

文章编号 1004-924X(2013)02-0260-07

# 用空间载频法测量玻璃平板的厚度均匀性

蔡怀宇, 李宏跃\*, 朱 猛, 黄战华

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

**摘要:**设计了一种基于迈克耳逊干涉光路的相位测量系统,将单臂作为检测端完成了对玻璃平板厚度均匀性的直接测量和分析。该系统由 CCD 采集干涉图样,利用傅里叶变换条纹分析法和相位解包裹技术提取干涉图中所包含的待测相位信息;对于傅里叶变换法中频谱旁瓣中心无法准确定位的问题,采用三角变换法去载频,从而不需要准确地得知频谱旁瓣的中心位置就可以计算出相位结果,消除了人为估算和垂轴方向上的微小载频分量给测量结果带来的误差。实验测量了多块玻璃平板的厚度均匀性。测量结果显示:使用像元大小为  $4.65\ \mu\text{m} \times 4.65\ \mu\text{m}$  的 CCD 相机,测量玻璃平板两表面在长度方向和宽度方向上的厚度均匀性的理论精度分别达到 0.93% 和 0.92%,表明本系统基本满足玻璃平板厚度均匀性测量的要求,且对干涉图频谱旁瓣的定位精度和载频的方向精度要求较低。

**关键词:**干涉测量;玻璃平板检测;厚度测量;傅里叶变换法;空间载频

**中图分类号:** O436.1; TB92 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0260

## Measurement of thickness uniformity for glass plate by spatial carrier

CAI Huai-yu, LI Hong-yue\*, ZHU Meng, HUANG Zhan-hua

(*Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology of the Ministry of Education (Tianjin University), College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: lihongyue@tju.edu.cn*

**Abstract:** On the basis of the Michelson interferometer, a phase interference measurement system with one single arm as the measurement output port was designed to measure and analyze the thickness uniformity of a glass plate. In the system, a CCD camera was used to collect the interference pattern and the Fourier transform fringe analysis and phase unwrapping techniques were used to extracted the phase information contained in the interference pattern. For the problem that the sidelobe center of Fourier transform spectrum could not be accurately located, an applicable triangular transformation method was proposed to extract the volume of phase change directly. With this approach, the phase results could be obtained more accurately without knowing the central location of the spectral sidelobe, meanwhile, the errors induced by man-made estimation and the small carrier frequency component in vertical axis were eliminated. The thickness uniformity of a group of glass plates was measured in both of the length and width directions. The experimental results show that the theoretical accuracy is 0.93% and 0.92% in two directions, respectively, when they measured by a CCD camera with a u-

收稿日期:2012-07-05;修订日期:2012-10-09.

基金项目:高等学校博士点专项科研基金资助项目(No. 20110032120059)

nit size of  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ . The system can measure the thickness uniformity of the glass plates, and has lower demands for the location accuracy of frequency spectral sidelobe and the direction precision of carrier frequency.

**Key words:** interferometry; glass plate detection; thickness measurement; Fourier transform method; spatial carrier

## 1 引言

随着触摸屏电子产品的普及, TFT (Thin Film Transistor) 和 ITO (Indium Tin Oxide)<sup>[1]</sup> 玻璃基板的需求量在不断增加, 人们对其质量也提出了更高的要求。玻璃平板的厚度均匀性直接影响到液晶显示器 (LCD) 或有机发光二极管 (OLED) 的显示效果, 其厚度不均会使液晶显示器在制造过程中的压力分布不均匀, 从而造成废品或残次品<sup>[2]</sup>, 因此玻璃平板的厚度均匀性检测具有实际意义。厚度均匀性测量通常先要对样品的不同区域进行厚度测量, 然后得出厚度均匀性的测量结果。为了减小测量对表面的损伤一般采用非接触式测量, 测量方法主要有反射干涉法、电容法、光学共焦法、激光外差多普勒法等<sup>[3-8]</sup>。其中, 反射干涉频谱法要求被测对象的厚度在微米量级; 电容法对样品的厚度和介电常数有一定要求; 光学共焦法适用于较厚样品的测量。本文采用一种光学相位测量方法来直接检测玻璃平板的厚度均匀性, 该方法具有适用范围广、测量速度快、测量结果直观等优点。

