

文章编号: 0258-7025(2010)08-2029-06

# 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析

苗二龙<sup>1</sup> 张 健<sup>1,2</sup> 谷勇强<sup>1,2</sup> 康玉思<sup>1</sup> 刘伟奇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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, 长春 吉林 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 光刻投影物镜元件面形精度为纳米量级,因此要求检测精度为纳米到亚纳米量级。为了完成光刻投影物镜的光学元件面形检测任务,提出了利用菲佐型干涉仪进行检测的方法。通过理论分析和计算模拟,分别对相移误差、参考面误差、探测器非线性误差等系统误差以及光源稳定性、环境控制等影响干涉仪测量精度的主要因素进行分析,给出了测量误差大小与干涉仪结构参数之间的关系。计算结果表明,限制菲佐干涉仪检测精度的主要因素是参考面的精度和环境的影响。针对以上结果给出了提高干涉仪测量精度与减小测量误差的方法,对高精度菲佐干涉仪的研制具有一定的参考价值。

**关键词** 测量;误差分析;参考面精度;环境控制;菲佐干涉仪

中图分类号 O439;TH744.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.2029

## Measurement Error Analysis of High Precision Fizeau Interferometer for Lithography Projection Objective

Miao Erlong<sup>1</sup> Zhang Jian<sup>1,2</sup> Gu Yongqiang<sup>1,2</sup> Kang Yusi<sup>1</sup> Liu Weiqi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The surface accuracy of lithography projection objectives is on nanometer scale, so the accuracy of the testing interferometer is also needed on nanometer to sub-nanometer scale. A method to test the optical surfaces of lithography projection objectives using Fizeau interferometer is proposed. Through theory analysis and computer simulation, the system errors caused by phase shifting, reference surface, and detector nonlinear are investigated. Other factors affecting measuring accuracy including light source instability and environmental control are also analyzed. The relationship between measurement errors and interferometer structure parameters is presented. Some methods and measures for improving accuracy and decreasing measurement errors are put forward. The results of the computation show that the accuracy of the interferometer is mainly limited by the accuracy of the reference surface and the stability of the environments. The results also have an important reference value for the design and manufacture of Fizeau interferometers.

**Key words** measurement; error analysis; accuracy of the reference surface; environments control; Fizeau interferometer

### 1 引 言

光学检测是光学加工和装调过程中必不可少的过程,光学检测精度往往决定了光学加工的精度。光刻投影物镜是目前光学加工水平要求最高的光学系统之一<sup>[1]</sup>。国内目前已经开展了光刻投影物镜的研

制工作,超高精度的光学检测技术研究和光学检测设备的研制迫在眉睫。根据光学设计结果,整个物镜由 20~30 片镜片组成,系统波前要求小于 10 nm 以下,经过误差分配,要达到设计精度要求,部分镜片面形精度要求达到纳米量级,这对光学检测精度提出了极

收稿日期: 2009-10-16; 收到修改稿日期: 2009-12-18

作者简介: 苗二龙(1976—),男,博士,助理研究员,主要从事光刻投影物镜中的光学检测方面的研究。

E-mail: mel@mail.ustc.edu.cn

高的要求。为了制造出如此高精度的光学元件,光学检测的精度需要达到纳米甚至亚纳米的量级。菲佐型干涉仪是目前应用最广的干涉仪之一,是光学加工中不可或缺的检测设备之一,在科研和实际生产中有着普遍应用。目前商用的菲佐型干涉仪其精度峰谷值一般在 $\lambda/20$ 左右,并且随着口径的增大,其测量精度峰谷值甚至只有 $\lambda/10$ ,不能满足光刻投影物镜镜头光学元件的检测精度要求。

