

doi:10.3788/gzxb20184701.0112002

# 点源异位同步移相法检测平行平晶的光学均匀性

张瑞, 陈磊, 朱文华, 孟诗, 郑东晖, 孙沁园

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

**摘 要:** 为了避免平行平晶测量时前后表面干涉的影响, 基于点源异位同步移相原理, 提出一种均匀性绝对测量方法。测量分为平行平晶前后表面干涉测量、平晶透射波前测量、干涉仪空腔测量三步。每步通过在同一时刻抓拍的四幅移相干涉图恢复波前, 最终由三次测量结果计算平行平晶的均匀性分布。在非抗振平台上测试了一块厚度为 60mm 的光学平行平晶, 被测样品均匀性偏差的峰谷值为  $\Delta n_{PV} = 3.32 \times 10^{-6}$ , 均方根值为  $\Delta n_{RMS} = 2.63 \times 10^{-7}$ 。检测结果与波长调谐干涉仪测量结果的峰谷值偏差为  $\Delta PV = 5 \times 10^{-7}$ , 均方根值偏差为  $\Delta RMS = -7 \times 10^{-9}$ , 具有较高的一致性。所提方法在环境振动条件下对平行平晶均匀性检测精度可达  $1 \times 10^{-6}$ 。

**关键词:** 动态干涉测量; 同步移相; 平行平晶; 光学均匀性; 绝对检测

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)01-0112002-8

## Measuring Optical Homogeneity of Parallel Plates Based on Simultaneous Phase-shifting by Lateral Displacement of Point Sources

ZHANG Rui, CHEN Lei, ZHU Wen-hua, MENG Shi, ZHENG Dong-hui, SUN Qin-yuan

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China)

**Abstract:** In order to avoid the influence of the interference noise introduced by the front and rear surfaces while measuring the parallel plate, an absolute measurement method for the optical homogeneity was proposed based on the principle of phase shifting by lateral displacement of the point source. Three steps of the proposed method are as follows: the front and rear surfaces of the parallel plate interference measurement, the transmission wavefront through the parallel plate measurement and the empty cavity of the interferometer measurement. The wavefront is recovered by four phase-shifting interferograms captured at the same time and the homogeneity distribution of the parallel plate could be calculated according to the measurement results. An optical parallel plate with a thickness of 60mm was tested on a vibration non-isolated platform and the measurement result indicates that the peak-to-valley value is  $\Delta n_{PV} = 3.32 \times 10^{-6}$  and root-mean-square value is  $\Delta n_{RMS} = 2.63 \times 10^{-7}$ . Compared with the results obtained by the wavelength tuning interferometer, the deviation of the peak-to-valley value is  $\Delta PV = 5 \times 10^{-7}$  and the deviation of the root-mean-square value is  $\Delta RMS = -7 \times 10^{-9}$ . The measurement results are in good agreement with those obtained by wavelength tuning interferometer. The measurement accuracy of homogeneity obtained by the proposed method is  $1 \times 10^{-6}$  under vibration conditions.

**Key words:** Dynamic interferometry; Simultaneous phase-shifting; Parallel plate; Homogeneity; Absolute measurement

**OCIS Codes:** 120.0120; 120.3180; 120.3940; 120.4820; 120.5050

## 0 引言

光学均匀性是光学材料的重要指标, 表示同一块光学材料内部折射率的不一致性。对于光学系统而言,

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.U1731115)和国家重大科学仪器开发专项(No.2013YQ150829)资助

**第一作者:** 张瑞(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为动态干涉测量技术。Email: zhangruinjust@njust.edu.cn

**导师(通讯作者):** 陈磊(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学计量测试与光电智能化仪器。Email: chenlei@njust.edu.cn

**收稿日期:** 2017-07-29; **录用日期:** 2017-09-30

<http://www.photon.ac.cn>

光学材料的均匀性分布直接影响透射波前的质量<sup>[1-4]</sup>.在光学加工制造过程中,玻璃融化过程<sup>[5]</sup>、热力学不平衡造成的密度变化以及退火温度梯度形成的永久性应力都将造成光学玻璃折射率的非均匀分布<sup>[6]</sup>.目前光学材料均匀性定量测量方法可以分为一般测量方法和绝对测量方法.一般测量是指测试结果包含样品抛光面形误差、贴置板面形误差以及测试仪器标准参考镜面形误差等,如 Wyant 等提出的翻转测量法<sup>[7]</sup>.绝对测量是指测试结果中去除了上述面形误差,从而获得样品光学均匀性的绝对分布,如 Schwider 等提出的透射测量法<sup>[8]</sup>、波长调谐干涉测量法<sup>[9-10]</sup>等.

