

文章编号: 0258-7025(2009)05-1156-04

# 相移雅满横向剪切干涉仪

王利娟 刘立人 栾竹 孙建锋 周煜

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 雅满横向剪切干涉仪是一种很重要的波面检测仪器,特别是可以对白光的波面进行检测。为了弥补传统雅满横向剪切干涉仪的不足,提出了一种相移雅满横向剪切干涉仪。它是在雅满横向剪切干涉光路中插入起偏器,1/4 波片和检偏器所形成,实现了剪切干涉与相移的结合,能有效地提高测量精度,可适用于白光的波面检测,结构简单且操作方便。实验中通过旋转检偏器获得了相移干涉图,其结果很好地验证了该相移雅满横向剪切干涉仪的有效性。

**关键词** 光学器件; 横向剪切干涉仪; 相移; 波面检测

**中图分类号** TH744.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1156

## Phase Shifting Jamin Lateral Shearing Interferometer

Wang Lijuan Liu Liren Luan Zhu Sun Jianfeng Zhou Yu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Jamin lateral shearing interferometer is very useful in wavefront measurement, especially for the white light. To improve the performance, a phase shifting Jamin lateral shearing interferometer is proposed. The interferometer is formed by inserting polarizers, a quarter-wave plate and an analyzer in the Jamin lateral shearing interferometer. The shearing interference is combined with the phase shifting with a simple configuration. With phase shifting interferograms, the precision of the interferometer can be improved. The interferometer is kept as an equal optical path system. It still suits the wavefront measurement of the white light. In experiments, phase-shifting interferograms are obtained by rotating the analyzer. The usefulness of the interferometer is verified.

**Key words** optical devices; lateral shearing interferometer; phase shifting; wavefront measurement

## 1 引言

剪切干涉法是最为常用的干涉测量手段之一,它将待测波面与其复制面产生干涉,避免了采用标准波面时所引入的系统误差,具有高的测量精度。在多种剪切干涉仪中,分振幅型的雅满干涉仪是一种很重要的横向剪切干涉仪<sup>[1]</sup>。雅满干涉仪利用第一块雅满平板将待测光束分为两束,分别经过剪切平板(平行平板或者楔形平板)后由第二块雅满平板进行光束合束后形成横向剪切干涉条纹,是一种等光程横向剪切干涉仪,可用于低相干性光束的波面检测<sup>[2, 3]</sup>。同时利用剪切平板的转动,可在较大范围内调节剪切量的大小,以满足不同波面的测量范围和测量精度。因此,雅满横向剪切干涉仪以其独

特优势在波面检测等领域得到广泛应用。

传统的雅满横向剪切干涉仪仍具有一定的局限性,例如干涉条纹复杂不易进行定量分析、不易进行自动处理而影响测量精度等。在干涉测量技术中,相移技术被公认是最为有效的相位检测方法,可以很好地实现干涉图的自动识别和处理并提高测量精度<sup>[4~7]</sup>。因此,在雅满横向剪切干涉仪中引入相移技术是弥补其不足的最佳途径。Sanjib Chatterjee<sup>[8]</sup>提出了利用楔形平板的横向移动来实现雅满干涉仪的相移,由于楔形平板的移动会破坏原有的等光程干涉特性,因此它不适合于白光光束的波面检测。同时,若旋转两块楔形平板组成的剪切平板来改变其剪切量,则在移相过程中需要改变并精确控制楔形

收稿日期: 2008-05-04; 收到修改稿日期: 2008-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(60807024)资助课题。

