

文章编号: 0253-2239(2006)02-0269-6

马赫-曾德尔型相移矢量剪切干涉仪

徐荣伟 刘宏展 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘要: 为了实现对激光波面的等光程测试,设计了一个新颖的相移矢量剪切干涉仪。该干涉仪以马赫-曾德尔结构为基础,为等光程干涉仪。通过在相干的两路光束中分别插入楔角方向正交放置的楔板实现矢量剪切;其中一块楔板分成两块(平板部分和楔板部分),楔板部分沿平板部分的表面移动,通过改变光程差来实现相移, 2π 相移所需的移动距离为几毫米的量级,该相移方法在相移精度控制上比较简单。文中还对楔板引入的横向剪切误差和相移误差进行了分析,最后给出了实验所得的一组相移干涉图。

关键词: 光学器件;干涉仪;相移;矢量剪切;楔板;等光程

中图分类号: TN744.3 文献标识码: A

Phase-Shifting Vectorial-Shearing Interferometer with Mach-Zehnder Configuration

Xu Rongwei Liu Hongzhan Liu Liren

(Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: A novel phase-shifting vectorial-shearing interferometer with a wedge plate phase-shifter is presented to measure the laser wavefront, which is common-path and based on Mach-Zehnder configuration. Vectorial shear (shearing in x and y directions simultaneously) in arbitrary direction is introduced by inserting two wedge plates orthogonally in two arms, respectively. One of wedge plates is split into two parts (parallel part and wedge part), and the phase shift is produced by moving the wedge part in contact along the parallel part, which results in the variation of the optical path difference. The moving distance for 2π phase shift is about several millimeters in a specific condition. Wedge plate phase-shifter increases the moving distance of PSI and makes the control of phase shift relatively easy. The lateral shear errors and phase shift errors induced by wedge plates are also discussed, and the experimental results of phase-shifting vectorial-shearing interference fringes are given.

Key words: optical device; interferometer; phase-shifting; vectorial-shearing; wedge plate; aplanatism

1 引 言

在光学测试中,考虑到光源的时间相干性,对相干长度较短的光源,比如激光二极管光源或宽带光源(如白光)等,常常要求等光程测试。同时,为保证测量精度,对参考光束的质量又有较高的要求,在这种情况下通常考虑使用剪切干涉的方法。剪切干涉仪广泛应用于波面测试和光学车间检验^[1],由于不需要单独的理想参考面,是通过原始波面与其自身的、被剪开的波面在重叠范围内干涉,有效减小了系统误差,因而得到广泛应用。通常的剪切干涉仪均

为单向剪切(x 方向或 y 方向),在对非球面或非轴对称光学元件的测试过程中往往需要旋转待测光学元件,很不方便。于是, Gonzalo Paez 等^[2~4]提出了一种矢量剪切干涉仪,即同时在 x 或 y 方向产生剪切;另外, Primot 和 Sogno^[5~7], Jean-Christophe Chanteloup 等^[8,9]先后又提出了一种三波面(或多波面)的剪切干涉技术,这些技术同时采集波面的多元微分信息,有效提高了原始波面的重建精度^[10],同时也为非球面或非轴对称光学元件的测试提供了一种可选择的方案。

作者简介: 徐荣伟(1975~),男,江苏溧阳人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光机结构的有限元分析和干涉测试技术的研究。E-mail: rwxu@sohu.com

收稿日期: 2005-04-21; 收到修改稿日期: 2005-06-23

近年来,相移干涉技术(PSI)被用于干涉条纹的分析和处理^[11],相移干涉技术通过记录一系列参考相位变化的干涉条纹,然后逐点恢复原始波面的相位。通常,相移干涉技术是采用由压电陶瓷(PZT)^[12,13]驱动下的平面镜在周期内移动产生相移。但是由于压电陶瓷移相器的灵敏度问题,以及非线性、迟滞特性、量化等一系列误差对相移精度产生影响,同时对环境振动较敏感^[14]。因而,有人提出其他产生相移的方法,例如采用偏正相移器^[15]、光栅^[16]、液晶延迟器^[17]、楔板(或平板)^[18~22]等。

