogonal directions, the proposed method utilizes the orthogonal and symmetric property of Zernike polynomials in unit circle to calibrate the systematic errors of PS/PDI. The calibration experiment of visible light PS/PDI is performed to verify the method. The result shows that the geometric coma of the system is -0.116λ which is consistent with the theoretical value of -0.133λ , which proves the validity of the method.

Key words optical measurement; lithography; phase-shifting interferometry; point diffraction interferometer; systematic error calibration

1 引 言

相移点衍射干涉仪(PS/PDI)是目前为止应用于极紫外光刻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的检测精度均方根(RMS)可以达到 $0.04\sim 0.08\text{ nm}$ ^[1~3]。PS/PDI采用二元光栅作为分束器将测试波和参考波分开,并且沿垂直光栅刻线的方向驱动光栅可以在高级次衍射光中引入周期性的相

移^[4,5]。PS/PDI的这种设计解决了传统点衍射干涉仪^[6]参考光透射率较低的问题,并且增加了移相测量的功能。但是,PS/PDI中测试波和参考波横向错位的光路结构必然导致测量结果中引入一定的系统误差,研究结果表明^[7],PS/PDI的主要系统误差比干涉仪所要求达到的测量精度还要高一个数量级,必须对其进行标定。光学干涉测量中,通常采用旋转待测物的方法^[8,9]分离测量仪器的系统误差,

收稿日期: 2009-11-24; 收到修改稿日期: 2010-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(60938003), 国家科技重大专项(2009ZX02201-003), 教育部长江学者奖励计划, 北京理工大学基础研究基金(20090442019)和北京理工大学优秀青年教师资助计划扩展项目(2010CX04020)资助课题。

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

但是极紫外光刻投影物镜的设计通常采用离轴的多个非球面反射镜,使得这种方法难以实现。Zhu等^[10]提出了一种基于双窗绝对测量的 PS/PDI 系统误差标定方法,这种方法结构简单,装调难度小,工程上容易实现,但是这种方法采用双窗的剪切干涉条纹作为系统误差校正的数据,剪切比较大时会导致部分波面数据的缺失。

本文对 PS/PDI 的主要系统误差源进行了详细的分析,在此基础上,根据 PS/PDI 的主要系统误差随着二元光栅刻线方向旋转的特性,提出了一种旋转光栅法标定 PS/PDI 的系统误差,并利用本课题组研制的可见光波段 PS/PDI 的系统误差标定实验验证了旋转光栅法的有效性。

2 系统误差分析

PS/PDI 的原理如图 1 所示。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。

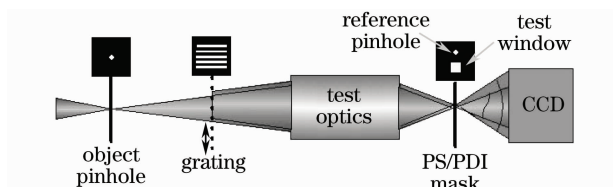


图 1 PS/PDI 原理示意图

Fig. 1 Schematic view of PS/PDI

根据误差理论,可以将影响 PS/PDI 测量精度的误差分为系统误差和随机误差两类。影响球面参考波精度的点衍射板针孔对准误差,影响移相干涉测量精度的振动、空气扰动、温度变化、随机噪声和探测器量化误差等属于随机误差,是由装调误差、器件性能以及环境因素等所导致的,无法通过定量计算进行校正,只能通过提高针孔对准精度、改进器件性能、改善实验环境,以及多次测量取平均等方法尽可能减小它们的影响,该类误差影响测量结果的精密程度。影响球面参考波精度的点衍射板针孔加工圆度和三维轮廓误差,影响移相干涉相位提取精度的移相误差、光源波动、探测器非线性响应、光强高次谐波等属于系统误差,可以通过标定 PS/PDI 系统

分立器件的性能,以及开发对误差不敏感的相位提取算法加以校正,对该类误差的校正程度直接决定了测量结果的精确度。除此之外,系统误差中还包括一些由 PS/PDI 特定的光路结构在测量结果中引入的较为明显的误差,主要为系统几何彗差和探测器倾斜像散,该类误差可以通过理论推导以及标定实验在测量结果中去除,提出的旋转光栅法可以实现该类系统误差的标定。