空间载频条纹相位分析技术作为一种高精度、高灵敏度的相位测量技术, 在三维轮廓测量领域有着广泛的应用<sup>[9-15]</sup>。其中, 傅里叶变换条纹分析法只需要 1~2 幅干涉图就可以计算出全场的相位值<sup>[16]</sup>, 适用于快速、动态测量。傅里叶变换法分为无载频傅里叶变换法和有载频傅里叶变换法两种<sup>[17]</sup>, 本文采用有载频傅里叶变换法。其原理是通过傅里叶变换把载频条纹图从空域变换到频域, 然后提取出 +1 级谱项并移至零点, 再通过傅里叶逆变换把经过处理的频域信息还原到空域, 从而得到全场相位分布。但是传统的傅里叶分析法很难准确地计算出载频量, 人为估算将造成测量误差。为了解决这一问题, 林振衡<sup>[18]</sup>等人提出了形貌相减消差法和旁瓣共轭消差法, 其中形貌相减消差法要进行两次解包裹处理, 在增大

计算量的同时还引入了二次解包裹误差。本文采用三角变换法去载频, 不需要将 +1 级谱项移回零点, 可以直接提取待测变化相位, 因此只需要一次解包裹处理, 从而提高了相位测量精度。与旁瓣共轭消差法相比, 三角变换法的适用范围更广, 不但可以应用于傅里叶变换条纹分析法, 还同样适用于相移干涉法。

## 2 三角变换法去载频原理

一幅载频干涉图的强度分布可以表示为:

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\Delta\phi(x, y) + 2\pi f y] \quad (1)$$

其中:  $a(x, y)$  为背景强度,  $b(x, y)$  为调制强度,  $\Delta\phi(x, y)$  为被测对象引起的相位变化,  $f$  为  $y$  方向 (水平方向) 上引入的线性空间载频。利用欧拉公式将式 (1) 展开为:

$$i(x, y) = a(x, y) + \frac{b(x, y)}{2} \{ \exp[i\Delta\phi(x, y)] \cdot \exp(i2\pi f y) + \exp[-i\Delta\phi(x, y)] \exp(-i2\pi f y) \} \quad (2)$$

将式 (2) 简写成:

$$i(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(i2\pi f y) + c^*(x, y) \exp(-i2\pi f y) \quad (3)$$

式中:  $c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[i\Delta\phi(x, y)]$ ,  $c^*(x, y)$  为  $c(x, y)$  的复共轭。

对式 (3) 进行傅里叶变换得:

$$I(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x, f_y - f) + C^*(-f_x, -f_y, -f) \quad (4)$$

当载频  $f$  足够时,  $A(f_x, f_y)$ ,  $C(f_x, f_y - f)$ ,  $C^*(-f_x, -f_y - f)$  3 项在频域分开, 如图 1 所示。其中,  $A(f_x, f_y)$  包含 0 频直流峰值  $I(0, 0)$  和低频背景成分,  $C(f_x, f_y - f)$  和  $C^*(-f_x, -f_y - f)$  包含待测相位信息。通过频域带通滤波器将  $A(f_x, f_y)$  和  $C^*(-f_x, -f_y - f)$  滤除, 得到  $C(f_x, f_y - f)$ 。与传统的傅里叶变换法不同的是, 这里不

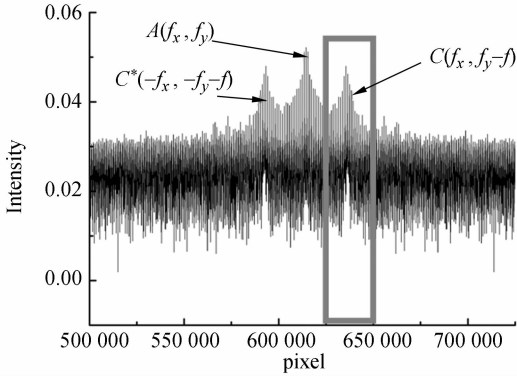


图 1 干涉图的频谱

Fig. 1 Spectra of interference patterns

需要将其移回零点,直接做傅里叶逆变换得到:

$$c'(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[i\Delta\phi(x, y) + i2\pi f y]. \quad (5)$$