对于光学平行平晶而言,其前后表面干涉给均匀性测量带来很大困难.传统的抑制前后表面干涉影响的方法是抑制后表面的反射.例如在待测样品后表面涂抹凡士林或其它折射率液,防止不必要的光束参与干涉<sup>[7]</sup>.通过这样的处理,传统的翻转测量法也可以应用于平行平晶的光学均匀性测量.但该方法除了操作复杂,还有很大的局限性,比如有些光学表面不允许涂抹折射率液.为了在空间或时间上避开平晶前后表面干涉的影响,还可以采用特殊的光学结构. Tentori 等研究的全息法对被测样品前、后反射面的光波进行记录并再现分析,可以计算出被测件的均匀性分布<sup>[11]</sup>.该方法的缺点是测量周期长,操作复杂; deGroot 等提出的光栅干涉仪使用两片衍射光栅将相干光束定位于待测面处,避免了其它面的相干干扰,可以得到待测件均匀性分布.该方法所得到的干涉条纹图等效波长太长,难以实现对面形的高精度测量<sup>[12]</sup>; Novak 等提出的短相干偏振光干涉方法也可以实现平行平晶光学均匀性的测量且避开其它面的干扰,并已成功应用于 4D 公司 FizCam2000 型干涉仪<sup>[13]</sup>.该方法在共光路的干涉系统中难以消除不参与干涉的背景光以及材料内部应力的影响<sup>[14]</sup>; Deck 等提出的波长调谐相移干涉术通过改变激光器出射波长实现移相,干涉图内包含了多波面的干涉,可以同时测量多个光学表面的面形<sup>[10]</sup>.该方法已成功应用于翟柯莱姆达公司 Verifire™ 系列 MST 激光干涉仪,但其属于时域移相干涉术,测量易受环境震动、气流扰动等时变因素影响.在我国神光项目中,使用时域移相干涉方法对大口径平晶的均匀性进行测量时,由于干涉腔的体积较大,环境振动以及气流扰动对测量结果影响明显,难以保证测量结果的重复性.

本文提出了一种基于点源异位同步移相原理<sup>[15]</sup>的平行平晶光学均匀性绝对测量方法.该方法采用动态斐索干涉仪,通过三步测量完成对平行平晶光学均匀性的绝对检测.由于采用动态干涉测量系统,该方法可以抑制环境振动、空气扰动等时变因素的干扰.

## 1 原理

### 1.1 平行平晶光学均匀性绝对测量方法

本文提出的平行平晶光学均匀性绝对测量方法如图 1,测量步骤为:

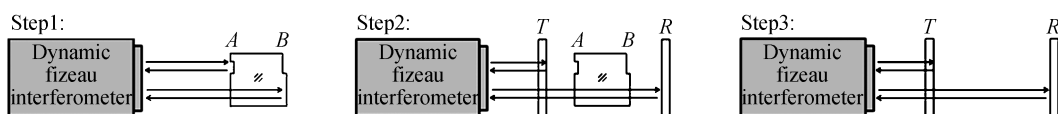


图 1 测量步骤

Fig.1 Measurement procedure

1) 平晶前后表面干涉测量.使用动态斐索干涉仪对平行平晶前后表面组成的干涉腔波像差进行测量,记  $W_1(x, y)$ .  $W_1(x, y)$  包含了平晶前、后表面面形误差  $A(x, y)$  和  $B(x, y)$  以及平晶均匀性误差  $\Delta n(x, y)$ .对于折射率为  $n$ 、厚度为  $h$  的待测样品,  $W_1(x, y)$  表示为

$$W_1(x, y) = 2n[B(x, y) - A(x, y)] + 2h\Delta n(x, y) \quad (1)$$

需要指出的是,本方法解决了传统压电陶瓷移相难以在单独测量平行平晶时引入相移的难题,可以完成平晶前后表面动态干涉测量.

2) 样品透射波像差测量.使用动态斐索干涉仪测量透过上述待测平行平晶后经反射平晶工作面返回的波像差,记  $W_2(x, y)$ .  $W_2(x, y)$  表示为

$$W_2 = 2R(x, y) - 2T(x, y) + 2(n-1)[B(x, y) - A(x, y)] + 2h\Delta n(x, y) \quad (2)$$

式中  $T(x, y)$ 、 $R(x, y)$  分别为干涉仪参考平晶、反射平晶的面形误差.测量时,为避免待测平晶前后表面返回光干扰,需将待测件转动一微小角度 ( $5' \sim 10'$ ).

3) 干涉仪空腔测量.测量由参考平晶工作面 and 反射平晶工作面构成的干涉腔的波像差,记为  $W_3(x, y)$ .