本文提出了一种新颖的相移矢量剪切干涉仪,该干涉仪基于马赫-曾德尔结构,为等光程干涉仪,适用于相干长度较小的激光波面的精密测试。文献[2~4]中,Gonzalo Paez等采用双棱镜的相对旋转产生矢量剪切,通过控制旋转角度,可以改变剪切量的大小和方向。本文产生矢量剪切的方法不同于上述方法,通过在马赫-曾德尔干涉仪相干的两路光束中分别插入楔角方向正交放置的楔板实现矢量剪切;并且将其中一块楔板切成两块(平板部分和楔板部分),楔板部分沿平板部分的表面移动,通过改变透射光束的光程差来实现相移,一般实现 2π 相移的移动距离为几毫米的量级。

2 矢量剪切原理

如图1所示,马赫-曾德尔型相移矢量剪切干涉仪,其构成包括:两块分束平板、两块反射平板,两块楔板(一块为分离式WP1,另一块为整合式WP2),CCD相机和干涉条纹处理系统。待测波面经分束平板1分束为A、B两光束,A波面经楔板1后产生沿 x 方向的剪切和倾斜,B波面经楔板2后产生沿 y 方向的剪切和倾斜,A、B两波面再经过分束平板

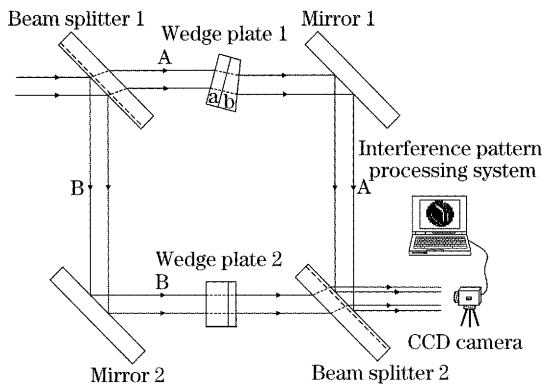


图1 马赫-曾德尔型相移矢量剪切干涉仪

Fig. 1 Schematic of phase-shifting vectorial-shearing interferometer with a wedge plate phase-shifter

2后相干,产生在 x 、 y 方向同时剪切的矢量剪切干涉条纹,干涉条纹成像在CCD相机的接收面上,通过接口传输到计算机,再由干涉条纹处理系统进行数据处理,最后得到原始波面的相位信息。

由图1和图2可见,两块楔板WP1和WP2楔角正交地放置于两相干光束中,在 x 和 y 方向同时产生剪切,剪切量分别为 S_x 和 S_y (如图3所示)。由于沿任何方向的剪切总能分解为 x 和 y 方向的剪切,所以只要选择合适的入射角,就可以得到沿任意方向 θ 角的矢量剪切 ρ 。同时,A、B光束经两块楔板后引入了分别沿剪切方向的倾斜角 β_x 和 β_y 。

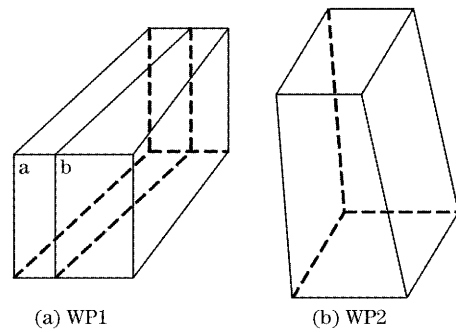


图2 楔板(剪切和相移元件)

Fig. 2 Wedge plates as shearing components and phase shifter

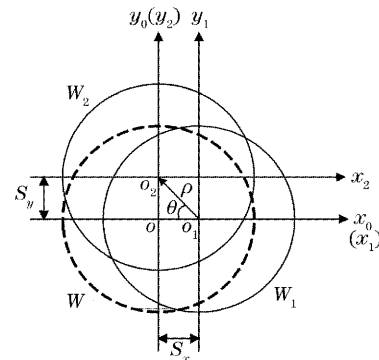


图3 矢量剪切原理

Fig. 3 Principle of vectorial shearing

图3中, W 为原始波面, W_1 、 W_2 分别为沿 x 和 y 方向的剪切波面; S_x 和 S_y 为对应的剪切量; β_x 和 β_y 为剪切波面的倾斜角。当剪切量较小时,两个剪切波面的光程差可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta W(x, y) &= W_2(x, y) - W_1(x, y) = \\ &= W(x, y - S_y) - W(x - S_x, y) + \beta_y y - \beta_x x = \\ &= \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} S_x - \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} S_y + \beta_y y - \beta_x x, \end{aligned} \quad (1)$$

