

# 分光路二维剪切干涉强激光腔镜 变形检测系统

付 雷<sup>1)</sup> 辛建国<sup>1)</sup> 史红民<sup>2)</sup> 倪受庸<sup>2)</sup> 陆耀东<sup>2)</sup> 王 麟<sup>3)</sup> 桑凤亭<sup>3)</sup>

1), 北京理工大学光电工程系, 北京 100081

2), 北京光电技术研究所, 北京 100010

3), 中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116012

**摘 要** 介绍一种分光路二维剪切干涉光电检测系统。该系统实现了两正交方向(二维)同时进行检测与计算机自动化数据处理;采用了一系列消噪声措施和两图像相减等技术,使得波前重构中能较好地采用简单的数值积分方法;并得到了在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 的测量范围内,方差不超过 $0.257 \mu\text{m}$ 和 $0.05 \mu\text{m}$ 的灵敏度。利用该系统成功地对强激光腔镜变形过程实现了动态检测。

**关键词** 二维剪切(错位), 干涉, 强激光, 腔镜变形检测。

## 1 引 言

随着高能激光技术的发展,人们在追求高功率(能量)的同时,开始追求好的光束质量和较小的光斑漂移。高能激光腔镜的热变形对光束质量的影响成为一个越来越严重的问题,因此提出了对腔镜热变形实时动态检测的要求。

本文在二维剪切干涉的基础上<sup>[1]</sup>,首先提出了一种分光路二维剪切(错位)干涉系统。将一束检测光投射到待测腔镜上,再把它反射回来的光通过分光镜分成两束光。对每一束光进行不同方向(正交方向)的剪切,分别在两个屏上同时得到两幅干涉图,因而是分光路的。采集到的干涉图像再通过计算机处理,其中采用了光载波技术和二维傅里叶变换频域分析技术实现带通滤波等,消除了系统噪声的影响,使得波前重构中能够采用通常不能直接使用的较简单的数值积分方法,提高了数据处理速度,而且获得了较高的精度。

## 2 基本原理

分光路二维剪切干涉强激光腔镜变形检测系统如图 1 所示,该系统主要由两大部分组成:产生干涉的光学系统和进行数字图像处理的计算机系统。光学系统包括一个带可调焦准直组件的半导体激光器(波长为 $0.675 \mu\text{m}$ ),两个剪切镜(厚平板玻璃) $\text{SP}_1$ 和 $\text{SP}_2$ ,一个分束镜 $\text{BS}$ ,一个全反射镜 $\text{M}$ 和两个干涉屏。由该激光器发出的激光经准直系统扩束成大曲率半径的球面波作为检测光,并投射到待测腔镜上。由待测腔镜反射的该光经分束镜 $\text{BS}$ 分成两束光。一束

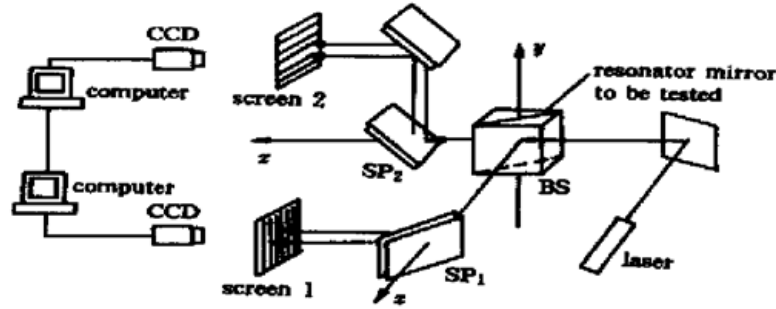


Fig. 1 The schematic diagram of optical-path-splitting 2-D shearing interferometer system for the deformation study of high power laser resonator mirrors

光通过剪切镜 SP<sub>2</sub> 产生一个 *y* 方向的剪切, 再由全反射镜 M 反射, 在屏 2 上产生一组干涉条纹, 如图 2(a) 所示; 另一束光经剪切镜 SP<sub>1</sub> 产生 *x* 方向的剪切后在屏 1 上形成另一组与前面正交的干涉图, 如图 2(b) 所示。

