

# 光学材料光学均匀性的波长调谐两步绝对测量法

李建欣 郭仁慧 朱日宏 陈磊 何勇

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 光学均匀性是光学材料的重要指标,目前高精度的测量方法一般采用绝对测量法,而该方法步骤繁琐,容易受环境影响。根据波长移相干涉仪的移相特点,提出了测量光学材料光学均匀性的波长调谐两步绝对测量法。该方法在波长移相干涉仪中通过平行平板放入测量和空腔测量两个步骤得到平行平板的光学均匀性。在模拟仿真验证方法的正确性后,进行了实验研究,并与传统的绝对测量法的测量结果进行比较。结果表明,波长调谐两步绝对测量法可用于测量平行平板的光学均匀性,且测量步骤简单,精度较高。

**关键词** 测量;两步绝对测量方法;波长调谐;光学均匀性

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1112007

## Two-Step Wavelength Tuning Absolute Testing Method of the Optical Homogeneity of Optical Material

Li Jianxin Guo Renhui Zhu Rihong Chen Lei He Yong

(Institute of Electronic Engineering and Photoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** Optical homogeneity is one of the most important parameters of optical material. The traditional absolute testing method is considered to be the high-precision way of optical homogeneity measurement. However its corresponding operation procedure is very complex. So it is sensitive to the environmental fluctuation. Based on the characteristics of wavelength tuning, two-step wavelength tuning absolute testing method of the optical homogeneity is presented. It only consists of two measurement steps, with and without the parallel plate as the material in the test arm cavity between transmission flat and reflective flat. The presented method is verified in terms of numerical simulation. And the measurement experiments with both the traditional absolute testing method and the presented method are carried out. In the end, the experimental result shows the validity of the presented testing method. After comparison, it is clear to see that the presented method is of high precision, which is simpler than the traditional one.

**Key words** measurement; two-step absolute testing algorithm; wavelength tuning; optical homogeneity

**OCIS codes** 120.5050; 070.2615; 100.5070; 120.3180

## 1 引 言

光学材料的光学均匀性指同一块光学材料内部折射率的不一致性,通常用其折射率的最大差值表示。它是非常重要的玻璃质量指标,因为它直接影响透射光学系统的波面质量,改变系统的波像差。随着国家重大光学工程项目的开展,高精度测量光学材料的光学均匀性,尤其是高精度测量大口径光

学材料光学均匀性的要求日益迫切。在众多测量光学均匀性的方法中,干涉法是精度最高的测量方法。干涉法测量光学材料光学均匀性包括直接测量法、样品翻转法和绝对测量法等,其中绝对测量法精度最高<sup>[1~6]</sup>。绝对测量法又包括 3 种方法,其中当被测件平行度较差时,测量包括 4 个步骤;当被测件平行度很好时,测量包括 3 个步骤<sup>[7]</sup>。

收稿日期: 2012-04-27; 收到修改稿日期: 2012-06-27

作者简介: 李建欣(1977—),男,博士,讲师,主要从事干涉仪成像光谱技术和光学精密测试技术等方面的研究。

E-mail: ljt@vip.163.com

目前,以压电陶瓷实现移相的硬件移相干涉仪应用最为广泛,然而当测量大口径光学材料的光学均匀性时,以压电陶瓷推动参考镜会带来较大误差。波长移相干涉仪通过激光光源波长的改变实现移相,可以有效地解决这样的问题,简化干涉仪的机械结构。同时,利用波长移相干涉仪进行测量时,通过算法可以将由多个面形成的干涉条纹分离<sup>[8~15]</sup>,只需两个步骤即可完成测量,这对于大口径光学材料的测量具有重要意义。

近几年,南京理工大学一直在研制波长移相干涉仪,目前已研制出口径 100 mm 和 600 mm 的波长移相干涉仪<sup>[16]</sup>。在此基础上,本文展开了利用波长移相干涉仪测量平行平板光学均匀性的研究,提出了波长调谐两步绝对测量法。通过模拟仿真验证了方法的正确性后,再通过实验与传统的绝对测量法进行比较,结果表明该方法可以高精度地实现平行平板光学均匀性的测量。

## 2 光学均匀性的波长调谐两步绝对测量法的原理

菲佐型波长移相干涉仪测量平行平板的光路如图 1 所示(干涉仪主机部分未画出)。设平板的厚度为  $t$ ,折射率为  $n$ ,光学均匀性为  $\Delta n$ ,透射参考平面(TF)到平板前表面的距离为  $L_1$ ,反射参考平面(RF)到平板后表面的距离为  $L_2$ 。用  $T$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $R$  分别表示 TF 的反射面、平板的前、后表面、RF 的反射面的面形。若不考虑多次反射,干涉条纹由  $T$  和  $A$

干涉, $A$  和  $B$  干涉, $T$  和  $B$  干涉, $T$  和  $R$  干涉, $A$  和  $R$  干涉, $B$  和  $R$  干涉形成。将平板移走,保持 TF、RF 的距离不变,再进行一次空腔测量,如图 2 所示,得到空腔时 TF 和 RF 的干涉条纹。各组条纹的波像差以及干涉腔长如表 1 所示。

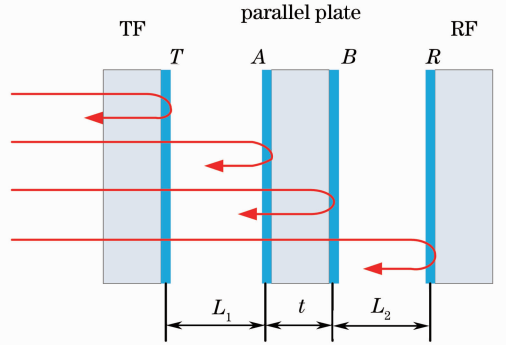


图 1 菲佐干涉仪测量平行平板的干涉腔  
Fig. 1 Fizeau cavity geometry used to measure a parallel plate