另外需要在空载时先记录一张干涉图,其强度分布为:

$$\Delta\phi(x, y) = \arctan \frac{\operatorname{Re}[c'(x, y)]\operatorname{Im}[c_0'(x, y)] - \operatorname{Im}[c'(x, y)]\operatorname{Re}[c_0'(x, y)]}{\operatorname{Re}[c'(x, y)]\operatorname{Re}[c_0'(x, y)] - \operatorname{Im}[c'(x, y)]\operatorname{Im}[c_0'(x, y)]}. \quad (12)$$

运用三角变换法去载频不需要将+1级谱项移回零点,因此不必准确地知道载频量 $f$ ,消除了传统傅里叶变换法中由频谱旁瓣中心定位不准确以及垂轴方向上的微小载频分量所引起的误差。另外,采用直接求解变化相位的方式避免了二次解包裹引入的误差,提高了相位测量精度。此方法同样适用于相移干涉法测量形变和微小位移。

### 3 实验与数据分析

#### 3.1 测量系统

本文中的干涉测量系统基于迈克尔逊干涉光路搭建,如图 2 所示。采用波长为 650 nm 的准直激光器作为光源,准直激光经过分光棱镜后被分为两束,一束被待测玻璃平板调制 2 次,另一束由倾斜的平面镜 2 反射引入载频 $f$ ,最后由 CCD 相机采集干涉条纹图。利用计算机对载频条纹图进行处理和计算得到玻璃平板的厚度均匀量。考虑到 CCD 分辨率的限制和需要引入线性空间载频,要求被测对象的整体厚度倾角小于 $3^\circ$ 。

$$i_0(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f y). \quad (6)$$

与上述过程相同,通过傅里叶变换滤波后得到:

$$c_0'(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp(i2\pi f y). \quad (7)$$

根据欧拉公式,由式(5)、式(7)变换可得:

$$\operatorname{Re}[c'(x, y)]\operatorname{Im}[c_0'(x, y)] = \frac{1}{4} b(x, y)^2 \cdot \cos[\Delta\phi(x, y) + 2\pi f y] \sin(2\pi f y), \quad (8)$$

$$\operatorname{Im}[c'(x, y)]\operatorname{Re}[c_0'(x, y)] = \frac{1}{4} b(x, y)^2 \cdot \sin[\Delta\phi(x, y) + 2\pi f y] \cos(2\pi f y), \quad (9)$$

$$\operatorname{Re}[c'(x, y)]\operatorname{Re}[c_0'(x, y)] = \frac{1}{4} b(x, y)^2 \cdot \cos[\Delta\phi(x, y) + 2\pi f y] \cos(2\pi f y), \quad (10)$$

$$\operatorname{Im}[c'(x, y)]\operatorname{Im}[c_0'(x, y)] = \frac{1}{4} b(x, y)^2 \cdot \sin[\Delta\phi(x, y) + 2\pi f y] \sin(2\pi f y). \quad (11)$$

以上 4 式根据三角函数变换关系可得:

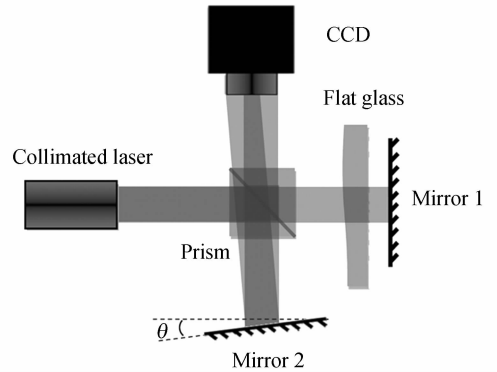


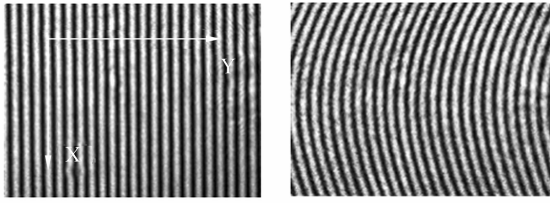
图 2 用于平板玻璃检测的干涉测量系统

Fig. 2 Interferometric measurement system for glass plate detection

#### 3.2 测量结果

图 3 为测量系统采集到的一组干涉图样。受玻璃平板的相位调制作用,装载后的条纹呈弯曲状。利用三角变换法求解相位并进行解包裹运算<sup>[19]</sup>可得到连续的相位分布,由于光线被玻璃平板调制 2 次,因此求 1 次相位结果时应除以被调制次数。图 4 给出了 6 块不同玻璃平板的相位测量结果,其中凹凸情况的产生是由于浮法玻璃制

造过程中为了调节玻璃的整体厚度而令拉边辊挤压或者拉伸玻璃带造成的<sup>[20]</sup>。



(a) 空载时 (a) No load (b) 装载平板玻璃后 (b) On load

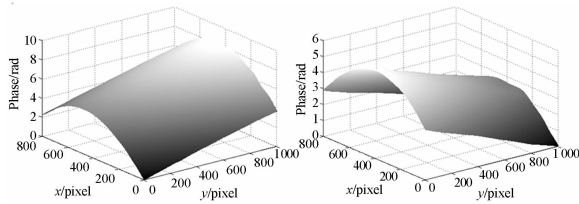
图 3 干涉条纹图

Fig. 3 Interferograms

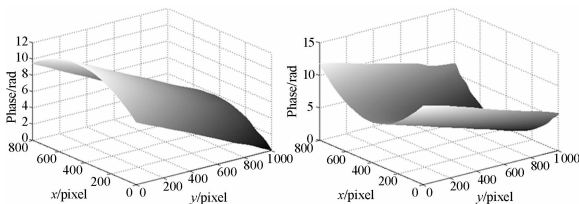
玻璃平板的厚度均匀量以角度形式表示,其计算公式为:

$$\theta = \arctan(\Delta h / \Delta l), \quad (13)$$

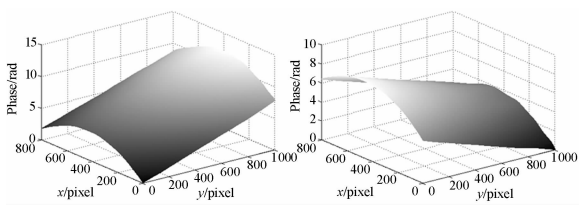
其中: $\Delta h$ 为  $x$  方向(宽度方向)或  $y$  方向(长度方向)上一定长程内的最大厚度差, $\Delta l$ 为两者的水平距离。由此可知,厚度均匀量数值越大,玻



(a) (b)



(c) (d)



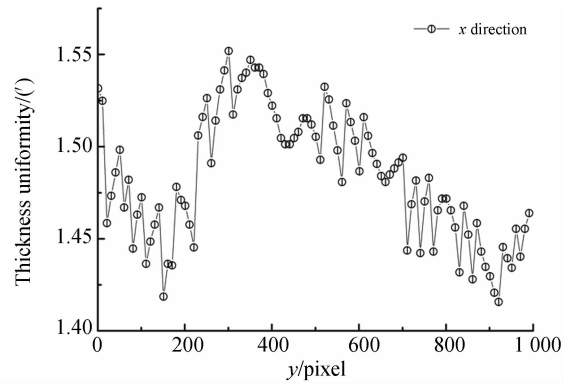
(e) (f)

图 4 不同玻璃平板的相位测量结果

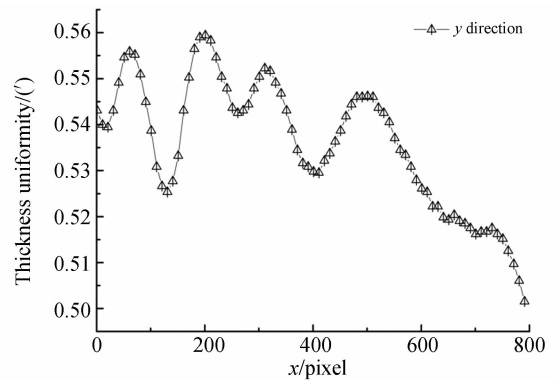
Fig. 4 Phase measurement results of different glass plates