为了研制光刻投影物镜镜头,三大光刻机生产厂商(ASML,CANON,NIKON)分别研制了专用的面型检测干涉仪。点衍射干涉仪和菲佐型干涉仪是超高精度面形检测中常用的两种干涉仪。点衍射干涉仪最大的优点是可以利用小孔衍射产生理想球面波作为参考波,从而避免了参考面研制的困难。菲佐型干涉仪具有共光路的优点,共光路可以在一定程度上抵消部分系统误差,对环境变化的影响相对不太敏感。相对于点衍射干涉仪,菲佐型干涉仪在平面检测和凸球面检测时,干涉仪的干涉腔可以做得非常短,大大降低了环境对测量精度的影响,并且其数值孔径不受小孔衍射的限制,可以做得比较大,在光学检测中具有更广泛的应用<sup>[2]</sup>。

本文利用菲佐干涉仪来对光刻投影物镜镜头元件面形进行检测,对影响菲佐型干涉仪精度的主要因素进行了理论分析和计算模拟,给出了菲佐干涉仪的测量误差与结构参数的关系以及环境对干涉仪精度的影响,找出制约干涉仪精度的主要原因。通过在一定范围内控制菲佐型干涉仪的结构参数,减小和控制外部环境的影响,可以极大地提高干涉仪的检测精度,从而满足光刻投影物镜元件面形检测的要求。

## 2 影响菲佐干涉仪精度的主要因素

菲佐干涉仪的工作原理如图 1 所示。光源发出的光经过分束器和扩束镜形成准直光束,分别照射在参考面和被测面上,光束一部分被参考面反射回去形成参考波前,另外一部分被被测面反射回去形成被测波前。被测波前携带了被测面的面形信息,经过分束器反射在 CCD 上与参考波前产生干涉图并被记录下来。干涉图携带了被测面和参考面的波前信息,通过分析干涉图,采用一定的相位提取算法,被测面的面形信息就可以被计算出来。

影响干涉仪精度的因素很多,不同类型的干涉仪对环境以及系统硬件参数的要求各不相同。菲佐型干涉仪具有共光路的优点,其共光路部分对环境

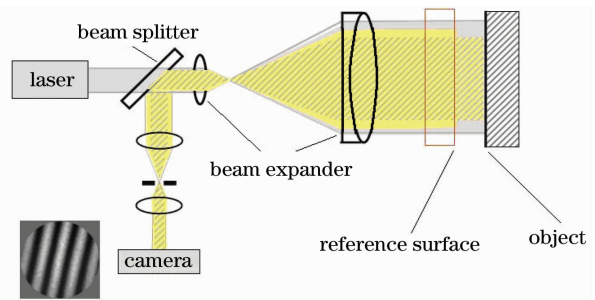


图 1 菲佐干涉仪原理

Fig. 1 Diagram of Fizeau interferometer

的要求大大降低,因此在一般的光学检测中有着广泛的应用。对于更高精度的光学检测,环境的影响将不可忽略,特别是参考面和被测面之间的非共光路部分,对环境的影响非常敏感。另外光源、探测器以及干涉仪中所使用的光学元件的精度都会影响最终的测量精度,这在高精度的干涉测量中必须进行考虑。本文采用相移测量方法,对干涉仪的误差进行分析。根据误差的不同性质,干涉仪的误差可以分为系统误差和随机误差两大类。系统误差主要包括相移误差、参考面误差、干涉仪中共光路部分光学元件误差以及探测器的非线性误差;随机误差主要是由光源的不稳定性以及环境的影响造成,包括光源的频率不稳定性和功率不稳定性,干涉仪光路上的振动、压力和温度的随机波动等。通过分析这些因素对干涉仪精度的影响,控制干涉仪结构参数,对误差进行合理分配,从而满足光刻镜头的检测要求。