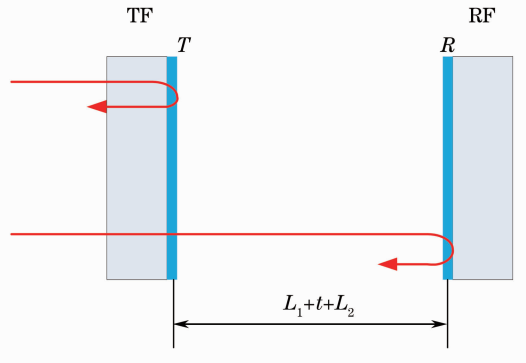


图 2 菲佐干涉仪空腔

Fig. 2 Empty Fizeau cavity geometry

表 1 各组条纹的波像差以及干涉腔长

Table 1 Wavefront aberrations and cavity lengths of each interference fringe

No.	Interference information	Wavefront aberration	Cavity length
1	Interference between $T$ and $A$	$W_1 = 2A - 2T$	$h_1 = L_1$
2	Interference between $A$ and $B$	$W_2 = 2n(B - A) + 2\Delta nt$	$h_2 = 2nt$
3	Interference between $T$ and $B$	$W_3 = 2A - 2T + 2n(B - A) + 2\Delta nt$	$h_3 = 2(L_1 + nt)$
4	Interference between $T$ and $R$	$W_4 = 2R - 2T + 2n(B - A) + 2\Delta nt + 2A - 2B$	$h_4 = 2(L_1 + L_2 + nt)$
5	Interference between $A$ and $R$	$W_5 = 2R + 2n(B - A) + 2\Delta nt - 2B$	$h_5 = 2(L_2 + nt)$
6	Interference between $B$ and $R$	$W_6 = 2R - 2B$	$h_6 = 2L_2$
7	Interference between $T$ and $R$ without a parallel plate in the cavity	$W_7 = 2R - 2T$	$h_7 = 2(L_1 + L_2 + t)$

由表 1 中波像差可以得到,平板的光学均匀性为

$$\Delta n = \frac{W_2 - n(W_7 - W_6 - W_1)}{2t}, \quad (1)$$

所以测量的关键是在平板放入测量时得到  $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_6$ ,在空腔测量时得到  $W_7$ 。

平板放入测量时,形成的干涉条纹应为 6 组干涉条纹的光强之和。每组干涉光强可写成

$$I_i = a_i + b_i \cos(\varphi_i + \delta_i), \quad (2)$$

式中  $a_i$  为背景光强, $b_i$  为光强调制度, $\varphi_i$  为初始相位, $\delta_i$  为移相量, $i = 1 \sim 6$ 。

$$\varphi_i = \frac{4\pi h_i}{\lambda_0} = W_i, \quad (3)$$

$$\delta_i \approx -4\pi h_i t \Delta\lambda / \lambda_0^2, \quad (4)$$

式中  $h_i$  为干涉腔长,  $\lambda_0$  为初始波长,  $\Delta\lambda$  为每次移相时的波长变化量,  $t$  为移相次数。从(4)式可以看出, 移相量与干涉腔长  $h_i$  和波长变化量  $\Delta\lambda$  有关, 在  $h_i$  一定时, 改变波长即可得到相位变化, 从而可进行移相干涉。

将(4)式写为

$$\delta_i = f_i t, \quad (5)$$

式中

$$f_i = -4\pi h_i \Delta\lambda / \lambda_0^2. \quad (6)$$

由表1中  $h_1 \sim h_6$  可得, 通过选取合适的  $L_1$  和  $L_2$ , 可以使得各干涉条纹的  $h_i$  不等。而又由(6)式可知, 在相同波长变化量的情况下, 不同  $h_i$  形成的条纹频率不同, 如图3所示, 故可以通过频域将不同的干涉条纹区分开来。然后运用载波相位解调方法计算得到不同频率对应的相位分布  $\varphi_1 \sim \varphi_6$  [17]。

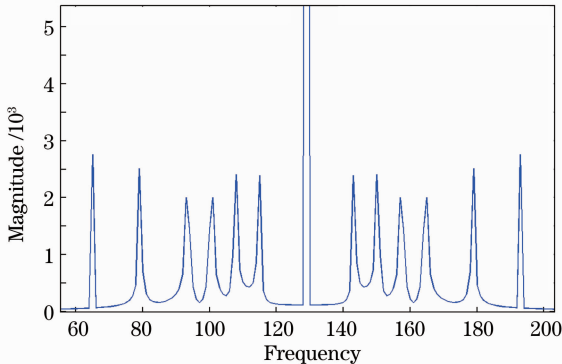


图3 不同条纹频率的频谱图

Fig. 3 Spectrogram of different fringe frequencies

再进行一次空腔测量, 由波长调谐移相算法得到  $\varphi_7$ 。这样就得到了波像差  $W_i$  ( $i=1 \sim 7$ ), 最后由(1)式计算得到平板的光学均匀性。

波长调谐两步绝对测量法测量光学材料光学均匀性的过程总结如下:

第一步, 平板放入 TF 和 RF 之间进行测量。

首先根据被测件的厚度及折射率确定腔长  $L_1$  和  $L_2$ , 保证 6 组条纹对应的 6 个干涉腔长不等。设置好采集干涉图的数目  $N$  ( $N=2^n$ ) 以及最大腔长下每个周期采集点数等参数后进行移相采样, 得到  $N$  幅干涉图。对干涉图上各个点的  $N$  个光强值进行傅里叶变换(FT), 得到频谱分布。再对不同频率的频谱加窗(如汉明窗等)以提取相应频谱。然后对提取的频谱进行逆傅里叶变换, 得到各组条纹对应的

相位信息。最后对相位进行解包、消倾斜处理, 得到各组条纹的波面数据。

第二步, 空腔测量。

将平板取走, 保持 TF、RF 的位置不变, 以保证波面运算时各像素点的相对位置不变。进行移相采样, 得到多幅干涉图, 由波长调谐移相算法计算得到 TF 和 RF 的干涉相位。最后, 根据(1)式, 由得到的波面数据计算得到平板的光学均匀性。

从(1)式可以看出, 该方法的计算结果不仅不包含样品的面形误差, 也不包含系统内部和 TF、RF 的面形误差, 在原理上是一种绝对测量方法。

### 3 模拟仿真

为验证该方法的正确性, 对该方法进行了模拟仿真, 模拟过程主要包括以下 3 个步骤。

1) 模拟得到干涉光强值

首先模拟  $T$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $R$  4 个面的面形以及平板光学均匀性分布值。简单起见, 设  $T$  面形很好, 无误差, 其各点相位数据为 0。其他 3 个面以及光学均匀性分布值, 由 Zernike 多项式取前 5 项得到, 分别是常数项、 $x$  方向倾斜、 $y$  方向倾斜、离焦、像散, 并对其进行归一化, 表达式为

$$S = K_0 + K_1(x - x_0)/R + K_2(y - y_0)/R + K_3\{2 \times \{[(x - x_0)/R]^2 + [(y - y_0)/R]^2\} - 1\} + K_4\{[(y - y_0)/R]^2 - [(x - x_0)/R]^2\} \quad (7)$$

式中  $K_0$  为常数项,  $K_1 \sim K_4$  分别为  $x$  方向倾斜、 $y$  方向倾斜、离焦、像散的系数,  $(x_0, y_0)$  为干涉图有效区圆心坐标,  $R$  为半径。

再由表1中的  $W_1 \sim W_6$  和(3)式计算得到各组干涉条纹的相位差  $\varphi_i$ 。

由(2)式, 干涉图光强值可以表示为

$$I_i = G[a_i + b_i \cos(\varphi_i + \delta_i)], \quad (8)$$

式中  $G$  为灰度等级量化系数, 取 256,  $i=1 \sim 6$ 。

设  $L_1=60$  mm,  $t=60$  mm,  $L_2=120$  mm,  $n=1.5$ , 最大干涉腔长为 270 mm, 保证其每周期采样点数为 4 个点, 则波长变化量应等于  $1.8539 \times 10^{-7}$   $\mu\text{m}$ 。由(4)式得到 6 组条纹的  $\delta_i$ , 再将其相位差  $\varphi_i$  代入, 即可得到每组条纹的干涉光强。总的干涉光强即为 6 组光强叠加得到。图4为从模拟的 128 幅干涉图中任意选取的连续 4 幅干涉图。图5(a)、6(a)为模拟的平板前后表面  $A$ 、 $B$  的波面图, 图7(a)为模拟的光学均匀性的波面图。

2) 计算得到各干涉相位

对干涉图上各个点的 256 个光强值进行傅里叶

变换,得到频谱分布(图 8 为其中一个点的频谱分布图)。通过频率和腔长之间的关系将横坐标的频率值转换成腔长值,在腔长为 60、90、120、150、210 和 270 mm 附近有峰值,这与 2.2 中分析的形成干涉条纹的 6 个腔长值一致。再对不同频率的频谱加汉明窗以提取相应频谱。然后对提取的频谱进行逆傅里叶变换,得到各组条纹对应的相位信息。最后对

相位进行解包、消倾斜处理,得到平板前后表面的波面图。如图 5(b)、6(b)所示。

3) 根据(1)式,由得到的各组相位数据计算得到平板的光学均匀性,如图 7(b)所示。模拟波面和计算得到的对应波面的峰谷(PV)值、均方根(RMS)值如表 2 所示。