微处理系统由两台计算机(Pentium 133)和两个 CCD 组成。为了能进行数据间的传递, 两台计算机进行了联网和使用了一个外同步来使两个 CCD 同步工作。采集的图像信号经 A/D 转换变成数字信号(灰度表示)。为了简便起见, 在忽略常数项后, 其强度分布为<sup>[2]</sup>

$$i(r) = m(r) \cos[2\pi\omega r + \mathcal{Q}(r)] + h(r) \cos[4\pi\omega r + 2\mathcal{Q}(r)] + b(r) + n(r), \quad (1)$$

这里  $m(r)$  是余弦条件的低频振幅调制项, 第二项是记录介质非线性响应项, 这里只考虑具有低频调制项的二次谐波成份, 第三项  $b(r)$  是背景噪声, 第四项  $n(r)$  是随机噪声;  $\omega$  是干涉条纹的空间频率矢量(载波频率),  $r$  是干涉屏上一点的位置矢量。其中  $\mathcal{Q}(r)$  为镜面变形引起的条纹相位变化, 也是需要提取的信息。

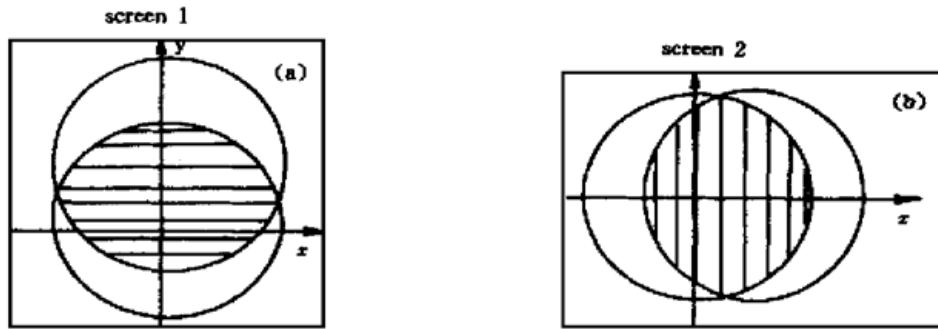


Fig. 2 (a) Fringe pattern on screen1; (b) Fringe pattern on screen 2.

为了提高测量精度就必须减小噪声影响, 为此采用频域分析技术。背景噪声为低频项, 主要集中在零频附近。随机噪声分布在整个频域空间, 但主要属于高频成分。因此绝大部分随机噪声分布在高频区域。由强激光引起的镜面热变形而导致的干涉条纹相位变化  $\mathcal{Q}(r)$  主要属于低频项, 为了将它从背景噪声和随机噪声中分离出来, 使用了光载波技术和频域分析技术来实现窄带滤波。

首先, 通过准直系统来调检测光, 使之变成一大曲率半径球面波。该球面波经过剪切镜剪切后在干涉屏上形成余弦干涉条纹。当待测镜面不变形时, 这种干涉条纹即是光载波; 当待测镜面变形时, 这种干涉条纹就是已受变形相位调制的光载波。图 3 中,  $W_0(x, y)$  和  $W(x, y)$  分别表示待测镜面变形前、后反射的检测光经过剪切镜 SP<sub>1</sub> 剪切后在干涉屏 1 上的光波前波像差函数。且  $W(x, y) = W_0(x, y) + \Delta(x, y)$ , 其中  $\Delta(x, y)$  为镜面变形引起的检测光波前变化。

设待测镜面加工完善, 其反射的大曲率半径球面光波此时在干涉屏上任一点  $(x, y)$  处的波像差  $\Delta W_{\alpha}(x, y)$  如图 3(a) 所示, 则有

$$\Delta W_{\alpha}(x, y) = W_o(x - s, y) - W_o(x, y) = \sqrt{R^2 - (x - s)^2 - y^2} - \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}.$$

当  $R \gg x, y$  时,

$$\Delta W_{\alpha}(x, y) \approx s^2/2R - sx/R.$$

令

$$\Phi_{\alpha}(x, y) = \frac{2\pi\Delta W_{\alpha}(x, y)}{\lambda} = \frac{\pi s^2}{\lambda R} - \frac{2\pi s x}{\lambda R} = \frac{\pi s^2}{\lambda R} - 2\pi\nu_0 x, \tag{2}$$

式中  $s$  为剪切量,  $\lambda$  为检测光波长,  $R$  为检测光球面波曲率半径。余弦干涉条纹空间频率或载波频率  $\nu_0 = s/\lambda R$ , 通过改变  $R$  就可以改变  $\nu_0$ 。在图 3(b) 中, 镜面变形后在屏 1 上任一点  $(x, y)$  处的波像差  $\Delta W_x(x, y)$  为:

$$\begin{aligned} \Delta W_x(x, y) &= W(x - s, y) - W(x, y) = W_o(x - s, y) + \Delta(x - s, y) - W_o(x, y) - \Delta(x, y) \\ &= \Delta W_{\alpha}(x, y) + \Delta_x(x, y), \end{aligned}$$