### 2.1 相移误差

相移测量技术是目前精度最高的精密检测方法之一,通过连续或者步进方法改变参考波前和被测波前之间的光程差,利用相位提取算法给出被测波前的相位。目前最常用的实现相移的方法是利用压电陶瓷(PZT)产生微小位移,达到改变参考光或者被测光相对相位的目的。在实际使用中 PZT 存在线性和非线性位移误差,这也是限制相移测量精度的主要因素之一。考虑到 PZT 的二阶非线性效应,实际位移可表示为

$$\theta'_i = \theta_i(1 + \epsilon_1 + \epsilon_2\theta_i), \quad (1)$$

式中 $\theta'_i$ 是存在相移误差时的相位, $\theta_i = (i-3)\frac{\pi}{2}$ 是第*i*次相移的相位值, $\epsilon_1$ 是归一化线性误差系数,由 PZT 的标定不准导致, $\epsilon_2$ 为归一化二阶非线性误差系数,由 PZT 二阶非线性造成。

不同的相位提取算法对相移误差的敏感性不同,相移算法的选择需要综合考虑环境稳定性,CCD 参数和系统数据处理速度等相关因素。这里采用著

名的 Schwider-Hariharan 五步相移方法<sup>[3,4]</sup>

$$\tan \phi = \frac{2(I_2 - I_4)}{I_1 - 2I_3 + I_5}, \quad (2)$$

$$I_i = I_0[1 + m\cos(\phi + \theta_i)], i = 1, 2, \dots, 5 \quad (3)$$

式中  $\phi$  为所要求的波前相位,  $I_i$  为第  $i$  步所测光强。存在相移误差时 CCD 探测到的光强可以表示为  $I'_i = I_0[1 + m\cos(\phi + \theta'_i)]$ 。此时根据 Schwider-Hariharan 五步相移算法

$$\tan \phi' = \frac{2(I'_2 - I'_4)}{I'_1 - 2I'_3 + I'_5}, \quad (4)$$

利用 PI 公司 P-752.1CD PZT 定位平台和 E-753 数字控制器, 其位移非线性度小于 0.03%, 分辨率小于 0.1 nm, 移相总体相移误差小于 1 nm。这里取相移误差为波长的 1%, 通过模拟计算, 其引起的测量误差小于万分之一波长, 如图 2 所示。

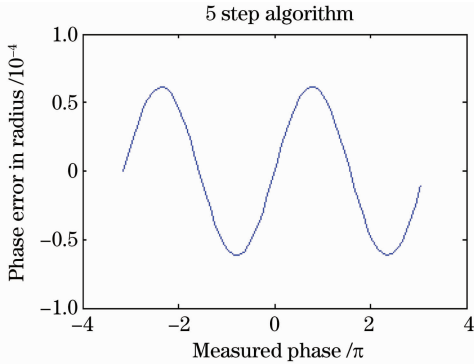


图 2 相移误差引起的相位误差

Fig. 2 Phase error due to phase shift calibration error

## 2.2 参考面误差

参考面的精度是影响非干涉仪测量精度的主要因素之一, 其精度往往决定了干涉仪的检测精度。目前商业的干涉仪参考面精度一般峰谷值为  $\lambda/20$ , 不能满足高精度的检测需求。要研制出高精度的干涉仪, 高精度参考面的研制是关键之一, 也是研制干涉仪的难点之一。要满足光刻镜头纳米级精度的面形检测需求, 需要参考面的精度至少在纳米量级。采用 532 nm 的光源, 参考面面形精度均方根要优于  $\lambda/1000$ , 目前国内的光学加工精度很难达到要求。以下三种方法可以研制或者提高参考面的精度。

### 1) 液面法

液面本身可以作为很好的平面参考面<sup>[5]</sup>, 可以利用液面作为高精度的参考面。其精度主要受制于重力和环境振动的影响。由于重力的影响, 液面曲率跟地球的曲率一致, 与理想标准平面存在偏差。设  $y$  为液面半径,  $R$  为地球半径。取  $R$  为地球半径平均值 6400 km。要达到纳米、亚纳米量级的精度, 液