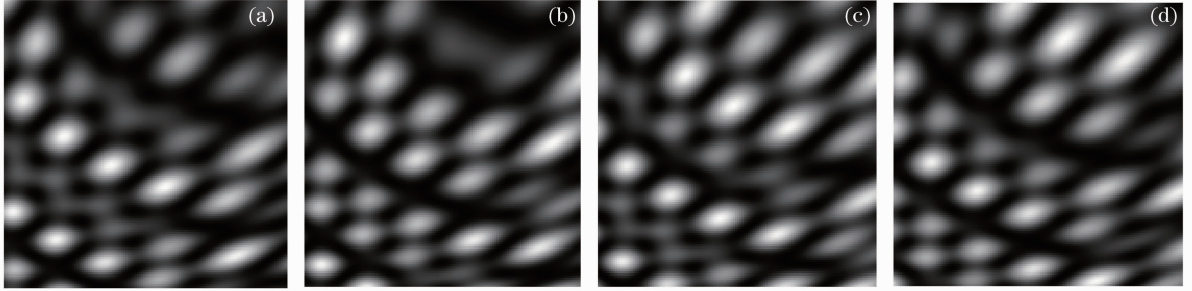


图 4 模拟的干涉图

Fig. 4 Simulated interferograms

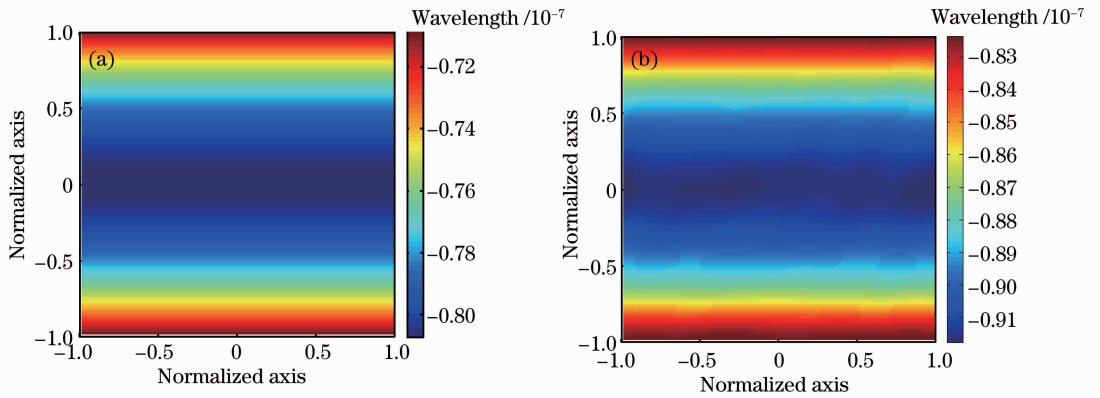


图 5 模拟的平板前表面的波面和计算得到的波面。(a)模拟的平板前表面的波面;(b)计算得到的平板前表面的波面

Fig. 5 Simulated and calculated wavefronts of the front surface of a parallel plate. (a) Simulated wavefront; (b) calculated wavefront

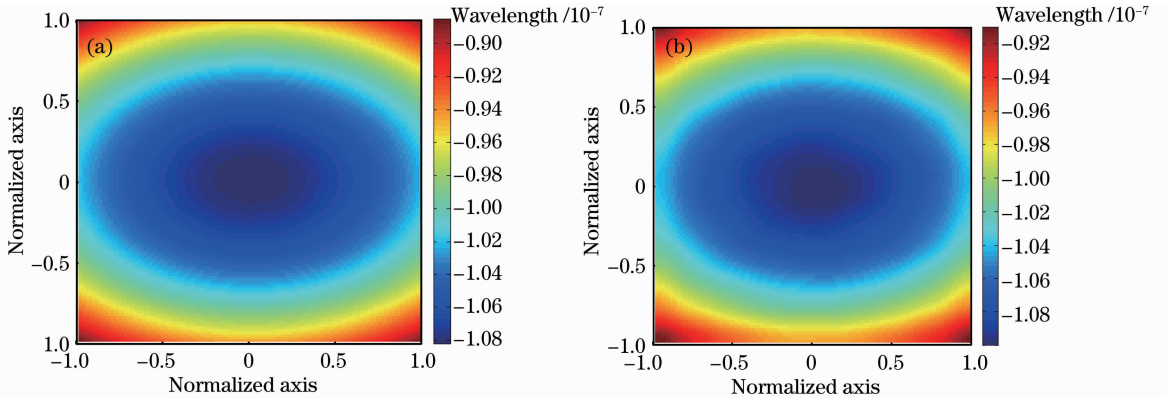


图 6 模拟的平板后表面的波面和计算得到的波面。(a)模拟的平板后表面的波面;(b)计算得到的平板后表面的波面

Fig. 6 Simulated and calculated wavefront of the back surface of a parallel plate. (a) Simulated wavefront; (b) calculated wavefront

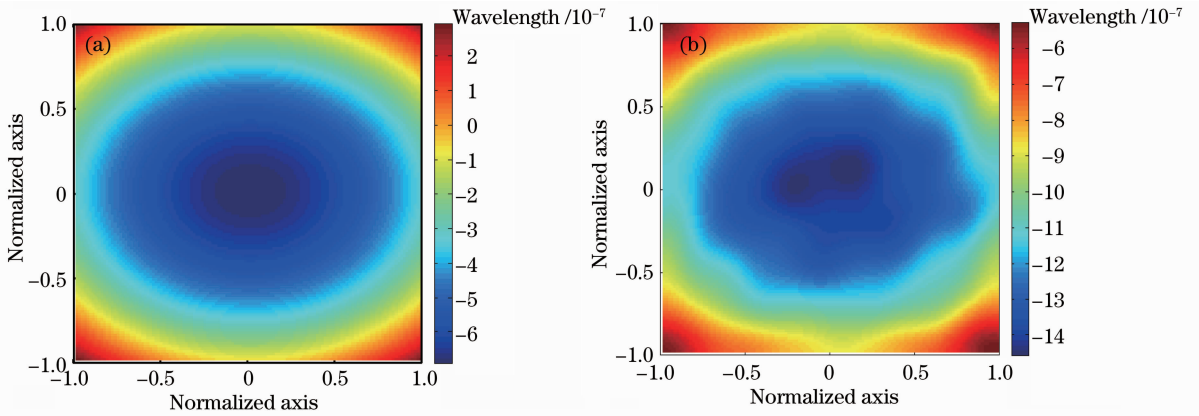


图7 模拟的平板光学均匀性波面和计算得到的波面。(a)模拟的平板光学均匀性波面；  
(b)计算得到的平板光学均匀性波面

Fig. 7 Simulated and calculated wavefront of optical homogeneity variation of a parallel plate. (a) Simulated optical homogeneity variation; (b) calculated optical homogeneity variation