如图4,光束经过楔板后,产生的剪切量 S 为

$$S = \frac{d \cos \alpha \sin(\theta_1 - \theta_2) \cos \theta_3}{\cos(\theta_1 + \alpha) \cos(\theta_2 + \alpha)}, \quad (2)$$

其中 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别为光束入射角、折射角和出射角; α 为楔板的楔角; d 为楔板的平均厚度。 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 α 的关系满足折射定理, 即 $\sin \theta_1 = n \sin \theta_2$ 和 $n \sin(\theta_2 + \alpha) = \sin \theta_3$, n 为楔板的折射率。

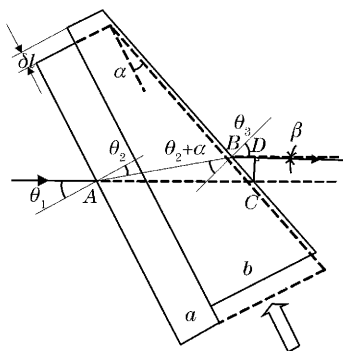


图 4 相移原理

Fig. 4 Principle of phase shifting

同时, 在楔角 α 较小的情况下, 楔板引入的波面倾斜角 β 可以表示为

$$\beta = \left(\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1} - 1 \right) \alpha. \quad (3)$$

WP1 由精密的线性位移和旋转调整机构驱动, 线性位移最小分辨力为 $1 \mu\text{m}$, 经电子细分后旋转的分辨力可达 $5''$; WP2 则装卡在一个精密的俯仰调整机构上。

3 楔板相移原理

在相移矢量剪切干涉仪中, 楔板既是剪切和倾斜元件, 也是相移元件。使用楔板或平板作为相移元件, 在许多的文献中已有描述^[18~22], 在这里, 我们提出了一种新颖的楔板相移结构。如图 2 和图 4 所示, 楔板 WP1 被切成两部分, 平板部分 a 和楔板部分 b, 在线性位移驱动器的驱动下楔板 b 沿平板 a 的表面移动, 通过改变楔板的厚度而改变透射光的光程差来产生相移。

如图 4 所示, 在光路中插入楔板后, 产生的原始波面和剪切波面的光程差 Δ 可以写成

$$\Delta = nAB + BD - AC, \quad (4)$$

根据几何关系, 利用三角形中的正弦定理可以得到 Δ 的具体形式如下:

$$\Delta = d \cos \alpha \frac{n \cos(\theta_1 + \alpha) + \sin \theta_3 \sin(\theta_1 - \theta_2) - \cos(\theta_2 + \alpha)}{\cos(\theta_1 + \alpha) \cos(\theta_2 + \alpha)}, \quad (5)$$

当楔板 b 沿平板 a 的表面移动距离为 δl 时, 楔板 WP1 的厚度变为 $d + \delta d$, 其中, $\delta d = \delta l \tan \alpha$, 则导致的光程差的变化量 $\delta(\Delta)$ 为

$$\delta(\Delta) = \delta l \sin \alpha \frac{n \cos(\theta_1 + \alpha) + \sin \theta_3 \sin(\theta_1 - \theta_2) - \cos(\theta_2 + \alpha)}{\cos(\theta_1 + \alpha) \cos(\theta_2 + \alpha)}, \quad (6)$$

在相移技术中, 最大的相移量为 2π 时, 相应的光程差的变化量为一个波长 λ 。当 $\delta(\Delta) = \lambda$ 时, 对应 2π 相移的移动距离可以求得为

$$l_\lambda = \lambda \frac{\csc \alpha \cos(\theta_1 + \alpha) \cos(\theta_2 + \alpha)}{n \cos(\theta_1 + \alpha) + \sin \theta_3 \sin(\theta_1 - \theta_2) - \cos(\theta_2 + \alpha)}, \quad (7)$$