$W_3(x, y)$ 表示为

$$W_3 = 2R(x, y) - 2T(x, y) \quad (3)$$

综合上述三步测量结果,计算平行平晶的光学均匀性分布  $\Delta n(x, y)$  为

$$\Delta n(x, y) = \frac{n(W_2(x, y) - W_3(x, y)) - (n-1)W_1(x, y)}{2h} \quad (4)$$

## 1.2 点源异位同步移相测量波像差原理

在 1.1 节中,步骤 1)需单独测量平行平晶前后表面的干涉结果.由于样品厚度固定,常规方法难以在样品前后表面之间引入相移,无法完成测量.本文使用点源异位同步移相方法解决上述难题,同时完成对各步骤波像差的测量.

点源异位同步移相原理如图 2(a).放置于干涉仪准直物镜物方焦面处的点光源  $S_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 垂直于光轴的偏移量为  $d_i$ , 经过准直物镜其出射波前为倾斜的平面波,传播方向与光轴夹角为  $\theta_i$ .当  $\theta_i \rightarrow 0$  时,出射波前经干涉仪的参考面和测试面反射后形成干涉,相干波前的位相差  $\varphi(d_i)$  表示为

$$\varphi(d_i) = \phi + 2kl \cos \theta_i \approx \phi + 2kl \left(1 - \frac{\theta_i^2}{2}\right) \approx \phi + 2kl - \frac{kl}{f^2} d_i^2 \quad (5)$$

式中,  $\phi$  为待测波像差,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长,  $l$  为干涉腔的光学长度,  $\theta_i \approx \frac{d_i}{f}$  为出射平行光的倾角,  $f$  为准直物镜的焦距,  $d_i$  为点光源  $S_i$  与光轴的横向偏移量.相比于点光源处于光轴上的情况,由于  $S_i$  偏移引入的相移增量  $\Delta\varphi(d_i)$  表示为

$$\Delta\varphi(d_i) = -\frac{kl}{f^2} d_i^2 \quad (6)$$

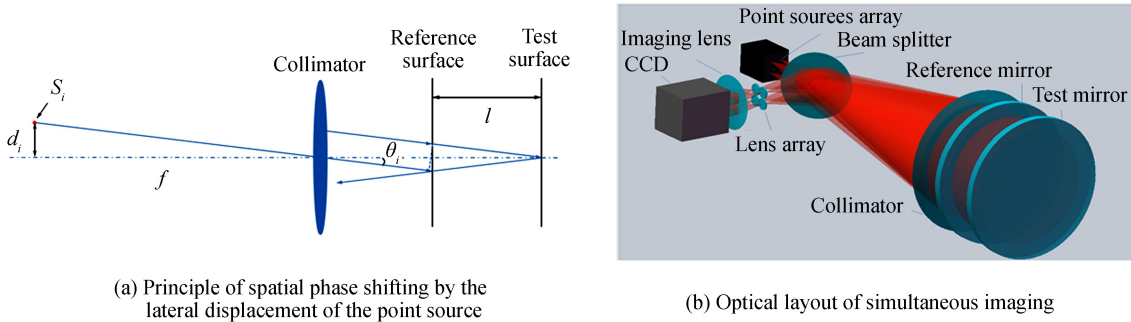


图 2 同步移相测量波像差原理

Fig.2 Principle of measuring the wavefront aberration based on simultaneous phase shifting

将四个点光源  $S_i$  置于正方形四个顶点处并放置在准直物镜焦面上,做整体调节使得各点光源相对于光轴有不同的偏移量  $d_i$ , 根据式(6), 四个点光源分别在参考光与测试光之间引入不同的位相差, 实现四幅干涉图的同步移相.另通过计算确定  $d_i$ , 可获得四幅移相步长为  $\pi/2$  的移相干涉图<sup>[15]</sup>.

如图 2(b)为干涉仪同步成像光路.四组倾角各异的相干光准直后经分束器进入成像系统, 每组相干光独立通过放置在准直物镜焦面处的  $2 \times 2$  透镜阵列中不同的透镜, 经成像透镜同步成像在同一 CCD 靶面, 得到四幅空间分离的移相干涉图.采用四步移相干涉术即可解算待测波像差.