表2 仿真结果

Table 2 Results of the simulation

Wavefront type	Simulated phase		Calculated phase	
	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$
Optical homogeneity	$9.80 \times 10^{-7}$	$2.17 \times 10^{-7}$	$9.13 \times 10^{-7}$	$2.04 \times 10^{-7}$
Wavefront of the front surface of a parallel plate	0.098	0.030	0.106	0.031
Wavefront of the back surface of a parallel plate	0.197	0.045	0.203	0.046

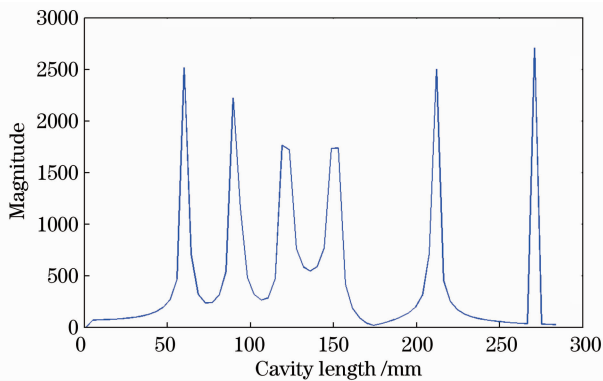


图8 傅里叶变换后得到的频谱图

Fig. 8 Spectrogram after Fourier transform

从图5~7的波面图可以看出,3组波面的高低分布基本一致。从表2可以看出,光学均匀性的计算结果和模拟值比较,PV值的误差为 $6.7 \times 10^{-8} \lambda$ ,RMS值的误差为 $1.3 \times 10^{-8} \lambda$ 。平板前后表面的计算结果和模拟值比较,PV值的误差在 $\lambda/100$ 以内、RMS值的误差为 $\lambda/1000$ 。结果表明,该方法正确可行,计算精度高。

## 4 实验

在课题组研制的波长移相干涉仪上进行了实验研究。运用波长调谐两步绝对测量法与传统的绝对

测量法两种方法对相同的被测件进行测量,比较两者的测量结果。

实验装置如图9所示,波长移相干涉仪口径为100 mm,激光器为美国NewFocus公司研制的TLB7004,中心波长为632.8 nm。测量对象为厚度60 mm的方砖,折射率为1.5163。测量时设置 $L_1 = 30$  mm, $L_2 = 60$  mm,采集256幅干涉图,最大腔长形成的干涉条纹每个周期采集18个点。图10为采集的干涉图中任意选取的连续4幅干涉图。

首先运用传统的绝对测量法对此方砖进行测量,由于被测件的平行度很好,前后表面干涉条纹不能分开,故绝对测量法采用三步法。计算得到方砖均匀性波面、方砖前后表面干涉波面以及方砖放入后TF和RF的干涉波面,如图11所示。再运用波长调谐两步绝对测量法对相同的方砖进行测量,计算得到对应的3个波面如图12所示。各波面的PV值和RMS值如表3所示。

再运用相同的实验装置对另一个被测件进行测量,如图13所示。被测件为厚度50 mm,直径60 mm的柱面镜,折射率为1.5163。测量时设置 $L_1 = 25$  mm, $L_2 = 50$  mm,采集256幅干涉图,最大腔长形成的干涉条纹每个周期采集12个点。