面与标准平面的偏差要小于  $\lambda/1000$  ( $\lambda = 5 \times 10^{-4}$  mm):

$$\frac{y^2}{2R} = \frac{y^2}{2 \times 6.4 \times 10^9} \leq \frac{\lambda}{1000}, \quad (5)$$

计算得出最终参考液面直径小于 160 mm。

### 2) 点衍射

点衍射干涉仪<sup>[6]</sup>是最近十几年发展起来的一种新型的干涉仪, 它最大的特点是利用小孔衍射产生参考面, 从而消除了传统的参考面带来的误差。计算和实验表明, 如果小孔直径在波长量级, 其衍射波前与理想球面波的波前相差小于万分之一波长<sup>[7]</sup>, 是非常理想的参考面。可以首先利用点衍射干涉仪小孔衍射波前作为参考面来检测光学元件, 进行高精度参考面的研制。

### 3) 绝对检验

在没有现成的高精度参考面时, 使用绝对检验的方法, 可以去除干涉仪的系统误差和辅助光学面引入的误差, 对实际的光学表面进行绝对标定<sup>[8,9]</sup>。通过绝对标定后的表面作为干涉仪中的参考面, 经过数学处理可以去除参考面的偏差影响, 显著提高干涉仪的检测精度。

绝对检验是由 Jensen 等<sup>[10,11]</sup>在 1973 年提出的, 对于平面参考面, 可以采用三平板测量方法<sup>[12]</sup>, 给出平面相对理想平面的绝对偏差。对于球面, 也可以采用类似方法, 在三个位置分别测量, 经过计算去除系统误差和辅助球面的影响, 给出参考面的面形绝对偏差。经过 30 多年的发展, 绝对检测已经发展得相对比较成熟, 有了很多改进<sup>[13]</sup>。从最初的只能检测正交的两条轮廓线到整个面形的检测, 从需要 3 个平板到现在利用 2 个平板<sup>[14]</sup>以及 1 个小球<sup>[15]</sup>也能实现绝对检测, 从基本的绝对检测到通过对误差的奇偶性<sup>[8]</sup>进行分解等方法使得校准过程更加简洁、易于实现。

绝对检测方法在业界也获得了广泛的应用。ZYGO 公司目前已经有  $\lambda/50$  的球面参考面商业产品, 通过绝对检验可以将面形精度标定到峰谷值为  $\lambda/100 \sim \lambda/300$ 。

## 2.3 共光路元件误差

由于检测精度要求很高, 因此对共光路部分光学元件像差也有要求。利用 CODE V 对一理想点经过系统后在 CCD 上的波前进行分析, 当共光路部分系统剩余波像差峰谷值小于  $\lambda/4$  时, 参考面波前与被测面波前差均方根小于  $\lambda/10000$ , 具体如图 3 所示。

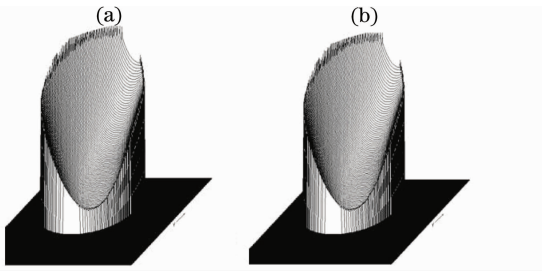


图3 (a)参考波前和(b)被测波前

Fig. 3 Reference (a) and test (b) wavefronts

从图3可以看到,由共光路部分引起的参考光和探测光之间的相位偏差非常小,探测器对共光路部分的光学元件总的剩余波前差只需要峰谷值小于 $\lambda/4$ 即可,这也是菲佐干涉仪的最大优点。

## 2.4 探测器非线性误差

### 2.4.1 CCD各像素点响应非均匀性的影响

由相位提取算法可以看出,算法是针对每个像素点进行计算的,光强的绝对值通过算法可以完全消除,对最终的相位提取没有影响。因此CCD各像素点响应的非均匀可以通过算法完全消除,不影响最终的测量结果