这里  $\Delta_x(x, y) = \Delta(x - s, y) - \Delta(x, y)$  为镜面变形所引入的波像差。

令

$$\begin{aligned} \Phi_x(x, y) &= \frac{2\pi\Delta W_x(x, y)}{\lambda} = 2\pi \frac{\Delta W_{\alpha}(x, y) + \Delta_x(x, y)}{\lambda} \\ &= \frac{\pi s^2}{\lambda R} - 2\pi\nu_0 x + \frac{2\pi\Delta W_x(x, y)}{\lambda} = \Phi_{\alpha}(x, y) + \Phi(x, y). \end{aligned} \tag{3}$$

同理, 在屏 2 上有

$$\Phi_y(x, y) = \Phi_{\beta}(x, y) + \Phi(x, y), \tag{4}$$

$\Phi_x(x, y)$ 、 $\Phi_y(x, y)$  分别是待测镜反射的检测光通过剪切后, 在屏 1 和屏 2 上的干涉条纹相位,  $\Phi(x, y)$  和  $\Phi(x, y)$  是待测镜面变形引起的条纹相位变化,  $\Phi_{\alpha}(x, y)$  和  $\Phi_{\beta}(x, y)$  为载波条纹相位。

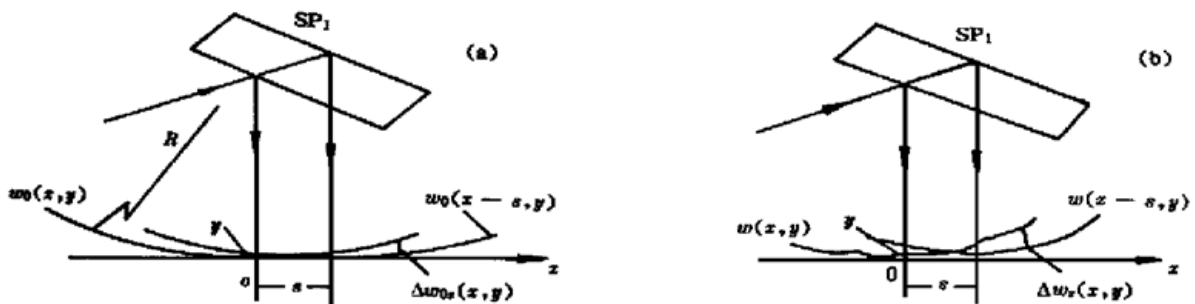


Fig. 3 Wave aberration of the laser wavefront sheared in the direction of  $x$  before and after the deformation of the tested mirror. (a) Before the deformation; (b) After the deformation.

综上所述, 当镜面热变形引起干涉条纹相位变化时, 就相当于用相位  $\Phi_r$  [或  $\Phi(x, y)$  与  $\Phi(x, y)$ ] 去调制载波, 如(1) 式表示。这样在频域中,  $\Phi_r$  的谱就集中在  $\nu_0$  附近, 使得  $\Phi_r$  的谱既避开了低频的背景噪声, 又可处于随机噪声很小的区域。因此通过选出该区域[包含  $\Phi_r$ ] 的频谱区域], 也就相当于进行窄带滤波把  $\Phi_r$  的谱从噪声中取出, 提高了信噪比, 又可消除噪声的影响。具体过程是:

令

$$q(r) = \exp[i\mathcal{Q}(r)],$$

对(1)式进行二维快速傅里叶变换,

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{i(r)\} = I(v) = & \frac{1}{2}M \circledast Q \circledast \delta(v - v_0) + \frac{1}{2}M \circledast Q^* \circledast \delta(v + v_0) \\ & + \frac{1}{2}H \circledast Q \circledast Q \circledast \delta(v - 2v_0) + \frac{1}{2}H \circledast Q^* \circledast Q^* \circledast \delta(v + 2v_0) + B(v) + N(v), \end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned} I(v) = & \frac{1}{2}M \circledast Q(v - v_0) + \frac{1}{2}M \circledast Q^*(v + v_0) + \frac{1}{2}H \circledast Q \circledast Q(v - 2v_0) + \\ & \frac{1}{2}H \circledast Q^* \circledast Q^*(v + 2v_0) + B(v) + N(v), \end{aligned} \quad (5)$$