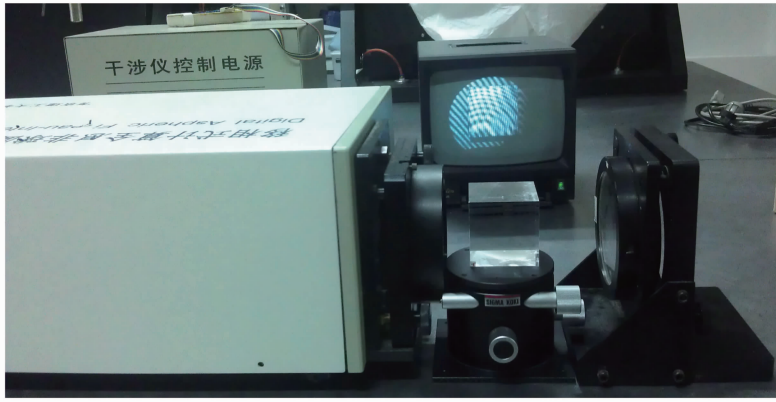


图 9 实验装置图

Fig. 9 Experimental installation

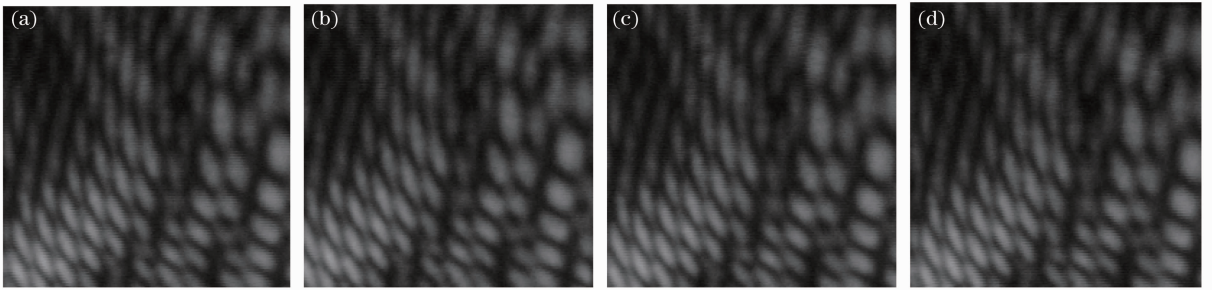


图 10 采集的干涉图

Fig. 10 Acquired interferograms

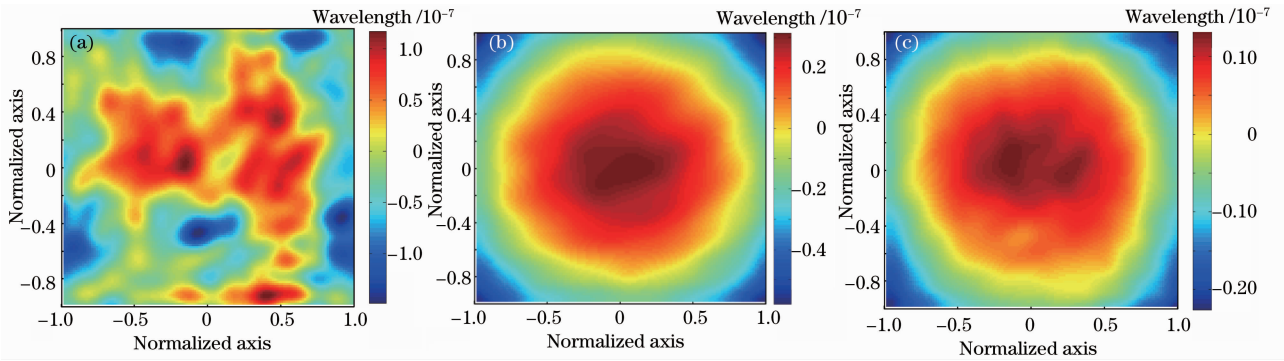


图 11 传统的绝对检验法得到的计算结果。(a)光学均匀性波面；(b)方砖前后表面干涉波面；  
(c)方砖放入后 TF 和 RF 的干涉波面

Fig. 11 Calculated results of the traditional absolute testing method. (a) Wavefront of optical homogeneity variation; (b) interference wavefront between the front surface and the back surface of the square brick; (c) interference wavefront between TF and RF with the square brick in the test arm

表 3 两种方法的计算结果(方砖)

Table 3 Results calculated by two methods (square brick)

Wavefront type	Result of two-step wavelength tuning absolute testing method		Result of the traditional absolute testing method	
	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$
Optical homogeneity	$2.37 \times 10^{-7}$	$4.08 \times 10^{-8}$	$2.70 \times 10^{-7}$	$5.25 \times 10^{-8}$
Interference wavefront between the front surface and the back surface of the square brick	0.94	0.21	0.91	0.20
Interference wavefront between TF and RF with the square brick in the test arm	0.37	0.08	0.36	0.08

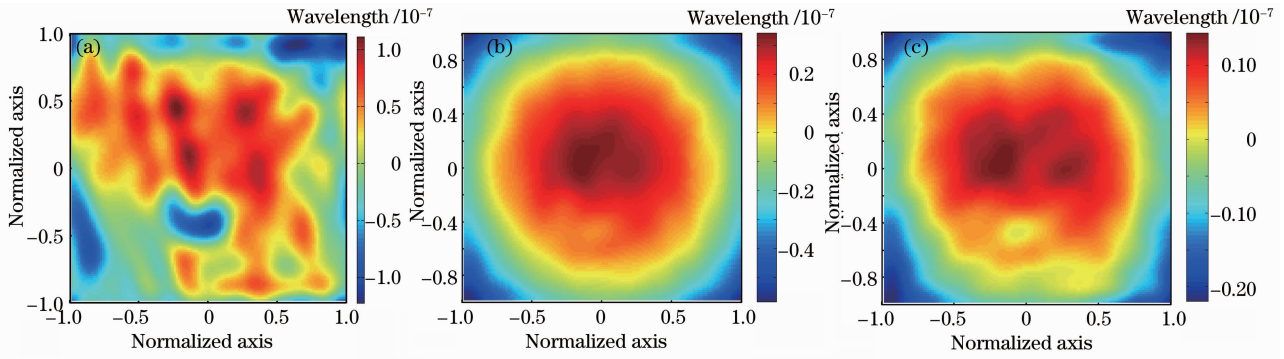


图 12 波长调谐两步绝对测量法得到的计算结果。(a)光学均匀性波面；(b)方砖前后表面干涉波面；  
(c)方砖放入后 TF 和 RF 的干涉波面

Fig. 12 Calculated results of two-step wavelength tuning absolute testing method, (a) Wavefront of optical homogeneity variation; (b) interference wavefront between the front surface and the back surface of the square brick; (c) interference wavefront between TF and RF with the square brick in the test arm