## 2 实验

根据上述原理,搭建如图 3(a)所示的动态斐索干涉仪,使用本文方法测量平行平晶的光学均匀性.实验装置如图 3(b),干涉仪的口径为 100 mm,激光器工作波长  $\lambda = 532$  nm.被测件为  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  熔石英光学平行平晶,折射率  $n = 1.461$  (@532 nm).测量过程的环境温度为  $20^\circ\text{C}$ .如图 4 所示, (a)、(b)、(c) 分别为步骤 1)至步骤 3)采集到的干涉图.均匀性测量结果如图 4(d), 因均匀性偏差引入的波像差的峰谷值  $\Delta W_{\text{PV}} = 199.2$  nm, 均方根值  $\Delta W_{\text{RMS}} = 15.8$  nm.考虑到平晶厚度,最终得到被测平行平晶光学均匀性的峰谷值  $\Delta n_{\text{PV}} = 3.32 \times 10^{-6}$ , 均方根值  $\Delta n_{\text{RMS}} = 2.63 \times 10^{-7}$ .

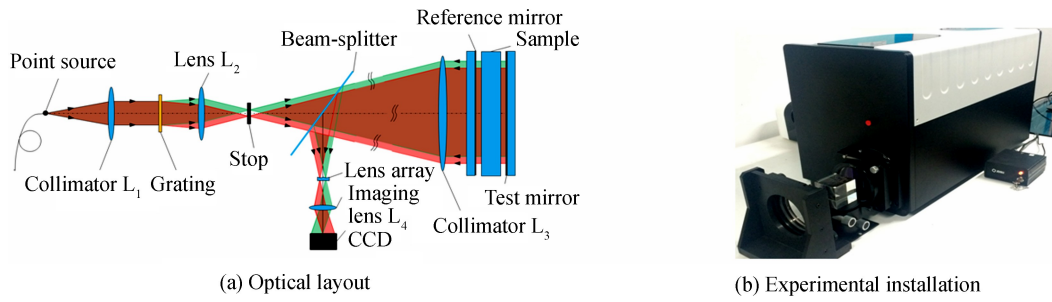


图3 动态斐索干涉仪

Fig.3 Dynamic Fizeau interferometer

在相同环境温度下,用光学平台隔离环境震动,使用翟柯莱姆达公司 Verifire™系列 MST 波长调谐移相干涉仪测量同一块光学平行平晶,如图 4(e)所示,因均匀性偏差引入的波像差峰谷值  $\Delta W_{PV} = 166.4 \text{ nm}$ ,均方根值  $\Delta W_{RMS} = 16.2 \text{ nm}$ .由此得到被测平行平晶光学均匀性峰谷值  $\Delta n_{PV} = 2.77 \times 10^{-6}$ ,均方根值  $\Delta n_{RMS} = 2.70 \times 10^{-7}$ .