璃平板的厚度均匀性越差。图 5 给出了图 4(a) 所对应的玻璃平板在  $x$  方向上的厚度均匀量沿长度方向的变化曲线和在  $y$  方向上的厚度均匀量沿宽度方向的变化曲线,其采样间隔为 10 pixel。从图中可以看出,被测玻璃平板样本在  $y$  方向上的厚度均匀性要优于  $x$  方向,且曲线的波动较小。

将  $x$  方向和  $y$  方向上的厚度均匀量按图 5 曲线的平均值计算。按尺寸将玻璃平板划分多个区域进行抽样测量,并把各个区域测量结果的平均值作为整体的厚度均匀量,则 6 块不同玻璃平板在两方向上的厚度均匀量如表 1 所示。



(a)  $x$  方向 (a) In  $x$  direction



(b)  $y$  方向 (b) In  $y$  direction

图 5 厚度均匀量变化曲线

Fig. 5 Curves of thickness uniformity

表 1 厚度均匀量测量结果

Tab.1 Results of thickness uniformity measurement

标号	$x$ 方向/( $'$ )	$y$ 方向/( $'$ )
a	1.429 3	0.535 5
b	0.910 8	0.418 5
c	1.273 8	1.176 9
d	2.163 3	0.906 1
e	1.548 2	1.096 5
f	1.175 3	0.646 0

根据表 1 给出的厚度均匀量测量结果,通过计算可得  $x$  方向和  $y$  方向上的最大厚度差。实验中所测玻璃平板的尺寸均为  $50\text{ mm} \times 75\text{ mm}$  ( $3.5\text{ in}$ ),每块的测量结果为所划分的 6 个区域抽样结果的平均值。它在宽、长( $x, y$ )方向上的最大厚度差如表 2 所示。

表 2 在两方向上的最大厚度差

Tab.2 Maximum thickness differences in two directions

标号	$x$ 方向/ $\mu\text{m}$	$y$ 方向/ $\mu\text{m}$
a	20.79	11.68
b	13.25	9.13
c	18.53	25.68
d	31.46	19.77
e	22.52	23.92
f	17.09	14.09

ITO 基板的厚度测量通常以千分尺的局部测量值作为其整体厚度,允差为  $-50 \sim 50\ \mu\text{m}$ ,本文实验所测玻璃平板的最大厚度差为  $31.46\ \mu\text{m}$ ,当玻璃平板的局部厚度满足设计厚度要求时,测量厚度均在允许偏差范围内。

### 3.3 误差分析

本文采用三角变换法去载频,消除了载频中心定位误差和载频方向误差。通过 Matlab 仿真可得,采用三角变换法去载频求解相位与传统傅里叶变换法相比,精度提高了  $0.39\%$ 。在测量厚度均匀量时误差来源主要有高度测量误差和长程测量误差。其中,高度测量误差受傅里叶变换法精度、解包裹精度、玻璃平板折射率误差和激光器中心波长误差影响,由于测量结果和折射率相关,因此本文所述测量方法适用于折射率均匀性较高的玻璃平板的测量,并在空气折射率扰动较小的

工作环境下进行;长度测量误差主要受 CCD 像元尺寸的影响。另外,装配误差可利用自准直法克服,由公式(13)可知玻璃平板的厚度均匀量合成误差为:

$$u_{\theta} = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial \Delta h} u_{\Delta h}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \Delta l} u_{\Delta l}\right)^2} = \sqrt{\left[\frac{1}{1 + (\Delta h / \Delta l)^2} \frac{u_{\Delta h}}{\Delta l}\right]^2 + \left[\frac{-\Delta h}{1 + (\Delta h / \Delta l)^2} \frac{u_{\Delta l}}{\Delta l}\right]^2}, \quad (14)$$