这里  $Q(v)$ 、 $Q^*(v)$ 、 $M$ 、 $H$ 、 $B(v)$  和  $N(v)$  分别是  $q(r)$ 、 $q(r)$ 、 $m(r)$ 、 $h(r)$ 、 $b(r)$  和  $n(r)$  的傅里叶变换。 $M \circledast Q$  是  $M$  与  $Q$  的卷积。为了方便起见,考虑  $x$  方向,有

$$\begin{aligned} I(v_x) = & \frac{1}{2}M \circledast Q(v_x - v_{0x}) + \frac{1}{2}M \circledast Q^*(v_x + v_{0x}) + \frac{1}{2}H \circledast Q \circledast Q(v_x - 2v_{0x}) + \\ & \frac{1}{2}H \circledast Q^* \circledast Q^*(v_x + 2v_{0x}) + B(v_x) + N(v_x). \end{aligned} \quad (6)$$

在频谱图上,前四项分别集中在  $v_{0x}$ 、 $-v_{0x}$ 、 $2v_{0x}$  和  $-2v_{0x}$  位置上,而背景噪声项  $N(v_x)$  主要集中在零级谱处,而随机噪声  $B(v_x)$  主要分布在高频区域。然后在频谱图上取出一级谱  $G_x = (\frac{1}{2})M \circledast Q(v_x - v_{0x})$ ,如图 4(a)所示。在  $y$  方向频谱图上取出一级谱  $G_y = (\frac{1}{2})M \circledast Q(v_y - v_{0y})$ ,如图 4(b)所示。为了去掉载波成分  $v_{0x}$ ,将  $G_x$  项在频谱图上移动  $v_{0x}$  量到原点,即  $G_x \circledast \delta(v_x + v_{0x})$ 。此时  $G_x$  成为  $G'_x = (\frac{1}{2})M \circledast Q(v_x)$ 。对该项进行傅里叶反变换,就有:

$$\mathcal{F}^{-1}\{G'_x(v_x)\} = g_x(x, y) = \frac{1}{2}m \exp[i\mathcal{Q}(x, y)]. \quad (7)$$

通过(7)式就可以算出相位项  $\mathcal{Q}(x, y)$ ,

$$\mathcal{Q}(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}[g_x(x, y)]}{\text{Re}[g_x(x, y)]}.$$

同理可得

$$\mathcal{Q}(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}[g_x(x, y)]}{\text{Re}[g_x(x, y)]}.$$

根据剪切干涉波像差与波前斜率的关系,在剪切量  $s$  较小时可推得

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \approx \frac{\Delta W_x(x, y)}{s} = \frac{\lambda \mathcal{Q}}{2\pi s}. \quad (8)$$

同理可得  $y$  方向的表达式

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \approx \frac{\Delta W_y(x, y)}{s} = \frac{\lambda \mathcal{Q}}{2\pi s}. \quad (9)$$

利用波前斜率(8)式和(9)式就可以重构波面或波像差  $w(x, y)$ 。通过检测镜面变形前后反射的检测光的波前波像差变化,就可推知镜面变形情况。

在重构波前时,通常的做法是采用模式法(即泽尼克多项式拟合波前)或区域法拟合波前。但这两种方法运算量大,尤其不适合采样点较多的干涉情况,且比较繁琐,因此我们采用直接数值积分的方法。

波前上任意两点间的波像差为  $w(r)$ ,则有

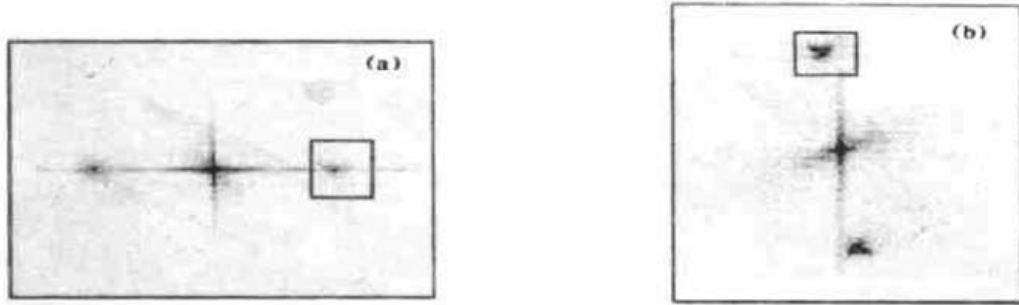


Fig. 4 The diagram of frequency spectrum. (a) In the direction of  $x$ ; (b) In the direction of  $y$ .