### 2.4.2 CCD单像素点响应非线性的影响

单像素点响应的非线性会影响测量光强的大小,当探测器存在二次非线性响应误差时,光强可以表示为

$$I' = I + \alpha I + \beta I^2, \quad (6)$$

式中 $I$ 为实际光强, $I'$ 为探测器探测到的光强, $\alpha, \beta$ 分别为归一化线性和二阶非线性误差系数。对于五步算法,将 $I, I'$ 分别代入(2)~(4)式计算,发现 $\tan \phi = \tan \phi'$ ,由此可以看出,五步算法对CCD的线性和二阶非线性误差完全免疫,可以有效地消除由此引起的误差影响<sup>[16]</sup>。

### 2.4.3 CCD的量化误差

根据Brophy<sup>[17]</sup>的计算,一个 $b$ 位的CCD,相移步数为 $n$ 步,其中由于CCD量化位数造成的均方根误差为

$$\sigma_\phi = \frac{2}{\sqrt{3n2^b}}. \quad (7)$$

选用12位以上的CCD,利用五步算法,其造成的波前误差在万分之一波长以下,可以忽略不计。

## 2.5 光源不稳定性误差

### 2.5.1 频率(波长)不稳定影响

不同频率的光经过同一干涉腔时,经历的光程不一样。如果光源的频率不稳定,会在参考光和被测光之间造成光程差,将直接影响最终测量的相位

误差

$$\phi = 2\pi \cdot \frac{\delta_{\text{OPD}}}{\lambda}, \quad (8)$$

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \delta_{\text{OPD}} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} = 2\pi \cdot \delta_{\text{OPD}} \cdot \frac{\Delta\nu}{c} =$$

$$2\pi \cdot \delta_{\text{OPD}} \cdot \frac{\Delta\nu}{\nu} \cdot \frac{1}{\lambda}, \quad (9)$$

式中 $\delta_{\text{OPD}}$ 为参考光和被测光之间的光程差, $\frac{\Delta\nu}{\nu}$ 为光源的频率不稳定性。相位误差与 $\delta_{\text{OPD}}$ 及频率不稳定性的关系如表1所示。

表1 相位误差与 $\delta_{\text{OPD}}$ 及频率不稳定性的关系Table 1 Phase error versus  $\delta_{\text{OPD}}$  and frequency instability

$\delta_{\text{OPD}}$	$\Delta\phi/2\pi$		
	$\Delta\nu/\nu=10^{-9}$	$\Delta\nu/\nu=10^{-10}$	$\Delta\nu/\nu=10^{-11}$
0.01	$1.88 \times 10^{-5}$	$1.88 \times 10^{-6}$	$1.88 \times 10^{-7}$
0.1	$1.88 \times 10^{-4}$	$1.88 \times 10^{-5}$	$1.88 \times 10^{-6}$
1	$1.88 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-4}$	$1.88 \times 10^{-5}$

可以看出,当 $\delta_{\text{OPD}}$ 为1 m时,要使 $\Delta\phi$ 小于 $\lambda/1000$ ,光源频率的稳定性需要优于 $10^{-10}$ 。

### 2.5.2 光强不稳定性

在相移过程中,光源光强会发生随机波动,造成测量值的上下起伏,其误差可以表示为<sup>[17]</sup>

$$\sigma_\phi = \frac{1}{\sqrt{ns}}, \quad (10)$$

式中 $n$ 为相移步数, $s$ 为在相移的时间内光源的稳定性。对于算法大于5步,光源稳定性需要优于1%。

## 2.6 环境控制

在测量过程中,干涉仪难免会受到温度、压力、振动等环境因素的影响。温度和压力的变化会引起激光器谐振腔和空气折射率的变化,不仅对光源的稳定性有影响,更重要的是改变了干涉仪参考光和被测光的光程差,直接影响干涉仪最终的测量结果。另外环境振动会使PZT位移产生误差,使得相移产生误差,这也是影响干涉仪精度的因素之一。为了保证干涉仪的测量精度,必须对干涉仪测量环境进行精密控制,减少外界环境对干涉仪精度的影响。此处主要考虑温度和压力对干涉仪非共光路的影响。