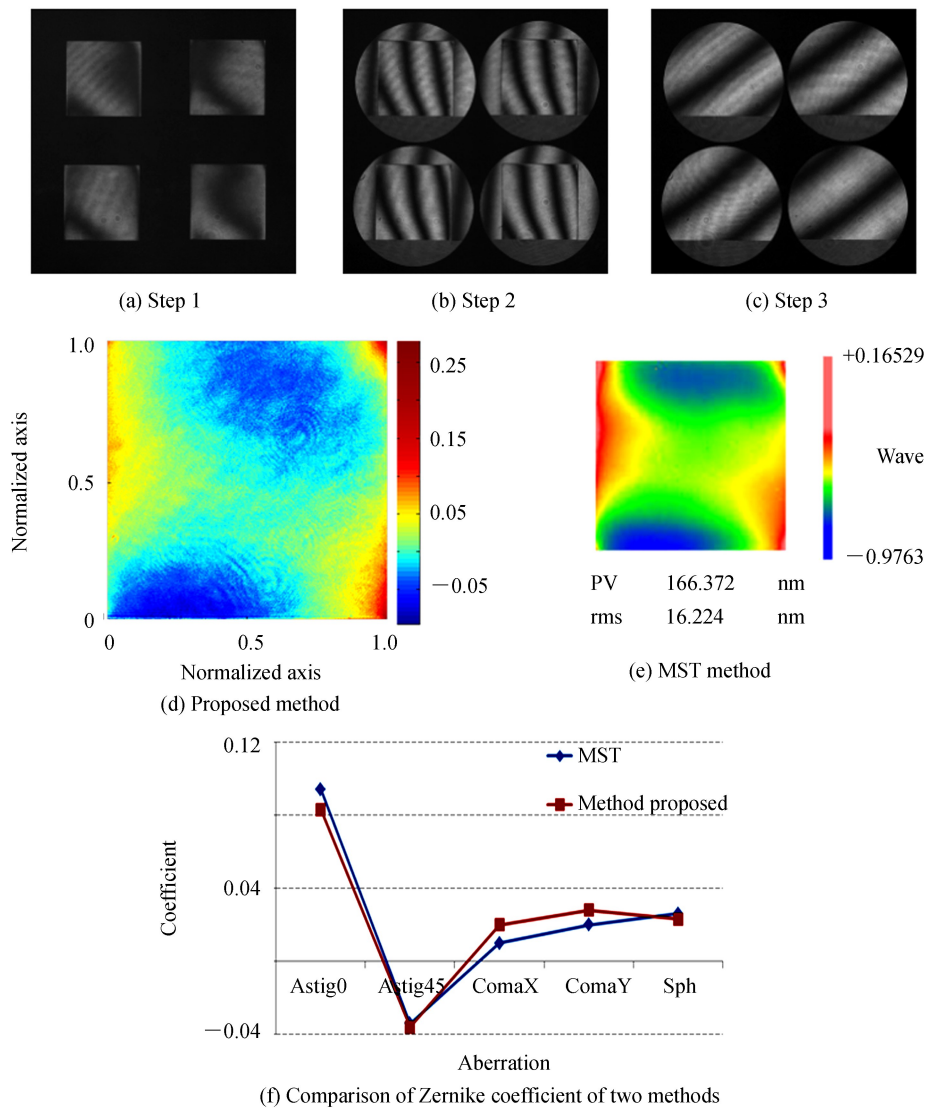


图4 实验结果

Fig.4 Experimental results

由图 4(d)、(e)可以看出两种方法测量的均匀性分布基本一致,其  $0^\circ$ 像散、 $45^\circ$ 像散、X 轴彗差、Y 轴彗差及球差的 Zernike 系数如图 4 (f),各项系数基本相同.表 1 给出了得到的均匀性结果数值对比,其峰谷值偏



差  $\Delta PV=5 \times 10^{-7}$ , 均方根值偏差  $\Delta RMS=-7 \times 10^{-9}$ , 两种方法差别极小.

表 1 两种方法测量结果对比

Table 1 Measurement results of two methods

|     | Absolute method proposed | MST interferometer    | Difference          |
|-----|--------------------------|-----------------------|---------------------|
| PV  | $3.32 \times 10^{-6}$    | $2.77 \times 10^{-6}$ | $5 \times 10^{-7}$  |
| RMS | $2.63 \times 10^{-7}$    | $2.70 \times 10^{-7}$ | $-7 \times 10^{-9}$ |

实验结果表明, 本文方法能够实现对平行平晶光学均匀性的高精度检测.

### 3 讨论

平晶光学均匀性测量误差源主要有: 环境温度误差、材料折射率误差<sup>[7]</sup>、干涉仪随机噪声误差<sup>[9]</sup>、光线偏离误差<sup>[16]</sup>等. 针对本文测量方法的特点, 重点讨论波像差错位引入的误差以及时空结合移相抑制波像差测量误差.

#### 3.1 波像差错位引入的误差

在平行平晶光学均匀性的测量过程中, 三步测量的相干波面之间光程差不同. 根据 1.2 节所述点源异位同步移相测量波像差原理, 为了实现等间隔移相, 结合式(6)得到针对不同的干涉腔长, 光源系统需要在垂直于光轴的平面内移动. 当光源移动量较大时, 成像系统也需做相应的微小垂轴移动, 由此导致四幅干涉图在 CCD 靶面上产生平移, 需要对干涉图的横向位置重新配准. 通过选取合适的腔长, 使干涉空腔略大于被测件厚度, 则步骤一、步骤二的干涉腔长度基本相等, 而步骤三中干涉仪空腔的长度与之相差较大, 需在该步骤测量重新对干涉图的横向位置进行配准. 不失一般性, 不妨设步骤三的波像差在  $x$  方向有一微小的位移  $\Delta x$ , 如图 5. 根据测量原理, 光学均匀性的测试结果表示为

$$\Delta n'(x, y) = \frac{n(W_2(x, y) - W_3(x + \Delta x, y)) - (n-1)W_1(x, y)}{2h} \quad (7)$$

结合式(4), 由于波像差错位而引入的误差表示为

$$e(x, y) = -\frac{n}{2h} [W_3(x + \Delta x, y) - W_3(x, y)] \quad (8)$$

根据式(8), 光学均匀性的测量误差与波像差的错位量成正比.