作者简介: 王利娟(1974—),女,助理研究员,主要从事光学机械设计与光电检测技术的研究。

E-mail: siom\_wanglijuan@yahoo.com.cn

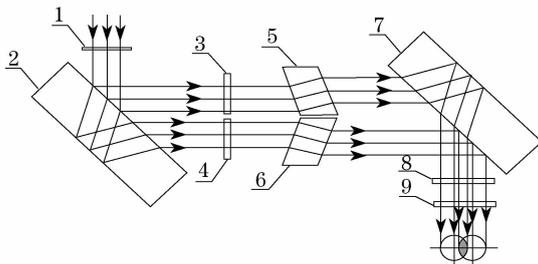
平板的步进移动量,将使相移器很复杂。

为了解决现有雅满横向剪切干涉仪的相移问题,本文提出一种采用偏振相移器的相移雅满横向剪切干涉仪,它仍然为等光程干涉且相移很简单。

## 2 相移原理

相移雅满横向剪切干涉仪的光路主要包括两块雅满平板、两块剪切平板、三块起偏器、一块 1/4 波片和一块检偏器。两块雅满平板与两块剪切平板构成了雅满横向剪切干涉光路,三块起偏器与 1/4 波片、检偏器构成了偏振相移光路,如图 1 所示。待测波面经起偏器后成为线偏振光,经过第一雅满平板前后表面的反射后分成两路,两路光束分别经过偏振方向相互垂直的起偏器、倾斜方向相反的剪切平板后偏振方向相互垂直并产生剪切,两路剪切光束经过第二雅满平板前后表面的反射后进行合束,合束后的光束经过 1/4 波片和检偏器后产生干涉。

图 1 中起偏器 3,4 的透光轴与第一雅满平板的入射面平行或者垂直,即通过起偏器 3,4 后的光束分别为第一雅满平板反射的 s 分量与 p 分量,则第二雅满平板的反射不影响它们的偏振方向。1/4 波片的快轴方向与起偏器 3,4 的透光轴分别成  $45^\circ$  角,则第二雅满平板合束后的偏振方向相互垂直的线偏振光经过它后分别变为左旋和右旋圆偏振光,当检偏器旋转时将产生与检偏器方位角相关的相移干涉图。两块雅满平板对 s, p 分量的反射率不同,为了使干涉条纹有很好的对比度,可旋转起偏器 1 使参与干涉的两束光的振幅相等。



1,3,4-polarizer; 2,7-jamin plate; 5,6-shearing plate; 8-quarter-wave plate; 9-analyzer

图 1 相移雅满横向剪切干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Jamin lateral shearing interferometer with polarization phase shifter

两块剪切平板可以选择为平行平板或者楔形平板,平行平板适合于波面高度大的待测波面,而楔形平板适合于波面高度小的待测波面。如两块剪切平板反方向同时旋转,则实现了剪切量的连续可调,将可以获得不同的测量范围和测量精度。

以  $\lambda/4$  波片的快轴为  $x$  轴,慢轴为  $y$  轴建立坐标系如图 2 所示。则被分束的两路被测光束的波面用复振幅表示为  $A\exp(j\theta_a)$ ,  $B\exp(j\theta_b)$ , 其中  $A, B$  分别为两光束的振幅,  $\theta_a, \theta_b$  为相位。 $\lambda/4$  波片的复振幅表示为  $\exp(j0)$ ,  $\exp(j\frac{\pi}{2})$ , 则两光束分别在  $x, y$  轴上的投影为

$$E_x = \exp(j0) \left[ \frac{A}{\sqrt{2}} \exp(j\theta_a) + \frac{B}{\sqrt{2}} \exp(j\theta_b) \right], \quad (1)$$

$$E_y = \exp(j\frac{\pi}{2}) \left[ \frac{A}{\sqrt{2}} \exp(j\theta_a) - \frac{B}{\sqrt{2}} \exp(j\theta_b) \right]. \quad (2)$$

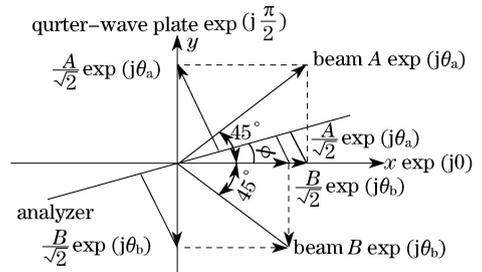


图 2 偏振光束与器件的方位角

Fig. 2 Azimuth angles of beams and components

若检偏器与  $x$  轴的夹角为  $\phi$  时,在检偏器上的投影为

$$E = \exp(j0) \cos \phi \left[ \frac{A}{\sqrt{2}} \exp(j\theta_a) + \frac{B}{\sqrt{2}} \exp(j\theta_b) \right] + \exp(j\frac{\pi}{2}) \sin \phi \left[ \frac{A}{\sqrt{2}} \exp(j\theta_a) - \frac{B}{\sqrt{2}} \exp(j\theta_b) \right], \quad (3)$$