2.1 系统几何彗差

极紫外波段材料和器件的特殊性,使得 PS/PDI 采集干涉条纹时无法采用成像镜头,测试波和参考波直接在探测器平面干涉。PS/PDI 使用二元光栅作为分束装置,使得测试光和参考光焦点在投影物镜像面上分开一定距离,即使忽略投影物镜的像差,假设是曲率中心存在横向错位的两束球面波在探测器平面上发生干涉,除了在干涉条纹中引入线性载波之外,还包含一定的三阶彗差和高阶彗差,称为系统几何彗差,如图 2 所示。

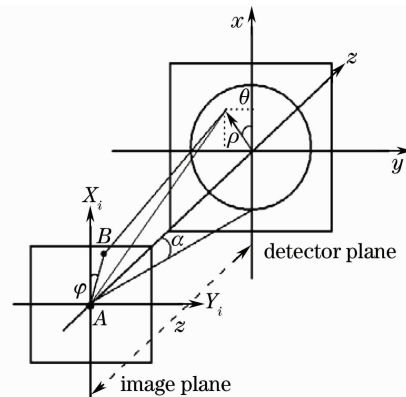


图 2 系统几何彗差推导所采用的光路结构示意图

Fig. 2 Geometry for deducing geometrical coma systematic error

在投影物镜像面 $X_i Y_i$ 中,测试波焦点位于 $X_i Y_i$ 平面坐标原点 A ,参考波焦点位于点 B ,其横向错位间距 $s = \overline{AB}$,错位方向与 X_i 轴夹角为 φ ; Z 轴为光轴方向, z 为 $X_i Y_i$ 平面同探测器平面 xy 的间距;在 xy 平面的归一化极坐标系中, ρ 和 θ 分别为归一化半径和方向角; α 为投影物镜的像方孔径角,目前极紫外光刻投影物镜的数值孔径 NA 一般不超过 0.3,做小角度近似,令 $NA \approx \tan \alpha$,则 xy 平面的直角坐标系同归一化极坐标系的对应关系为

$$\begin{cases} \rho \cos \theta = x / (zNA) \\ \rho \sin \theta = y / (zNA) \end{cases} \quad (1)$$

由图 2 可知,测试波和参考波相对于 xy 平面同一坐标点的光程差(OPD) δ_{OPD} 可表达为

$$\delta_{\text{OPD}} = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} - [(x - s\cos\varphi)^2 + (y - s\sin\varphi)^2 + z^2]^{1/2}. \quad (2)$$

对(2)式后半部分作幂级数的泰勒展开,只保留到 s 的一次项,(2)式可简化为

$$\delta_{\text{OPD}} = xs\cos\varphi(x^2 + y^2 + z^2)^{-1/2} + ys\sin\varphi(x^2 + y^2 + z^2)^{-1/2}. \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式,得到光程差的归一化极坐标表达式并进行幂级数的泰勒展开,忽略 ρ 的三阶以上项,可得

$$\delta_{\text{OPD}} = sNA \left(1 - \frac{1}{2}NA^2\rho^2\right)\rho\cos(\theta - \varphi). \quad (4)$$

光程差 δ_{OPD} 可表示为泽尼克多项式的组合,将量纲统一为波数,即

$$\delta_{\text{OPD}}/\lambda = z_1\rho\cos(\theta - \varphi) + z_6(3\rho^2 - 2)\rho\cos(\theta - \varphi). \quad (5)$$

式中 z_1 和 z_6 分别为 x 向倾斜和 x 向彗差对应项的泽尼克系数,即

$$\begin{aligned} z_1 &= sNA/\lambda - sNA^3/3\lambda \\ z_6 &= -sNA^3/6\lambda \end{aligned} \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可知,测试波和参考波的横向错位除了引入线性载波 z_1 ,还导致了系统几何彗差 z_6 ,其大小与 s 成正比,与 NA 的三次幂成正比。另外,系统几何彗差随着错位方向角 φ 的改变而转动,因此转动二元光栅的刻线方向使错位方向角 φ 发生变化,可以使系统几何彗差随之旋转。

2.2 探测器倾斜像散

在系统几何彗差推导时,假定探测器平面的法线同光轴 z 平行,然而在实际装调过程中探测器平面必然存在装调误差,从而在测试波和参考波之间引入额外的光程差。如图 3 所示,灰色阴影平面 $x'y'$ 表示探测器平面的实际位置,坐标原点同 xy 平面(垂直于光轴 z)重合,相对于 xy 平面的 x 轴方向