$$w(r) = \int_C \nabla w(r) ds + w(r_0), \quad (10)$$

$\nabla w(r)$  是波像差梯度,  $C$  是积分路径, 通常这一积分是与路径无关的, 但当存在测量噪声时, 上式积分将与路径有关。此时

$$\nabla w(r) = \nabla w_1(r) + n(r),$$

式中  $\nabla w_1(r)$  是真正的波像差梯度,  $n(r)$  是噪声项。如果直接利用(10)式积分, 将会出现很大的积累误差, 因此在这之前必须首先消除噪声。如前所述, 通过窄带滤波, 极大地提高了信噪比, 很大程度上消除了噪声影响, 使得我们能够利用(10)式进行数值积分直接求波像差  $w(r)$ 。同时, 我们还采取了两图像信息相减的措施, 即由镜面变形引起的波像差与原始波像差作减法运算, 以及通过与基准点的波像差  $w(r_0)$  的不断修正, 进一步消除了系统误差和噪声影响, 保证了直接数值积分拟合波前的有效性和实现较高精度的测量。

### 3 试验结果

由于该二维剪切干涉系统测量的是反射镜的变形量  $\Delta$ , 它与波前波像差关系为  $\Delta = \Delta W / 2\cos\alpha$ , 这里  $\alpha$  为检测激光束与待测镜光轴间的夹角。为了在不修改程序的情况下检验该二维剪切干涉测量系统, 在测量中人为地取  $\alpha = 60^\circ$ , 则  $\Delta = \Delta W$ 。测试系统光路如图 5 所示, 扩束镜 1 和准直镜 2 组成的系统使激光器发出的光为准直光。若准直光有一个小的离焦量  $\Delta x$ , 则光束波前为一球面波, 把离焦量  $\Delta x$  从 3.5 mm 开始, 每次前进 0.5 mm, 一直调到 8.5 mm 处, 测得的最大波像差(以 3.5 mm 时的波前为基准, 计算值和测量值均为各波面与该基准面的高度差)及其理论值如表 1 所示。最大波像差理论计算值为  $w = R - (R^2 - L^2/4)^{1/2}$ , 其中  $R$  为测量面上光波前曲率半径(按几何光学原理, 当  $\Delta x$  在透镜 2 焦点内侧时,  $R = f^2/\Delta x - f + d$ )。本实验中测量面直径  $L = 53.0271$  mm, 透镜 2 的焦距  $f = 402$  mm, 测量面到透镜 2 的距离  $d = 529$  mm。通过与理论计算值比较, 在波像差测试范围  $\pm 10 \mu\text{m}$  内, 方差不超过  $0.257 \mu\text{m}$ 。

为检测该系统的灵敏度, 把离焦量从 4.5 mm 开始每次前进 0.02 mm, 一直调到 4.6 mm 处, 所测得的数据如表 2 所示(测量时, 以  $\Delta x = 0.45$  mm 时的波前为基准面)。

根据表 2 测量结果和本实验中  $\Delta x$  所能达到的精度  $0.002$  mm, 确定了灵敏度为  $0.05 \mu\text{m}$ 。

从实验结果看, 由于采用了一系列去除噪声的措施, 波前重构中的直接数值积分是成功的, 并取得了较好的精度。

我们也对一个高能激光器的腔镜、窗口以及强激光照射的腔外全反射镜面等的热变形进行了实时检测。获得了整个变形过程的干涉条纹图, 在此基础上任选两个时刻的条纹图与初始条纹图进行处理, 最后得到了相应时刻镜面变形的结果。选取了强激光照射腔外镜引起热变形

在第1秒和第3秒两个时刻的图,如图6所示。其中图6(a)、图6(b)、图6(c)和图6(d)分别是这两个时刻的镜面变形的平面灰度图和立体图,而图6(e)、图6(f)是画线部分(对应于 $y$ 轴)的镜面变形情况。