### 2.6.1 温度、压力的影响

温度和气压的变化会改变激光在气体中的折射率,大气折射率与温度和气压的关系可以通过Edlen公式表示为<sup>[18,19]</sup>

$$(n-1)_{t,p} = \frac{p(n-1)}{96095.43} \times \frac{1+10^{-8}(0.613-0.00998t)p}{(1+0.0036610t)}, \quad (11)$$



式中  $t$  为大气温度,  $p$  为大气压强。在  $15\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 折射率的经验公式为

$$(n-1)_{t,p} = \frac{2.8793p}{1+0.003671t} \times 10^{-9}, \quad (12)$$

由此可以分别推出折射率随温度和压力的变化公式为

$$\Delta n = \frac{2.8793\Delta p}{1+0.003671t} \times 10^{-9}, \quad (13)$$

$$\Delta n = \frac{2.8793p \cdot 0.003671 \cdot \Delta t}{(1+0.003671t)^2} \times 10^{-9}. \quad (14)$$

如果干涉仪参考光和探测光的光程差为  $\delta_{\text{OPD}}$ , 则由于折射率变化引起的相位变化为

$$\Delta\phi = \Delta n \cdot \delta_{\text{OPD}} \cdot \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (15)$$

在温度  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $p=1.01325 \times 10^5\text{ Pa}$  时, 温度变化引起的相位变化为

$$\Delta\phi = 11 \times \delta_{\text{OPD}} \times \Delta t. \quad (16)$$

气压变化引起的相位变化为

$$\Delta\phi = 0.027 \times \delta_{\text{OPD}} \times \Delta p. \quad (17)$$

目前温度的控制极限为  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 对于菲佐干涉仪, 不同的面形检测,  $\delta_{\text{OPD}}$  的范围为几毫米到几米之间。可以看出当  $\delta_{\text{OPD}}$  为  $1\text{ m}$  时, 温度变化  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  造成的光程差为  $0.02\lambda$ , 成为限制干涉仪精度的主要因素。如果对于干涉仪或非共光路部分抽低真空, 可以降低空气折射率随温度变化的影响, 降低系统对温控的要求。通过公式可以看到, 如果系统抽真空度小于  $10\text{ Pa}$ , 此时温度变化控制在  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 压力变化小于  $0.1\text{ Pa}$  时, 造成的相位差小于  $\lambda/1000$ 。

### 2.6.2 振动影响

振动是影响干涉仪精度的重要因素之一, 是不可完全消除的。干涉仪光路的振动, 相移过程中 PZT 的振动都会对最终的测量结果产生影响。4D 公司生产的动态干涉仪通过同时采集 4 幅图像<sup>[20]</sup>, 降低了振动的影响。但是其工艺过程相对复杂, 精度受限于相位调制器件, 一般在  $\lambda/40$  以内。亚利桑那大学的 Mirror 实验室则利用振动来产生相移, 快速采集多幅图像, 从中选择  $\pi/2$  倍数的图像进行计算, 在球场看台上实现了很好的测量效果。相对于干涉仪采样频率, 不同频率的振动造成的误差也不相同。实验室中高频的振动一般可以通过隔振平台消除, 低频的振动影响可以通过算法进行消除。通过傅里叶变换, 分析相位误差形式, 利用最小二乘法或者迭代的方法可以确定振动系数, 对测量结果进行修正。ZYGO 公司的 VC 算法就是基于这一原理, 其模拟计算表明, 当振动幅度小于  $0.1\text{ rad}$  时,