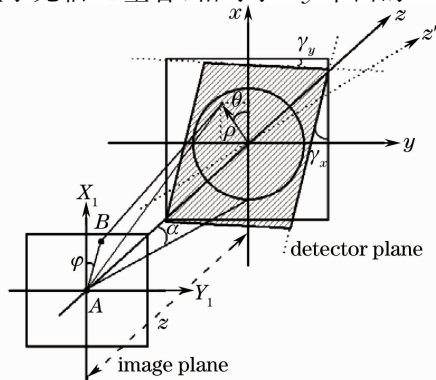


图 3 探测器倾斜像散推导所采用的光路结构示意图
Fig. 3 Geometry for deducing detector misalignment systematic astigmatism error

倾斜角为 γ_x , y 轴方向倾斜角为 γ_y 。

同 xy 平面相比,倾斜使得 $x'y'$ 平面内的点在 z 轴方向的坐标 z' 发生一阶的偏移,在 x 轴和 y 轴方向的坐标 x' 和 y' 发生了二阶偏移。在倾斜角 γ_x 和 γ_y 较小的情况下,忽略二阶偏移的影响,认为 $x' \approx x, y' \approx y$,只考虑 z 轴方向的一阶偏移,即

$$z' = z + x'\gamma_x + y'\gamma_y \approx z[1 + (x\gamma_x + y\gamma_y)/z]. \quad (7)$$

与(3)式类似,考虑探测器倾斜导致的 z 轴偏移后,测试波和参考波相对于 xy 平面同一点的光程差 δ_{OPD}' 可表达为

$$\delta_{\text{OPD}}' = xs\cos\varphi(x^2 + y^2 + z'^2)^{-1/2} + ys\sin\varphi(x^2 + y^2 + z'^2)^{-1/2}. \quad (8)$$

将(7)式代入(8)式,采用与系统几何彗差类似的推导过程,光程差 δ_{OPD}' 的归一化极坐标表达式为

$$\delta_{\text{OPD}}' = \delta_{\text{OPD}} - \frac{1}{2}s\gamma_x NA^2 \rho^2 [\cos\varphi + \cos(2\theta - \varphi)] - \frac{1}{2}s\gamma_y NA^2 \rho^2 [\sin\varphi + \sin(2\theta - \varphi)]. \quad (9)$$

光程差 δ_{OPD}' 可表示为泽尼克多项式的组合,将量纲统一为波数,即

$$\delta_{\text{OPD}}'/\lambda = \delta_{\text{OPD}}/\lambda + z_3(2\rho^2 - 1) + z_4\rho^2\cos(2\theta - \varphi) + z_5\rho^2\sin(2\theta - \varphi). \quad (10)$$

式中 z_3, z_4 和 z_5 分别为离焦, 0° 像散和 45° 像散对应项的泽尼克系数,即

$$\begin{aligned} z_3 &= -sNA^2(\gamma_x\cos\varphi + \gamma_y\sin\varphi)/4\lambda, \\ z_4 &= -sNA^2\gamma_x/2\lambda, \\ z_5 &= -sNA^2\gamma_y/2\lambda. \end{aligned} \quad (11)$$

由(10)式和(11)式可知,探测器倾斜不仅会引入一定的离焦 z_3 ,还会引起 0° 和 45° 像散 z_4 和 z_5 ,像散大小与 γ_x 和 γ_y 成正比,与 s 成正比,与 NA 平方成正比。另外,横向错位方向角 φ 随着光栅刻线方向的转动而变化,使得探测器倾斜导致的像散系统误差也随之旋转。

3 系统误差标定

由系统误差分析的结果可知,系统几何彗差和探测倾斜像散都具有随着光栅刻线方向旋转的特性,旋转光栅法就是利用这种特性,使用正交方向上二元光栅进行两次测量,两次测量结果中干涉仪系统误差旋转了 90° ,再利用泽尼克多项式在单位圆域的正交特性和奇偶对称性质标定 PS/PDI 的系统误差。