其光强分布为

$$I = E \cdot E^* = \frac{A^2}{2} + \frac{B^2}{2} + AB \cos(\theta_a - \theta_b + 2\phi), \quad (4)$$

(4)式可以写成

$$I = 1 + K \cos(\Delta\theta + 2\phi), \quad (5a)$$

$$K = \frac{AB}{\frac{A^2}{2} + \frac{B^2}{2}}, \quad (5b)$$

其中  $K$  为比例系数,  $\Delta\theta$  为相位  $\theta_a, \theta_b$  之间的差,  $2\phi$  为旋转检偏器时产生的附加相位。当检偏器旋转  $\pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$  时,产生的相位为:  $\pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 。则

$$I_1 = 1 + K \cos(\Delta\theta + 0) = 1 + K \cos(\Delta\theta), \quad (6)$$

$$I_2 = 1 + K \cos\left(\Delta\theta + \frac{\pi}{2}\right) = 1 - K \sin(\Delta\theta) \quad (7)$$

$$I_3 = 1 + K \cos(\Delta\theta + \pi) = 1 - K \cos(\Delta\theta) \quad (8)$$

$$I_4 = 1 + K \cos\left(\Delta\theta + \frac{3\pi}{2}\right) = 1 + K \sin(\Delta\theta) \quad (9)$$

得到被测相位差为

$$\Delta\theta = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}. \quad (10)$$

利用公式(10)即可求解干涉图中每一点的相位差 $\Delta\theta$ ,经计算机处理即可获得高精度的波面检测结果<sup>[9]</sup>。

剪切平板前两块起偏器的厚度很容易实现相等。若起偏器选用偏振片,由于偏振片的面积可以很大,将一块大面积的偏振片分割成两块偏振片使用可以使两块起偏器的厚度相等。若起偏器选用偏振棱镜,则选用相同结构、尺寸的偏振棱镜即可使两块起偏器的厚度相等。合束后的光束共同通过1/4波片与检偏器,可见偏振相移器不会破坏等光程干涉特性,同时起偏器,1/4波片与检偏器易于实现消色差,故该相移雅满横向剪切干涉仪可仍然适应于低相干性光束,如白光的波面检测。同时,相移过程中只需要旋转检偏器,且剪切量的改变与相移器不相关,因此该相移雅满横向剪切干涉仪的结构简单且操作方便。