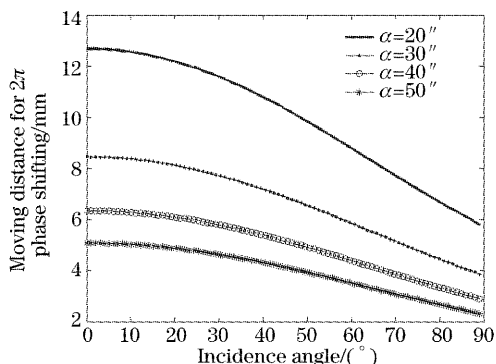
图 5 2π 相移所需的移动量

Fig. 5 Moving distance for a 2π phase shift
当波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $n = 1.5147$, $\alpha = 20'' \sim 50''$

时, 移动距离随入射角 θ_1 的变化关系如图 5 所示。由图中可见, 当入射角 θ_1 为 $0 \sim 90^\circ$ 时, 实现 2π 相移所需的位移量大约为几毫米的量级; 并且, 当入射角为定值时, 楔角越小所需的位移量越大, 实现相移也就越容易; 实现 2π 相移所需的位移量远大于其他的相移方法(如压电陶瓷)。因而, 楔板相移器提高了相移所需的位移量, 使得相移的精度控制相对容易。

4 误差分析

关于马赫-曾德尔干涉仪的误差源分析在许多文献已有阐述, 本文仅讨论与楔板相关的误差。

4.1 剪切量误差

由(1)式可见,在相移过程中,剪切量 S 随楔板

的厚度 d 变化。将(1)式对 d 微分,并取 $\delta l = l_\lambda$, 则可以得到 2π 相移导致的剪切量误差 δS :

$$\delta S = \lambda \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2) \cos \theta_3}{n \cos(\theta_1 + \alpha) + \sin \theta_3 \sin(\theta_1 - \theta_2) - \cos(\theta_2 + \alpha)}, \quad (8)$$

当 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $n = 1.5147$, $\alpha = 20'' \sim 50''$, δS 随入射角 θ_1 的变化如图 6 所示。

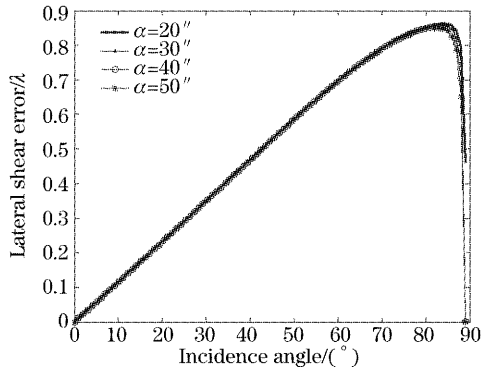


图 6 横向剪切误差图

Fig. 6 Lateral shearing error

由图 6 可见,由于楔角 α 是一个小量,因而当 α 变化时 δS 基本不变, δS 主要随入射角 θ_1 变化。最大的剪切量误差 δS 不超过 0.9λ , 相对于通常的剪切量(毫米量级),该值可以忽略。

4.2 相移误差

(6)式中,光程差的改变量 $\delta(\Delta)$ 是楔角 α 、入射角 θ_1 、移动距离 δl 和折射率 n 的函数,通过对该式全微分,可以求出由于自变量 α 、 θ_1 、 δl 和 n 的误差(设各项误差为小量,并忽略高阶小量)所导致的光程差改变量 $\delta(\Delta)$ 的误差,即相移误差:

$$d\delta(\Delta) = \frac{\partial \delta(\Delta)}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial \delta(\Delta)}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \frac{\partial \delta(\Delta)}{\partial (\delta l)} \delta (\delta l) + \frac{\partial \delta(\Delta)}{\partial n} \delta n. \quad (9)$$