低频振动造成的影响小于  $0.001\lambda$ <sup>[21]</sup>。

## 3 结 论

通过对干涉仪的误差源进行理论分析和计算模拟, 给出了各误差源对干涉仪测量精度的影响。在干涉仪研制中, 光源、相移误差、探测器高阶非线性响应都对干涉仪的精度有影响, 但是在目前的技术条件下不是影响干涉仪精度的主要因素。参考面的研制是限制目前干涉仪精度的主要因素之一, 也是研制干涉仪过程中的主要技术难点。环境的影响是限制干涉仪精度的另外一个主要因素, 温度、压力以及振动的控制是保证干涉仪精度的必要条件。在恒温、恒压和消除外界振动的条件下, 通过绝对检测标定出参考面绝对面形, 可以降低干涉仪对参考面精度的要求, 满足光刻物镜镜头的检测要求。

## 参 考 文 献

- 1 T. Matsuyama, Y. Ohmura, D. M. Williamson. The lithographic lens: its history and evolution[C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 24~37
- 2 D. Bernd, S. Günther. Interferometric testing of optical surfaces at its current limit[J]. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2001, **112**(9): 392~398
- 3 J. Schwider, R. Burow, K. E. Elssner *et al.*. Digital wavefront measuring interferometry: some systematic error sources[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21): 3421~3432
- 4 P. Hariharan, B. F. Oreb, T. Eiju. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(13): 2504~2506
- 5 R. Lord. Interference bands and their application[J]. *Nature*, 1893, **48**(1235): 212~214
- 6 H. Medeck, E. Tejnil, K. A. Goldberg. Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12): 1526~1528
- 7 Ma Qiang, Liu Weiqi, Li Xiangbo *et al.*. Analysis of diffraction wavefront error in point diffraction interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2321~2324  
马强, 刘伟奇, 李香波等. 点衍射干涉仪中小孔衍射波面误差分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2321~2324
- 8 R. Schreiner, J. Schwider, N. Lindlein. Absolute testing of the reference surface of a Fizeau interferometer through even/odd decompositions[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(32): 6134~6141
- 9 M. Vannoni, G. Molesini. Three-flat test with plates in horizontal posture[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(12): 2133~2145
- 10 A. E. Jensen. Absolute calibration method for laser Twyman-Green wavefront testing[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63**(10): 1313
- 11 G. Schultze, J. Schwider. *Progress in Optics*[M]. Amsterdam: North-Holland, 1976
- 12 S. Fritz. Absolute calibration of an optical flat[J]. *Opt. Enging.*, 1984, **23**(4): 379~383
- 13 D. Malacara. *Optical Shop Testing*[M]. New York: Wiley Press, 1978
- 14 Chen Xu, Lei Chen, Yin Jiayi. Method for absolute flatness measurement of optical surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(13): 2536~2541
- 15 U. Griesmann, Quandou Wang, J. Soons *et al.*. A simple ball

- averager for reference sphere calibrations [C]. *SPIE*, 2005, **5869**: 58690S
- 16 Zhou Libing, Su Xianyu, Wang Liwu. Analysis of errors introduced by detector nonlinearity in phase measuring profilometry[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(3): 19~21  
周历兵, 苏显渝, 王力无. 相位测量轮廓术中探测器非线性误差的分析[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(3): 19~21
- 17 C. P. Brophy. Effect of intensity error correlation on the computed phase of phase-shifting interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(4): 537~541
- 18 B. Edlen. The refractive index of air[J]. *Metrologia*, 1966, **2**: 71~80
- 19 K. P. Brich, M. J. Downs. Correction to the updated edlen equation for the refractive index of air[J]. *Metrologia*, 1994, **31**: 315~316
- 20 J. Millerd, N. Brock, J. Hayes. Pixelated phase-mask dynamic interferometer[C]. *SPIE*, 2004, **5531**: 304~314
- 21 L. D. Leslie. Suppressing phase errors from vibration in phase-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(20): 3948~3960