其中:

$$\Delta l = a \Delta N, \quad (15)$$

$a$  为 CCD 像元尺寸,  $\Delta N$  为相差像素数;

$$\Delta h = \frac{\Delta \varphi \lambda}{2\pi(n-1)}, \quad (16)$$

$\Delta \varphi$  为一定长程内的最大相位差,  $\lambda$  为激光器的中心波长,  $n$  为玻璃平板的折射率。由公式(14)和公式(15)可知,  $\Delta N$  越大则长度测量误差越小。其中相位测量误差为  $0.29\%$ , 折射率误差为  $\pm 0.004 5$ , 激光器中心波长误差为  $\pm 0.03\text{ nm}$ , 实验使用的 CCD 的像元尺寸为  $4.65\ \mu\text{m} \times 4.65\ \mu\text{m}$ , 计算可得  $x$  方向和  $y$  方向上的厚度均匀量合成误差分别为  $\pm 0.013 3'$  和  $\pm 0.004 9'$ ; 相对误差分别为  $0.93\%$  和  $0.92\%$ 。

## 4 结 论

本文采用空间载频相位测量技术对玻璃平板的厚度均匀性进行了测量。受 CCD 像元尺寸限制,要求被测对象的整体厚度倾角小于  $3^\circ$ , 本系统适用于折射率均匀性较高的玻璃平板、平行平晶等透射型物体的测量,并且对工作环境有一定的要求。其测量精度受相位测量精度和 CCD 像元尺寸的影响。当采用像元尺寸为  $4.65\ \mu\text{m} \times 4.65\ \mu\text{m}$  的 CCD 相机时,宽度方向和长度方向的厚度均匀量测量精度分别为  $0.93\%$  和  $0.92\%$ 。对于傅里叶变换法中频谱旁瓣中心定位不准确的问题,本文采用三角变换法去载频,不必准确地知道载频量即可计算出相位结果,其精度比传统的傅里叶变换法提高了  $0.39\%$ 。若要进一步提高测量精度,可对干涉图进行降噪处理或使用像元尺寸更小的 CCD。