设楔板材料为 K9, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 时, $n = 1.5147$, $\alpha = 22''$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\delta l = l_\lambda = 10.523 \text{ mm}$ (2π 相移的位移量); 自变量 α 、 θ_1 、 δl 和 n 的误差分别为: $\delta \alpha = 0.5''$, $\delta \theta_1 = 10''$, $\delta (\delta l) = 0.001 \text{ mm}$ 和 $\delta n = 0.0001$ 。则根据(9)式,可以求出各项误差产生的独立相移误差分别为: 0.0227λ , $1.7 \times 10^{-5}\lambda$, $9.5 \times 10^{-5}\lambda$, $1.88 \times 10^{-4}\lambda$ 。在最不利的情况下,即当这些误差效应累加时,最大的相移误差为 0.023λ 。从中可以看出,相移的最大误差源是楔角误差。下面单独求出楔角误差导致的相移误差,

$$d_\alpha \delta(\Delta) = \frac{\partial \delta(\Delta)}{\partial \alpha} d\alpha =$$

$$\left\{ \delta l \cos \alpha \left[\frac{n}{\cos(\theta_2 + \alpha)} - \frac{1}{\cos(\theta_1 + \alpha)} + \frac{n \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_2 + \alpha)}{\cos(\theta_1 + \alpha) \cos(\theta_2 + \alpha)} \right] + \delta l \sin \alpha \left[\frac{n \sin(\theta_2 + \alpha)}{\cos^2(\theta_2 + \alpha)} - \frac{\sin(\theta_1 + \alpha)}{\cos^2(\theta_1 + \alpha)} + \frac{n \sin(\theta_1 - \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)}{\cos^2(\theta_1 + \alpha) \cos(\theta_2 + \alpha)} + \frac{n \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin^2(\theta_2 + \alpha)}{\cos(\theta_1 + \alpha) \cos^2(\theta_2 + \alpha)} \right] \right\} d\alpha. \quad (10)$$

当入射角 $\theta_1 = 30^\circ$, 楔角误差 $d\alpha = 0.5''$ 时, 楔角误差导致的相移误差随楔角的变化如图 7 所示。由图中可见,相移误差基本上反比于楔角大小,因而增加楔角 α 可以有效减小相应的相移误差。此外,由于楔角误差在相移过程中是定值,所以在测量初始时,精密测量楔角的大小(即尽量减小 $\delta \alpha$ 的值),可以有效减小该项误差导致的相移误差。

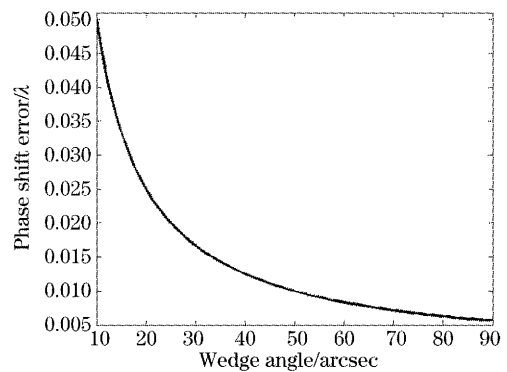


图 7 楔角误差导致的相移误差

Fig. 7 Phase shift error due to wedge angle error

5 实 验

为了检验马赫-曾德尔型相移矢量剪切干涉仪的性能,我们作了以下矢量剪切的相移干涉实验。实验结构如图 1 所示,所有光学元件材料为 K9 玻璃,采用的光源为 He-Ne 激光,波长为 632.8 nm , 折射率为 1.5147 , 激光束由显微物镜($20\times$)和针孔($15 \mu\text{m}$)滤波后,再经平行光管准直,出射光束孔径为 30 mm 。两块楔板的平均厚度均为 20 mm , 楔角 α 为 $22''$ 。在 $0 \sim 2\pi$ 周期内实现相移时,楔板相移器

WP1 的 a、b 间相对位移量为 $\delta l: 0 \sim l_\lambda$ ($l_\lambda = 10.88 \text{ mm}$), 每隔 $\pi/2$ 进行相移, 相移量为 $\Delta\phi=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$, 对应的相移干涉图如图 8 所示。