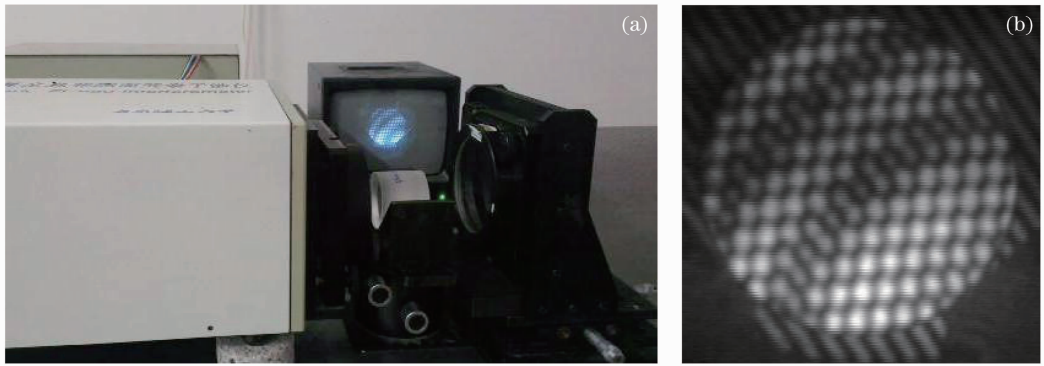


图 13 实验装置图及干涉图

Fig. 13 Experimental installation and one of the acquired interferograms

仍然通过两种方法对柱面镜进行测量。图 14 为绝对检验法得到的柱面镜均匀性波面、柱面镜前后表面干涉波面以及柱面镜放入后 TF 和 RF 的干

涉波面。再运用波长调谐两步绝对测量法对相同的柱面镜进行测量,计算得到对应的 3 个波面如图 15 所示。各波面的 PV 值和 RMS 值如表 4 所示。

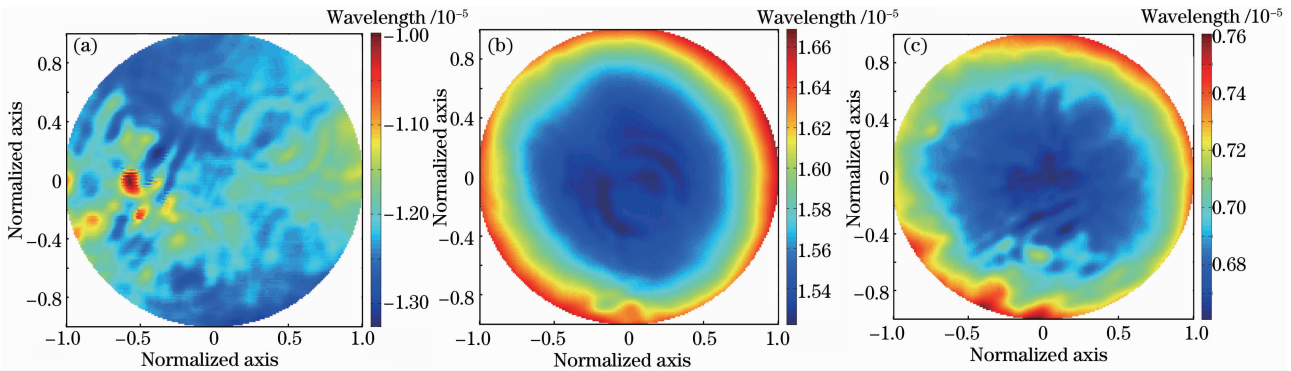


图 14 传统的绝对检验法得到的计算结果。(a)光学均匀性波面；(b)柱面镜前后表面干涉波面；  
(c)柱面镜放入后 TF 和 RF 的干涉波面

Fig. 14 Calculated results of the traditional absolute testing method. (a) Wavefront of optical homogeneity variation; (b) interference wavefront between front surface and back surface of the cylindrical lens; (c) interference wavefront between TF and RF with the cylindrical lens in the test arm

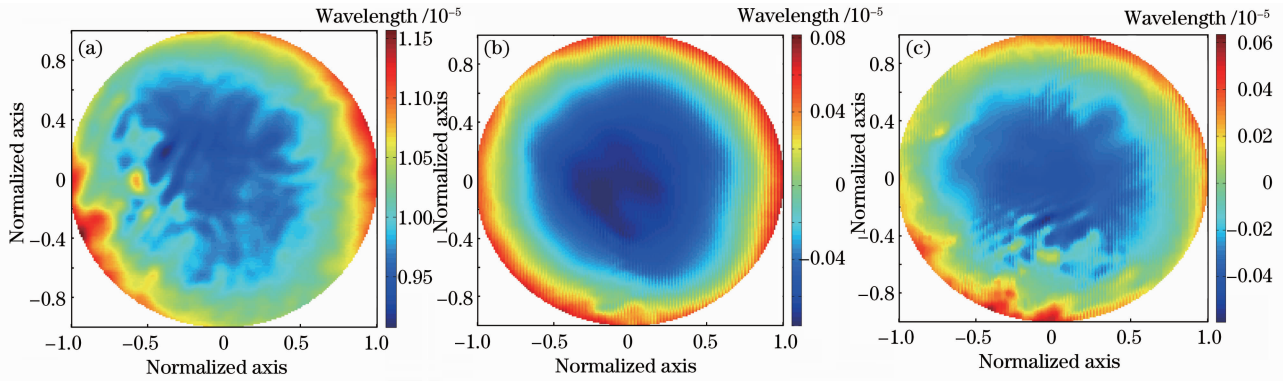


图 15 波长调谐两步绝对测量法得到的计算结果。(a)光学均匀性波面；(b)柱面镜前后表面干涉波面；  
(c)柱面镜放入后 TF 和 RF 的干涉波面

Fig. 15 Calculated results of two-step wavelength tuning absolute testing method. (a) Wavefront of optical homogeneity variation; (b) interference wavefront between the front surface and the back surface of the cylindrical lens; (c) interference wavefront of TF and RF with the cylindrical lens in the test arm

表 4 两种方法的计算结果(柱面镜)

Table 4 Results calculated by two methods (cylindrical lens)

Wavefront type	Result of two-step wavelength tuning absolute testing method		Result of the traditional absolute testing method	
	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$
Optical homogeneity	$2.50 \times 10^{-6}$	$4.35 \times 10^{-7}$	$3.22 \times 10^{-6}$	$3.59 \times 10^{-7}$
Interference wavefront between the front surface and the back surface of the cylindrical lens	0.16	0.04	0.15	0.04
Interference wavefront between TF and RF with the cylindrical lens in the test arm	0.12	0.02	0.10	0.02