Table 1 The wavefront deformation data of the measuring laser

variation out of focus $\Delta x / \text{mm}$	maximum wavefront distortion		error		
	theory values $/\mu\text{m}$	measuring values $/\mu\text{m}$	absolute error $/\mu\text{m}$	relative error $/\%$	standard error $\sigma / \mu\text{m}$
4.0	1.0810	1.113	0.0320	2.960	0.257
4.5	2.1613	2.196	0.0347	1.606	
5.0	3.2407	3.234	-0.0067	0.207	
5.5	4.3193	4.285	-0.0343	0.794	
6.0	5.3970	5.338	-0.0590	1.093	
6.5	6.4739	6.321	-0.1529	2.362	
7.0	7.5499	7.316	-0.2339	3.098	
7.5	8.6251	8.229	-0.3961	4.592	
8.0	9.6995	9.261	-0.4385	4.521	
8.5	10.773	10.297	-0.4760	4.418	

Table 2 The wavefront deformation data of the measuring laser

variation out of focus $\Delta x / \text{mm}$	maximum wavefront distortion		error
	theory values $/\mu\text{m}$	measuring values $/\mu\text{m}$	absolute error $/\mu\text{m}$
4.52	0.0433	0.067	0.0237
4.54	0.0864	0.128	0.0416
4.56	0.1296	0.173	0.0434
4.58	0.1727	0.215	0.0423
4.60	0.2160	0.249	0.0330