在对干涉图的空间位置进行精确匹配时, 结合 Hassan Foroosh 等<sup>[17]</sup>提出的位置匹配算法可以将干涉图的位置匹配精度控制在一个像素以内. 由图像处理算法可知, 图像分辨率越高, 图像的位置匹配越准确. 为了定量分析波像差形状及图像分辨率对测量的影响, 以五种基本像差表示步骤三获取的波像差, 将其在  $x$  方向上偏移一个像素, 计算由此带来的平行平晶均匀性测量误差. 用 Zernike 多项式给出球差、 $0^\circ$  像散、 $45^\circ$  像散、 $X$  轴彗差以及  $Y$  轴彗差, 其峰谷值均为  $PV = \lambda/10$ , 波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ . 设平行平晶的折射率  $n = 1.461$ , 厚度为  $60 \text{ mm}$ . 图 6 给出了在上述 5 种被测波像差情况下, 被测平晶在靶面上所占横向像素数与平行平晶均匀性测量误差之间的关系曲线.

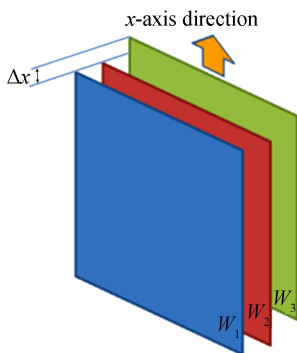


图 5 波像差错位示意图

Fig.5 Schematic diagram of wavefront offset

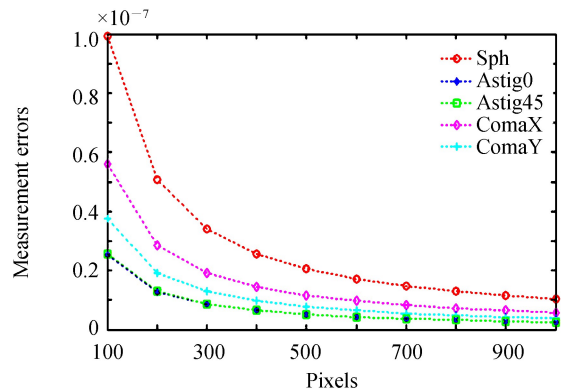


图 6 不同像差和相机分辨率下的测量误差

Fig.6 Measurement errors under different aberrations and resolutions

由上述仿真结果可以看出,当空腔测量波像差包含球差时,引入的均匀性测量误差最大.另外,当本文所述测量系统使用的 CCD 相机分辨率达到  $2\,000 \times 2\,000$  时,即单幅干涉图的分辨率为  $1\,000 \times 1\,000$ ,空腔测量波像差的偏移对均匀性测量结果的影响可以控制在  $0.15 \times 10^{-7}$  以内.

### 3.2 时空结合移相抑制波像差测量误差

测量波像差时,由于分光结构造成的光强不一致以及成像透镜阵列加工与装调的不一致性,测量结果中会引入微小的测量误差.为了提高均匀性测量精度,本文采用时空结合移相的方法抑制波像差测量误差.

该方法将上述误差源的影响视作一个复杂的整体,对于移相干涉术而言,位相计算结果均是两个数值比值的反正切,一般可表达为<sup>[18]</sup>

$$\tan(\varphi') = \frac{y_0 + a_y \sin(\varphi + \delta)}{x_0 + a_x \cos\varphi} \quad (9)$$

式中,  $x_0, y_0, a_x, a_y$  以及  $\delta$  表示各误差源带来的综合影响.文献[19]仿真并讨论了上述每个参数对最终波像差带来的误差影响,并指出所有波像差误差均是周期性的.从而在动态斐索干涉测量装置中,多次测量结果的平均可以抑制波像差测量误差.

在本方法步骤 2)透射测量和步骤 3)空腔测量中,环境振动将会在测量结果中引入倾斜以及常数位相.由于振动在测量过程中属于时变因素,不同时刻振动所引入的相移是不同的,此时可将振动视作一个时间移相器.如果振动引起的相移大于  $2\pi$ ,利用时空结合移相方法能够很好地抑制波像差误差.如图 7,步骤 2)透射测量的单次测量结果与采用时空结合移相测量结果偏差的  $PV=0.057\lambda$  ( $\lambda=532\text{ nm}$  下同)、 $RMS=0.007\lambda$ ,步骤 3)空腔测量的单次测量结果与采用时空结合移相测量结果的偏差为  $PV=0.028\lambda$ 、 $RMS=0.004\lambda$ .从测量结果可以看出,波纹状测量误差及相干噪声得到有效抑制.