## 参考文献:

- [1] 初国强,王子君,赵家民,等.氧离子辅助法沉积ITO透明导电膜的研究[J].光学精密工程,2001,9(2):169-173.  
CHU G Q, WANG Z J, ZHAO J M, *et al.*. Transparent conductive film (ITO) deposited by IAD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2): 169-173. (in Chinese)
- [2] 李维堤. ITO玻璃基板的平整度及测量[J]. 现代显示, 1995, 3(1): 14-17.  
LI W D. The flatness and measurement of ITO glass substrate [J]. *Advanced Display*, 1995, 3(1): 14-17. (in Chinese)
- [3] 孙艳,王昭,谭玉山. 表面平整度测量的新方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(3): 314-317.  
SUN Y, WANG ZH, TAN Y SH. Research on new technology of surface roughness measurement [J]. *J. Xi'an Jiaotong University*, 2003, 37(3): 314-317. (in Chinese)
- [4] SHUKLA R P, UDUPA D V, DAS N C. Non-destructive thickness measurement of dichromated gelatin films deposited on glass plates [J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, 38(7): 552-557.
- [5] 闫坤. 塑料薄膜厚度在线测量系统的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2011, 2(1): 91-98.  
YAN K. Design of on-line measurement system of plastic film thickness [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2011, 2(1): 91-98. (in Chinese)
- [6] 乔杨,张宁,徐熙平,等. 基于共焦法的透镜厚度测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(7): 1635-1641.  
QIAO Y, ZHANG N, XU X P, *et al.*. Design of lens thickness measurement system based on confocal technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(7): 1635-1641. (in Chinese)
- [7] RONCALLO S, PAINTER J, COUSINS M, *et al.*. A method to quantify the degree of uniformity of thickness of thin films [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(23): 8493-8497.
- [8] 宋晨,吕岑,郭琪,等. 一种激光外差多普勒玻璃厚度测量方法[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1635-1638.  
SONG CH, LU C, GUO Q, *et al.*. One method for measuring thickness of glass by using laser heterodyne and doppler [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1635-1638. (in Chinese)
- [9] 姜宏志,赵慧洁,李旭东,等. 用于强反射表面形貌测量的投影栅相位法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2002-2008.  
JIANG H ZH, ZHAO H J, LI X D, *et al.*. Projected fringe profilometry for profile measurement of high reflective surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2002-2008. (in Chinese)
- [10] 贾大功,武立强,马彩缤,等. 剪切散斑干涉术中剪切量的测量[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 226-232.  
JIA D G, WU L Q, MA C B, *et al.*. Shear measurement of shearing speckle interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 226-232. (in Chinese)
- [11] 何煦,马军. 共光路径向剪切干涉仪的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2029-2035.  
HE X, MA J. Design of common path radial shearing interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2029-2035. (in Chinese)
- [12] BRAD K, JAMES M, JAMES W, *et al.*. Low coherence vibration insensitive fizeau interferometer [J]. *SPIE*, 2006, 6292: 62920F-1-F-12.
- [13] YOUICHI B. Digital phase-shifting interferometer with an electrically addressed liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Opt. Lett.*, 2003, 17(28): 1576-1578.
- [14] HAGYONG K, SEUNG W K. Fiber-diffraction interferometer for vibration desensitization [J]. *Opt. Lett.*, 2005, 16(30): 2059-2061.
- [15] DANIEL D A, FERNANDO M S, MANUEL H D T, *et al.*. Insect wing deformation measurements using high speed digital holographic interferometry [J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5661-5667.
- [16] 桂敏,匡登峰,方志良. 基于相位测量法测量透射式相位光栅的表面形貌[J]. 光电子·激光, 2009, 20(10): 1337-1341.  
GUI M, KUANG D F, FANG ZH L. Fourier analysis of phase-masked spatial carrier interferogram [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(10): 1337-1341. (in Chinese)
- [17] 王开福,高明慧. 散斑计量[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2010.  
WANG K F, GAO M H. *Speckle Metrology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [18] 林振衡,黄元庆. 载波电子散斑干涉频谱旁瓣中心偏移的克服方法[J]. 厦门大学学报, 2011, 50(3):

563-569.

LIN ZH H, HUANG Y Q. Methods to overcome frequency spectrum side band's center excursion of CESPI [J]. *J. Xiamen University*, 2011, 50(3): 563-569. (in Chinese)

- [19] MIGUEL A H, DAVID R B, MICHAEL J L, *et al.*. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a

noncontinuous path [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(35): 7437-7444.

- [20] 岸本岸二郎, 古川正治, 仲彰, 等. 浮法玻璃的制造方法: 中国, CN 101842324A[P]. 2010.  
KISHIMOTO K J, FOROKAWA M, ZHONG ZH, *et al.*. Method for ITO manufacture: China, CN 101842324A[P]. 2010. (in China)

#### 作者简介:



**李宏跃**(1986—), 男, 天津人, 硕士研究生, 2010 年于天津大学获得学士学位, 主要从事全息与散斑检测方面的研究。  
E-mail: lihongyue@tju.edu.cn



**朱 猛**(1984—), 男, 河北秦皇岛人, 博士后, 2006 年于燕山大学获得学士学位, 2008 年、2011 年于天津大学分别获得硕士和博士学位, 主要从事全息与散斑检测、光学信息处理等方面的研究。  
E-mail: zhumeng@tju.edu.cn



**黄战华**(1965—), 男, 湖北孝感人, 博士, 教授, 1986 年于华中科技大学获得学士学位, 1989 年、1992 年于天津大学分别获得硕士和博士学位, 主要从事光电图像处理与模式识别、光电子信息技术及多媒体计算机应用与控制的研究。  
E-mail: zhanhua@tju.edu.cn

#### 导师简介:



**蔡怀宇**(1965—), 女, 湖南涟源人, 博士, 教授, 1988 年、1991 年、2000 年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位, 主要从事信息光学、光电技术及仪器 and 图像处理等方面的教学和科研工作。E-mail: hycail@tju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)