图 4 为采用旋转光栅法标定 PS/PDI 系统误差

的实验装置示意图,在同一块掩模板中加工两个刻线方向正交的二元光栅,在点衍射板相互正交的两个方向上加工两个针孔。旋转光栅法实现 PS/PDI 系统误差标定的原理为

1) 将一组二元光栅和对应的点衍射板针孔和窗口调节到光路中,使 0 级衍射光对准针孔形成参考波,1 级衍射光对准窗口中心形成测试波,利用 PS/PDI 检测待测物镜的波像差,检测结果 T_1 可表示为

$$T_1 = W_T + W_E + W_{\text{COMA}} + W_{\text{ASTIG}}, \quad (12)$$

式中 W_T 为待测物镜的实际出瞳波像差; W_E 为干涉仪系统中其它误差; W_{COMA} 为系统几何彗差, W_{ASTIG} 为探测器倾斜导致的像散。

2) 利用平移装置将正交方向上的二元光栅调节光路中,完成与步骤 1) 正交方向的波像差检测,得到系统误差旋转 90° 的波面检测结果 T_1^R 可表示为

$$T_1^R = W_T + W_E + W_{\text{COMA}}^R + W_{\text{ASTIG}}^R, \quad (13)$$

式中 W_{COMA}^R 和 W_{ASTIG}^R 分别代表旋转了 90° 的系统几何彗差和探测器倾斜像散。

3) 波面 T_1 和 T_1^R 相减,消去 W_T 和 W_E ,得到旋转前后系统误差差值的波面 Δ 为

$$\Delta = T_1 - T_1^R = (W_{\text{COMA}} - W_{\text{COMA}}^R) + (W_{\text{ASTIG}} - W_{\text{ASTIG}}^R). \quad (14)$$

4) 采用泽尼克多项式对波面 Δ 进行拟合,得到波面 Δ 的 37 项泽尼克系数 $z_{\Delta n}$, ($n=0, 1, 2, \dots, 36$), 再利用泽尼克多项式在单位圆域的正交特性和奇偶对称性质,对 $z_{\Delta n}$ 中对应项系数进行数学运算,可以得到表征 W_{ASTIG} 的泽尼克系数 z_4 和 z_5 以及表征 W_{COMA} 的泽尼克系数 z_6 :

$$\begin{aligned} z_4 &= (z_{\Delta 4} - z_{\Delta 5})/2, \\ z_5 &= (z_{\Delta 4} + z_{\Delta 5})/2, \\ z_6 &= (z_{\Delta 6} - z_{\Delta 7})/2. \end{aligned} \quad (15)$$

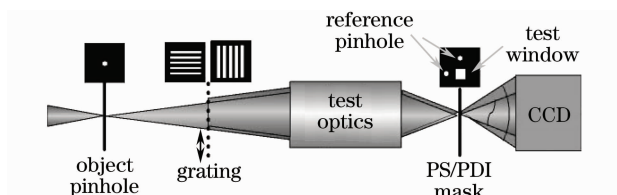


图 4 旋转光栅法实验装置示意图

Fig. 4 Schematic view of the experimental setup of rotating grating method

4 实验结果与讨论

为了开展 PS/PDI 的关键技术研究,本课题组研制了一套可见光波段 PS/PDI 实验装置及相应的干涉条纹处理软件^[11~13],实验中待测物镜为 $NA =$

0.2 的 20 倍缩小的施瓦兹希尔德(Schwarzschild)物镜。根据系统误差分析的结论,利用可见光波段 PS/PDI 的设计参数 s 和 λ ,在假定待测物镜的实际测量 $NA=0.2$ 与名义值相等的情况下,计算了 PS/PDI 实验装置的系统误差。结果表明:系统几何彗差较大为 -0.133λ ,必须予以标定;1 mrad 的探测器倾斜角会引起 -0.002λ 的像散,在探测器倾角较大时会带来较大的系统误差。

采用旋转光栅法标定可见光波段 PS/PDI 实验装置的系统误差,图 5 为 PS/PDI 在正交的方向上进行测量得到的干涉图。采用旋转光栅法对 PS/PDI 的系统误差进行了 20 次重复标定,如图 6 所示,系统几何彗差的标定结果为 $-0.116 \lambda \pm 0.65 \times 10^{-3} \lambda$,其中 -0.116λ 为 20 次系统误差标定结果的平均值,正负变化范围代表标准差。系统几何彗差的实验标定结果与理论推导值 -0.133λ 较为一致,证明了旋转光栅法的有效性;实验值和理论值的差异主要是由于待测物镜的实际测量 NA 略小于设计值 0.2 所导致的。探测器倾斜所导致的像散系统误差 0 像散和 45° 像散标定结果分别为 $-0.076 \lambda \pm 0.70 \times 10^{-3} \lambda$ 和 $-0.049 \lambda \pm 0.70 \times 10^{-3} \lambda$,说明探测器存在较大倾斜。