从测试结果的波面图 11、12、14、15 可以看出,3 组波面的高低分布基本一致。从表 3 可以看出,两种方法计算方砖光学均匀性波面的 PV、RMS 的误差在  $10^{-8}$  数量级,方砖前后表面干涉波面、以及方砖放入后 TF 和 RF 的干涉波面的 PV 值误差均在  $\lambda/30$  以内。从表 4 可以看出,两种方法计算柱面镜光学均匀性波面的 PV、RMS 的误差在  $10^{-7}$  数量级,方砖前后表面干涉波面以及方砖放入后 TF 和 RF 的干涉波面的 PV 值误差均在  $\lambda/50$  以内。说明两种方法的计算结果一致。

## 5 讨 论

在模拟仿真以及实际测量中,对以下两方面进行了研究。

### 1) $L_1, L_2$ 的选取

被测件的厚度和折射率确定了表 1 中第 2 组干涉条纹的干涉腔长,再根据表 1 中其他条纹的干涉腔长确定  $L_1, L_2$ 。在确定一个最小腔长后,应尽可能使其他腔长为该腔长的整数倍,这样有利于各频

谱在频域分开,易于进行频谱提取。

2) 采样总数以及每周期采样点数对于测量结果的影响

在相同采样总数的情况下,若每周期采样点少,则采样周期多,各频率频谱分布分散,较易分开,但每个频谱的点数少。

若采样总数多,采集时间长,环境影响明显,计算结果误差大。多次实验结果表明采集 256 幅干涉图比较合适,最大腔长下每周期采样 10~20 个点比较合适。

## 6 结 论

波长调谐两步绝对测量法利用波长移相干涉仪实现光学材料光学均匀性的测量。模拟仿真和实验结果表明,该方法可以高精度地实现平行平板的光学均匀性测量,且只需要两个步骤,操作简单,受外界影响小。且该方法通过波长改变实现移相,可将其运用于大口径光学材料光学均匀性的测量中。



## 参 考 文 献

- 1 Lin Juan. Interference absolute measurement for homogeneity of large-aperture optical glass[J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(1): 120~123  
林 娟. 大口径光学玻璃光学均匀性干涉绝对测量方法[J]. *应用光学*, 2008, **29**(1): 120~123
- 2 Ren Huan, Yuan Jing, Xu Hua *et al.*. Optical homogeneity measure method analysis of optical material [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(6): 48~51  
任 寰, 袁 静, 许 华 等. 光学材料光学均匀性检测方法分析[J]. *光学与光电技术*, 2007, **5**(6): 48~51
- 3 Xu Xinhua, Wang Qing, Song Bo *et al.*. Measurement system of optical homogeneity of large-size optical material based on subaperture stitching technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0412002  
徐新华, 王 青, 宋 波 等. 基于子孔径拼接技术的大尺寸光学材料均匀性检测系统[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0412002
- 4 Xu Jiancheng, Shi Qikai, Chai Liqun *et al.*. Spatial Fourier fringe analysis with single three-surface interferogram[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1260~1264  
徐建程, 石琦凯, 柴立群 等. 三表面干涉条纹空域傅里叶分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1260~1264
- 5 Chen Lei, Wang Qing, Zhu Rihong. Measurement of the homogeneity of refractive index of the germanium crystal using IR interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 404~406  
陈 磊, 王 青, 朱日宏. 使用红外干涉仪测量锗材料折射率均匀性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 404~406
- 6 Zhang Jianfeng, Cao Xuedong, Wu Shibin *et al.*. Temperature effect on high precision measurement of refractive index homogeneity of optical glass [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(1): 011203  
张建锋, 曹学东, 吴时彬 等. 温度对高精度光学玻璃折射率均匀性检测的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(1): 011203
- 7 Guo Peiji, Yu Jingchi *et al.*. Absolute testing method of the homogeneity of optical glass[J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(3): 26~27  
郭培基, 余景池 等. 光学玻璃光学均匀性的绝对测量技术[J]. *激光杂志*, 2003, **24**(3): 26~27
- 8 L. L. Deck. Fourier-transform phase-shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(13): 2354~2365
- 9 Peter de Groot. Wavelength-tuned phase shifting interferometry applied to the measurement of transparent plates[C]. Québec City: Optical Fabrication and Testing, 2000. OTuB3
- 10 Peter de Groot. Measurement of transparent plates with wavelength-tuned phase-shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(16): 2658~2663
- 11 K. Hibino, B. F. Oreb, P. S. Fairman. Improved algorithms for wavelength scanning interferometry: application to the simultaneous measurement of surface topography and optical thickness variation in a transparent parallel plate[C]. *SPIE*, 2002, **4777**: 212~219
- 12 L. L. Deck. Multiple surface phase shifting interferometry[C]. *SPIE*, 2001, **4451**: 424~431
- 13 J. B. Liu, P. D. Ronney. Modified Fourier transform method for interferogram fringe pattern analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(25): 6231~6241
- 14 K. Hibino, B. F. Oreb, P. S. Fairman *et al.*. Simultaneous measurement of surface shape and variation in optical thickness of a transparent parallel plate in wavelength-scanning Fizeau interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(3): 1241~1249
- 15 K. Okada, H. Sakuta, T. Ose *et al.*. Separate measurements of surface shapes and refractive index inhomogeneity of an optical element using tunable-source phase shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(22): 3280~3285
- 16 Zhu Rihong, Chen Lei, Gao Zhishan *et al.*. Near infrared large aperture (24 inches) interferometer system development [C]. *Fringe 2009* : 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology, 2009. 705~708
- 17 M. Takeda, H. Ina, Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160

栏目编辑：何卓铭