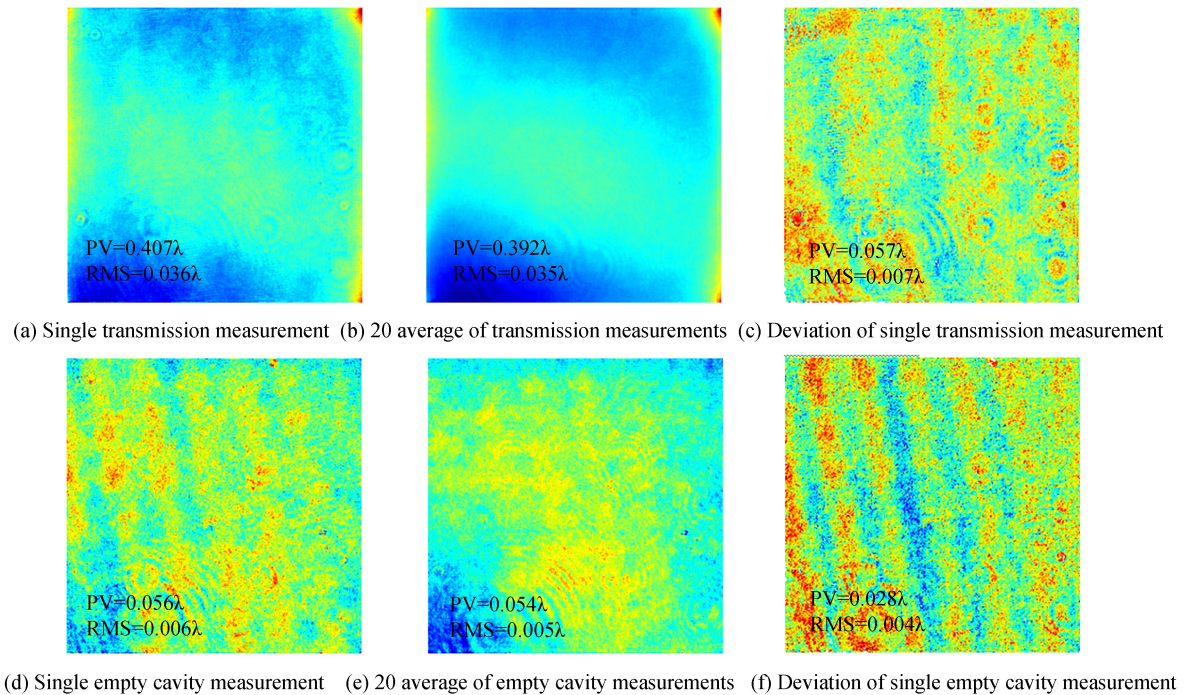


图 7 时空结合移相抑制步骤 2)和步骤 3)波像差误差

Fig.7 Spatial-temporal phase shifting interferometry suppressing errors of Step 2 and Step 3

对于步骤 1),平晶前后表面的干涉测量,由于平晶厚度固定,环境振动不能引入时间相移.此时,多次平均不能消除测量误差.为此,采用波长调制方法引入时间相移,从而抑制波像差测量误差.实验上,在干涉图对比度基本不变的前提下,只需改变半导体激光器的工作电流即可实现系统的波长改变,对固定干涉腔长即可引入时间相移.如图 8,单次测量结果与采用时空结合移相的测量结果的偏差为  $PV=0.098\lambda$ 、 $RMS=0.016\lambda$ ,测量误差得到有效抑制.

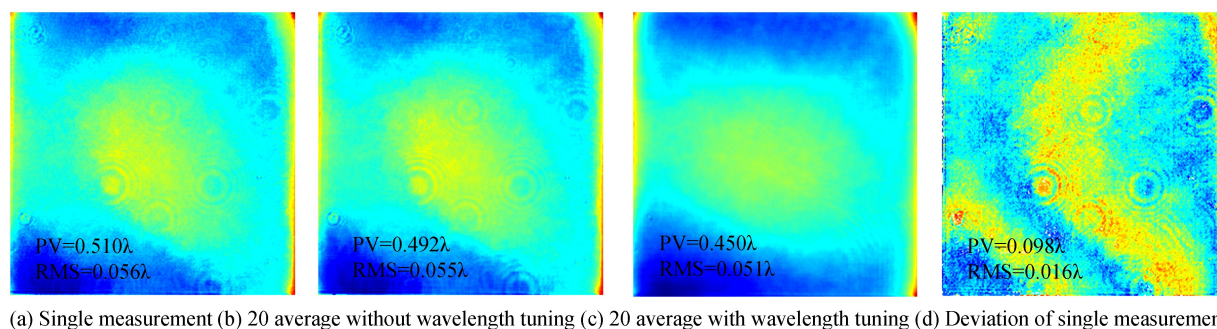


图 8 时空结合移相抑制步骤 1) 波像差误差  
Fig.8 Spatial-temporal phase shifting interferometry suppressing errors of Step 1

## 4 结论

基于点源异位同步移相原理提出了一种平行平晶光学均匀性检测方法.通过三步测量,实现平行平晶光学均匀性的绝对测量.相较于传统采用压电陶瓷作为移相器的干涉仪,本方法解决了在单独测量平行平晶前后表面干涉波像差时难以引入相移的难题.与波长调谐干涉测量方法相比,本方法可以抵抗环境振动等时变因素的影响,实现波像差的动态测量.此外,所采用的时空结合移相方法可以将振动视为移相器,有效地抑制了系统的测量误差,提高了测量精度.相较于短相干偏振测量方法,本方法分离了材料应力带来的影响且不引入额外的背景光,提高了干涉条纹的对比度.结果表明,本方法对平行平晶光学均匀性测量精度可以达到  $1 \times 10^{-6}$ .