由图中可见, 在经历了一个周期的相移后干涉条纹又恢复到初始状态。

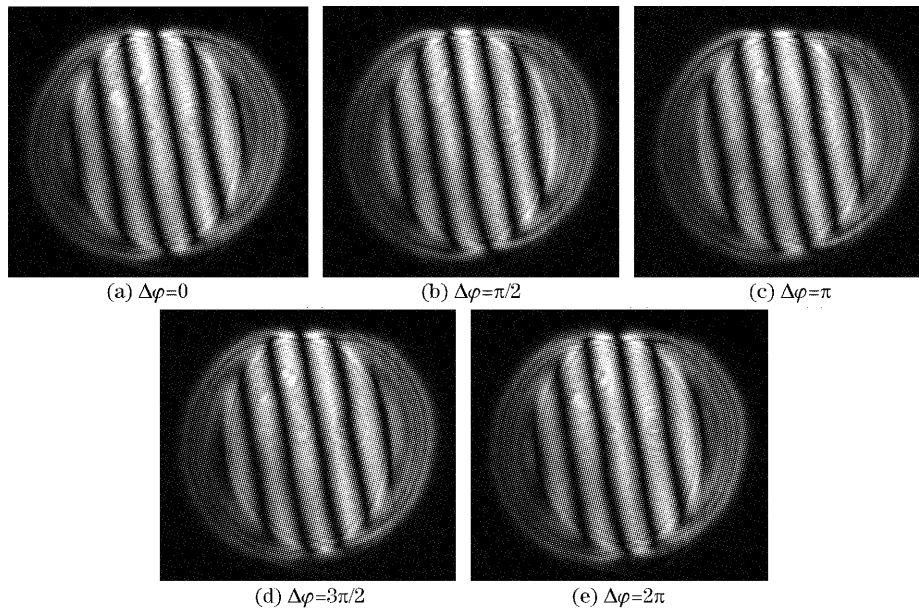


图 8 相移干涉条纹

Fig. 8 Phase shifting interference fringes related to the movement of the wedge plate

6 结 论

为了对激光波面像差进行等光程测量, 本文设计了一个新颖的相移矢量剪切干涉仪。该干涉仪以马赫-曾德尔结构为基础, 为等光程干涉仪。通过在相干的两路光束中分别插入楔角方向正交放置的楔板实现矢量剪切; 其中一块楔板分成两块(平板部分和楔板部分), 楔板部分沿平板部分的表面移动, 通过改变透射光束的光程差来实现相移, 实现 2π 相移的移动距离为几毫米的量级, 该相移方法在相移精度控制上比较简单。文中还对楔板引入的误差进行了分析, 横向剪切误差为波长量级, 可以忽略。楔板相移器的楔角误差是相移误差的主要原因, 但该误差为系统误差, 可以通过初始的精密测量使之最小化。最后, 文中还给出了一组实验所得的相移干涉条纹, 验证了该干涉仪的性能和相关结论。下一步的工作将主要研究该干涉仪的灵敏度, 并且尝试将该干涉仪用于衍射极限波面的测量^[23]。

致谢 对信息光学实验室的栾竹副研究员和殷耀祖高工在实验过程中给予的指导和帮助表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 M. V. Mantravadi. *Lateral Shearing Interferometers*. *Optical Shop Test* [M]. Second edition, D. Malacara, ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992. 123~172
- 2 Gonzalo Paez, Marija Strojnik, Guillermo Garcia Torales. Vectorial shearing interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(28): 5172~5178
- 3 Marija Strojnik, Guillermo Garcia Torales, Gonzalo Paez. Vectorial shearing interferometer[J]. *Proc. SPIE*, 1999, **3744**: 529~539
- 4 Guillermo Garcia Torales, Gonzalo Paez, Marija Strojnik. Simulations and experimental results with a vectorial shearing interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(5): 767~773
- 5 J. Primot. Three-wave lateral shearing interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(31): 6242~6249
- 6 J. Primot, L. Sogno. Achromatic three-wave (or more) lateral shearing interferometer[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1995, **12**(12): 2679~2685
- 7 Jerome Primot, Nicolas Guerineau. Extended Hartmann test based on the pseudoguiding property of a Hartmann mask completed by a phase chessboard [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(31): 5715~5720
- 8 Jean-Christophe Chanteloup, Frederic Druon, Marc Nantel *et al.*. Single-shot wave-front measurements of high-intensity ultrashort laser pulses with a three-wave interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(8): 621~623
- 9 J. C. Chanteloup. Multiple-wave lateral shearing interferometry for wave-front sensing [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(9): 1559~1571
- 10 Sabrina Velghe, Jerome Primot, Nicolas Guerineau. Wave-front reconstruction from multi-directional phase derivatives generated by multilateral shearing interferometers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(3): 245~247
- 11 J. E. Greivenkamp, J. H. Bruning. *Phase Shifting*