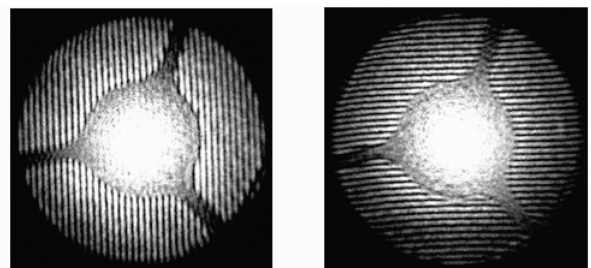


图 5 旋转光栅法正交方向上两次测量的干涉图
Fig. 5 Two fringe patterns in orthogonal directions used in rotating grating method

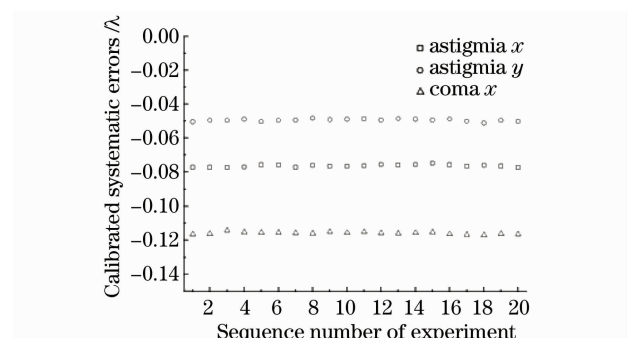


图 6 旋转光栅法系统误差标定实验结果
Fig. 6 Experimental results of systematic errors using rotating grating method

5 结 论

详细分析了 PS/PDI 的主要系统误差,在此基础上提出了一种 PS/PDI 的系统误差标定方法——旋转光栅法。该方法根据正交方向上光栅两次测量的结果,利用泽尼克多项式在单位圆域的正交特性和奇偶对称性质标定 PS/PDI 的系统几何彗差和探测器倾斜像散系统误差。使用旋转光栅法对本课题组研制的可见光波段 PS/PDI 实验装置进行系统误差标定,实验结果与理论计算的结果基本一致,证明了方法的有效性。旋转光栅法结构简单,工程上易于实现,对于开发应用于极紫外光刻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 P. P. Naulleau, K. A. Goldberg, S. H. Lee. Extreme-ultraviolet phase-shifting point-diffraction interferometer: a wavefront metrology tool with subangstrom reference-wave accuracy [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(35): 7252~7263
- 2 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
- 3 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
- 4 H. Medeck, E. Tejnil, K. A. Goldberg *et al.*. Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1526~1528
- 5 H. Medeck. Phase-shifting point diffraction interferometer[P]. U. S. Patent 5835217, 1998
- 6 R. N. Smartt, J. Strong. Point diffraction interferometer[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(5): 737
- 7 P. P. Naulleau, K. A. Goldberg, S. H. Lee *et al.*. Characterization of the accuracy of EUV phase-shifting point diffraction interferometry[C]. *SPIE*, 1998, **3331**: 114~123
- 8 E. Jensen. Absolute calibration method for laser Twyman-Green wave-front testing interferometers[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63A**(10): 1313
- 9 K. Ellsner, R. Burow, J. Grzanna *et al.*. Absolute sphericity measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(21): 4649~4661
- 10 Y. Zhu, K. Sugisaki, M. Okada *et al.*. Wavefront measurement interferometry at the operational wavelength of extreme-ultraviolet lithography [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(27): 6783~6792
- 11 Liu Ke, Li Yanqiu. At-wavelength interferometry of projection optics for extreme ultraviolet lithography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 257~262
刘 克, 李艳秋. 极紫外光刻投影物镜波像差在线检测技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 257~262
- 12 Li Yanqiu, Liu Ke. Core techniques of phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 11201
李艳秋, 刘 克. 相移点衍射干涉仪的关键技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 11201
- 13 Liu Ke, Li Yanqiu. 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