## 参考文献

- [1] XU Chun-mei, LIU Bing-qi, HUANG Fu-yu, *et al.* New correction method for transmission-type misalignment optical system based on aberration theory[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(10):3020-3024.  
徐春梅, 刘秉琦, 黄富瑜, 等. 考虑像差影响的透射式光学系统失调校正方法[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(10):3020-3024.
- [2] WANG Ping, TIAN Wei, WANG Ru-dong, *et al.* Influence of mounting stress on wavefront distortion of lithographic object lens[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(1):57-63.  
王平, 田伟, 王汝冬, 等. 支撑应力对光刻透镜透射波前畸变的影响[J]. *中国光学*, 2013, **6**(1):57-63.
- [3] WANG Hong, TIAN Tie-yin. Miniature design of  $5 \times$  zoom optical system[J]. *Chinese Optics*, 2014, **7**(2):315-319.  
王红, 田铁印. 5倍变焦距光学系统小型化设计[J]. *中国光学*, 2014, **7**(2):315-319.
- [4] YANG Ming-yang, YANG Hong-tao, QU Rui, *et al.* Design of high ratio middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(5):0522003.  
杨明洋, 杨洪涛, 曲锐, 等. 80倍中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *光子学报*, 2017, **46**(5):0522003.
- [5] LIU Yong-hua, ZU Cheng-kui, ZHAO Hua, *et al.* Melting technology of chalcogenide glass for infrared thermal imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(5):1472-1476.  
刘永华, 祖成奎, 赵华, 等. 红外热成像系统用硫系玻璃的熔制技术[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(5):1472-1476.
- [6] REITMAYER F, SCHUSTER E. Homogeneity of optical glasses[J]. *Applied Optics*, 1972, **11**(5):1107-1111.
- [7] CHIAYU A, JAMES C W. Measurement of the inhomogeneity of a window[J]. *Optical Engineering*, 1991, **30**(9):1399-1404.
- [8] GORELOV A V, EGOROVA E S, LAVRENT'EV E S, *et al.* Monitoring the optical homogeneity of materials for the IR region[J]. *Journal of Optical Technology*, 2014, **81**(9):551-555.
- [9] SCHWIDER K M J. Interferometric homogeneity test using adaptive frequency comb illumination[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(9):1897-1912.
- [10] DECK L L. Multiple-surface phase-shifting interferometry[C]. SPIE, 2001, **4454**:424-431.
- [11] TENTORI D. Homogeneity testing of optical glass by holographic interferometry[J]. *Applied Optics*, 1991, **30**(7):752-755.
- [12] GROOT P J D. Grating interferometer for flatness testing[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(3):228-230.
- [13] MIKE Z. Measuring homogeneity with the FizCam 2000[EB/OL]. [2017-09-05]. <https://www.4dtechnology.com/applications/reflibrary/>.
- [14] NOVAK M, MILLERD J, BROCK N, *et al.* Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer.[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(32):6861-6868.
- [15] ZHU Wen-hua, CHEN Lei, ZHENG Dong-hui, *et al.* Dynamic Fizeau interferometer based on the lateral displacements



- of the point sources[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2017, **91**:216-220.
- [16] ZHENG Dong-hui, CHEN Lei, SUN Qin-yuan, *et al.* Absolute measurement for optical inhomogeneity of parallel plate using phase-shifting interferometry[J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(12):124103(1-6).
- [17] FOROOSH H, ZERUBIA J B, BERTHOD M. Extension of phase correlation to subpixel registration[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(3):188-200.
- [18] KIMBROUGH. B, BROCK. N, MILLERD. J. Dynamic surface roughness profiler[J]. *SPIE*, 2011:**8126**(4):262-267.
- [19] ZHU Wen-hua, CHEN Lei, ZHU Ri-hong, *et al.* Spatial-temporal phase shifting interferometry: suppressing phase errors in dynamic Fizeau interferometer[C]. *SPIE*, 2017, **10329**:1032909.