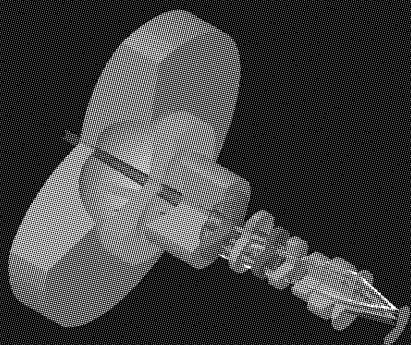
- Interferometers. Optical Shop Testing* [M]. Second edition, D. Malacara, ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992. 501~598
- 12 Chen Jinbang, Chen Lei, Wang Qing *et al.*. A large aperture phase-shifting CO₂ laser interferometer [J]. *Chin. J. Lasers*, 1998, **A25**(1): 31~36 (in Chinese)
陈进榜, 陈磊, 王青等. 大孔径移相式 CO₂ 激光干涉仪 [J]. *中国激光*, 1998, **A25**(1): 31~36
- 13 Chen Jinbang, Song Dezheng, Zhu Rihong *et al.*. High accuracy and large aperture optical standard-phase shifting digital flat interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 480~485 (in Chinese)
陈进榜, 宋德真, 朱日宏等. 高精度、大口径平面波像差标准-移相式数字平面干涉仪 [J]. *光学学报*, 1995, **15**(4): 480~485
- 14 Katherine Creath. Phase-measurement interferometry: Beware these errors [J]. *Proc. SPIE*, 1991, **1553**: 213~220
- 15 Mahendra P. Kothiyal, Claude Delisle. Shearing interferometer for phase shifting interferometry with polarization phase shifter [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(24): 4439~4442
- 16 G. W. R. Leibbrandt, G. Harbers, P. J. Kunst. Wave-front analysis with high accuracy by use of a double-grating lateral shearing interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(31): 6151~6161
- 17 DeVon W. Griffin. Phase-shifting shearing interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(3): 140~141
- 18 Sanjib Chatterjee. Measurement of surface figure of plane optical surfaces using Fizeau interferometer with wedge phase-shifter [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2005, **37**(1): 43~49
- 19 Greivenkamp E, Bruning J H. *Phase Shifting Interferometry. Optical Shop test* [M]. D. Malacara, ed. John New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992. 507
- 20 Suezou Nakadate. Phase shifting speckle shearing polarization interferometer using a birefringent wedge [J]. *Opt. Lasers in Engng.*, 1997, **26**: 331~350
- 21 Jae Bong Song, Yun Woo Lee, In Won Lee *et al.*. Simple phase-shifting method in a wedge-plate lateral-shearing interferometer [J]. *App. Opt.*, 2004, **43**(20): 3989~3992
- 22 Hyun-Ho Lee, Jang-Hoon You, Seung-Han Park. Phase-shifting lateral shearing interferometer with two pairs of wedge plates [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22): 2243~2245
- 23 Zhu Luan, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Jamin double-shearing interferometer for diffraction limited wave-front test [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(9): 1819~1824

• 广告 •



光研科学有限公司

光学软件权威供应商



ZEMAX[®]

光学设计软件

TFCIac[®]

薄膜设计软件

欢迎致电或浏览网页
了解软件订购和课程安排详情

新加坡电话/传真: 65-65643659/65649627
南京电话/传真: 025-57929358/57929359
深圳电话: 0755-27698403

福州电话/传真: 0591-83730680/83721062
北京电话/传真: 010-67126765/67113155
[http:// www.wavelab-sci.com](http://www.wavelab-sci.com)