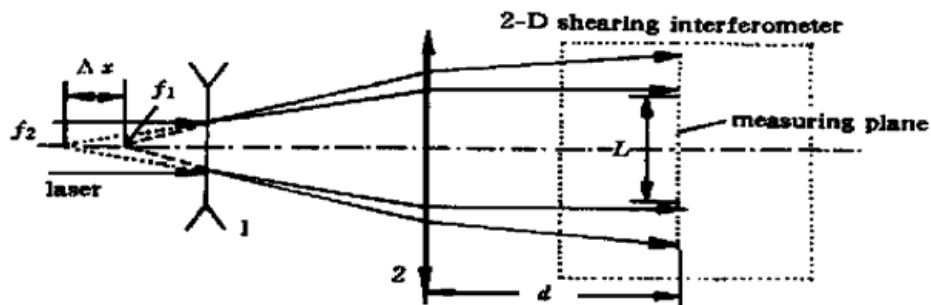


Fig. 5 The schematic diagram of measuring the laser wavefront

试验结果表明,整个镜面变形过程是一个慢变化过程,光强强地方变形大。我们成功地实现了强激光镜面变形动态检测,而且为进一步的研究提供了可靠依据。

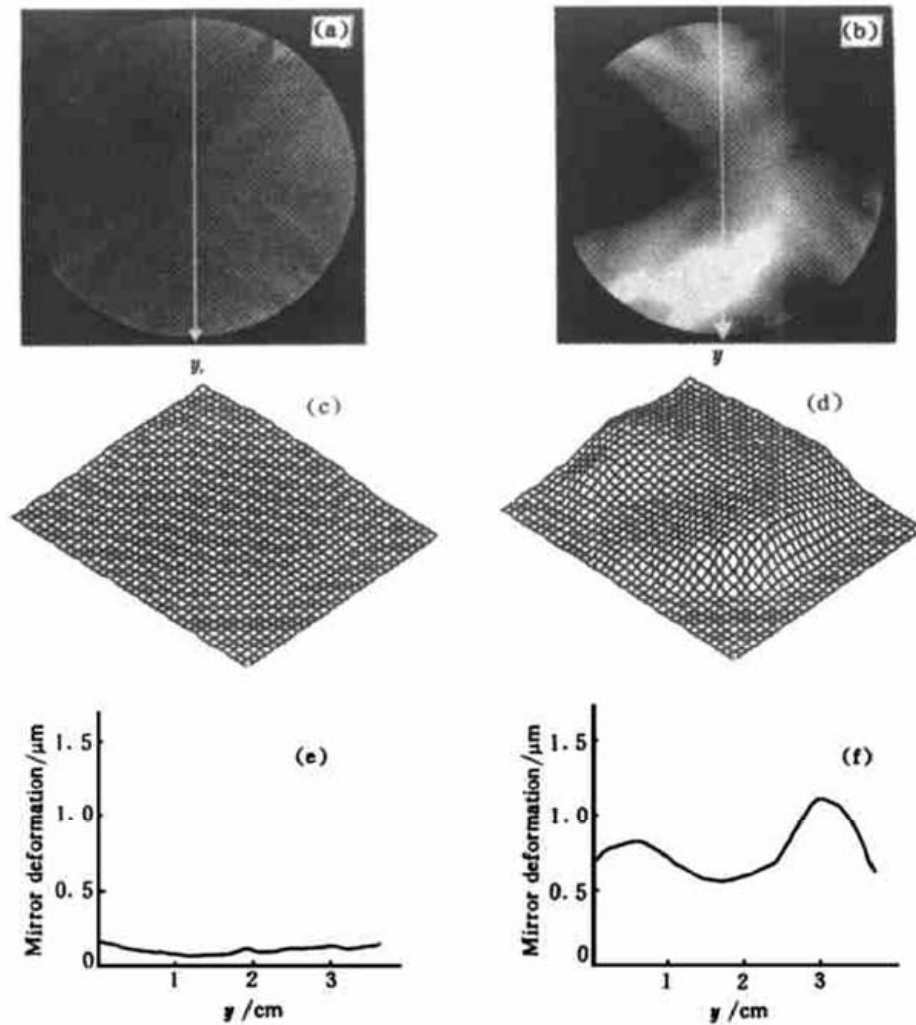


Fig. 6 1-D, 2-D and 3-D display of the degree of the resonator mirror deformation after a period of time  $t$  when the laser is impinging on the mirror. (a) 2-D display,  $t = 1$  s; (b) 2-D display,  $t = 3$  s; (c) 3-D display,  $t = 1$  s; (d) 3-D display,  $t = 3$  s; (e) 1-D display,  $t = 1$  s; (f) 1-D display,  $t = 3$  s.

**结束语** 提出的这种二维剪切干涉光路布局,采用一系列有效的数字图像处理技术和措施,具有独到的优点。

1) 本系统采用两块平板玻璃进行二维剪切,继承了传统的剪切干涉技术的光路简捷,精度和灵敏度都较高的优点,实现了二维全场检测。

2) 采用序列图像信号处理技术,做到了每秒钟25帧的连续采集和对图像进行连续处理。成功地利用二维剪切干涉系统实现了强激光腔镜变形过程中的动态检测。

3) 在数字图像处理过程中采用了光载波技术和基于二维傅里叶变换的频域分析技术,对信号实现了窄带滤波;采取两图像信息的减运算措施,和与基准点波像差的修正,极大地消除了噪声的影响,提高了检测精度。

4) 在上述措施前提下,波前重构中采用了简单的数值积分的方法,提高了处理速度,同时获得了较高精度的检测。

试验表明,该系统完全能满足强激光腔镜变形动态检测,并于1998年通过了中国计量科学院的认证。通过适当的改变,还可望对强激光光强分布进行检测,因此,该系统的研究具有广泛的价值。

## 参 考 文 献

- [1] 苏大图, 沈海龙, 陈进榜 等. 光学测量与像质鉴定. 北京: 北京工业学院出版社, 1988. 6, 178~ 268
- [2] Bne D J, Bachor H A, Sandeman R J. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(10/15): 1653~ 1660

## Optical-Path-Splitting 2-D Shearing Interferometer System for Deformation Study of High Power Laser Resonator Mirrors

Fu Lei<sup>1)</sup> Xing Jianguo<sup>1)</sup> Shi Hongmin<sup>2)</sup> Ni Shouyong<sup>2)</sup>  
Lu Yaodong<sup>2)</sup> Wang Lin<sup>3)</sup> Sang Fengting<sup>3)</sup>

- 1), *Department of Opto-Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*  
2), *Beijing Institute of Opto-Electronic Technology, Beijing, 100010*  
3), *Dalian Institute of Chemical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Dalian 116012*

(Received 26 April 1999; revised 14 September 1999)

**Abstract** An optical-path-splitting 2-D shearing interferometric opto-electronic measuring system is introduced. The tests in two orthogonal directions can be implemented at the same time and the automation of data processing is achieved with the system and the simple method of digital integration can be well adopted in the wave-front reconstruction by taking a series of steps of removing noise and subtracting the mirror surface datum before and after the deformation. The measuring standard error is below  $0.257 \mu\text{m}$  within  $\pm 10 \mu\text{m}$  range of the deformation and the sensitivity is  $0.05 \mu\text{m}$ . The deformation dynamic tests of high power laser resonator mirror was successfully demonstrated in real time.

**Key words** 2-D shearing, interference, high power laser, measurement of resonator mirror deformation.