### 3 实 验

实验光路是在已有的雅满横向剪切干涉仪中插

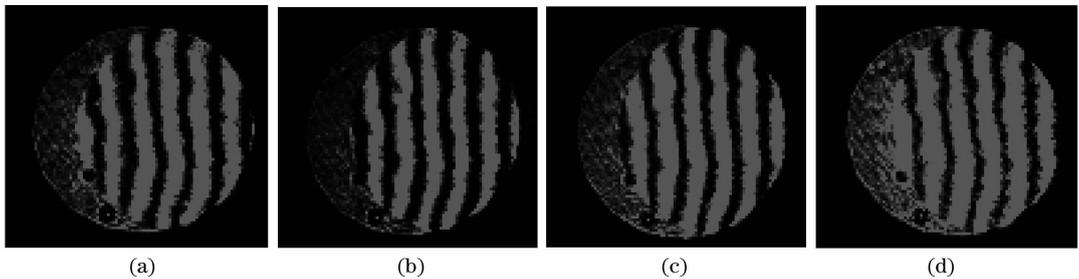


图3 旋转检偏器的相移剪切干涉图

Fig. 3 Phase shifting interferograms by rotating the analyzer

图3中干涉条纹的弯曲主要由楔形剪切平板之前的两块偏振片的面形误差所引起。楔形剪切平板之前的偏振片(即起偏器)的面形误差使被测波面产生改变,其变化量与偏振片的面形误差相当,同时该变化量的影响无法通过相移算法来减小或者消除,它形成了波面测量结果中的系统误差,其大小与偏振片面形误差相当,因此起偏器的面形质量严重影响波面测量结果。若要避免起偏器面形对相移干涉图样产生影响,需采用面形误差很小的起偏器或者挑选两块面形误差相同的起偏器,还有一种解决方案是不采用起偏器而是在雅满平板上镀偏振分光膜进行分光以使两干涉光束的偏振方向相互垂直。图3中干涉图只显示出两束干涉光束中完整的一束,

入偏振相移光路来实现的。雅满横向剪切干涉仪中雅满平板与楔形剪切平板的光学材料均为K9玻璃,两块雅满平板的光学尺寸完全相同,均为155 mm×70 mm×40 mm,两块楔形剪切平板的光学尺寸也完全相同,其厚度为40 mm,楔角为20"。偏振相移光路中所用起偏器与检偏器均为消光比为100:1的偏振片,其中起偏器的口径为 $\phi 40$  mm,检偏器的口径为 $\phi 50$  mm。1/4波片是相位延迟量精度为 $\lambda/300$ ( $\lambda$ 为632.8 nm)的石英波片,其口径为 $\phi 50$  mm。干涉图由CCD相机接收。

被测光束是口径为 $\phi 40$  mm准直的氦氖激光束,由氦氖激光器出射的激光经过聚焦透镜、针孔和准直透镜所形成。首先调整楔形剪切平板前两块起偏器的透光轴相互垂直并与第一雅满平板的入射面平行或者垂直,检偏器的透光轴,1/4波片的快轴与两块起偏器的透光轴分别成45°角,此时采集的剪切干涉图如图3(a)所示。然后依次将检偏器旋转45°,90°和135°,所采集到的剪切干涉图分别如图3(b)~(d)所示。图3可以明显地看出4幅干涉图的相移效果,从而很好地验证了该相移雅满横向剪切干涉仪的有效性。

而另一束不明显,这是由被测光束通过雅满平板时其s分量和p分量的反射率与透射率差异造成的,它同时也导致干涉条纹对比度的下降。为了消除此种现象,可在第一雅满平板之前采用面形误差可以忽略的起偏器来调整s分量和p分量的强度比,也可通过在雅满平板上镀偏振分光膜、增反膜来实现。

### 4 结 论

在传统雅满横向剪切干涉仪的光路中插入起偏器,1/4波片与检偏器构成的偏振相移器,获得相移雅满横向剪切干涉仪,可使剪切干涉图更易于处理,从而获得更高的测量精度,结构简单且操作方便。同时,它仍然具有等光程干涉特性,可适用于低相干

性光束的波面检测。实验中通过旋转检偏器获得了相移干涉图,很好地验证了该相移雅满横向剪切干涉仪的有效性。

### 参 考 文 献

- 1 Luan Zhu, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Double shearing wavefront testing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1417~1420  
栾 竹, 刘立人, 刘德安等. 双剪切波面干涉测量法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1417~1420
- 2 Liu Hongzhan, Liu Liren, Xu Rongwei *et al.*. Measuring near the diffraction-limited wavefront of semiconductor laser beam [J]. *Chinese J. Lasers.*, 2005, **32**(4): 519~522  
刘宏展, 刘立人, 徐荣伟等. 近衍射极限半导体激光束波面检测[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 519~522
- 3 Liu Liren. Laser communications in space. II Test and verification techniques on the ground[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 147~155  
刘立人. 卫星激光通信. II 地面检测和验证技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 147~155
- 4 Mahendra P. Kothiyal, Claude Delisle. Shearing interferometer for phase shifting interferometry with polarization phase shifter[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(24): 4439~4442
- 5 DeVon W. Griffin. Phase-shifting shearing interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(3): 140~141
- 6 Jae Bong Song, Yun Woo Lee, Yong-Hee Lee. Simple phase-shifting method in a wedge-plate lateral-shearing interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(20): 3989~3992
- 7 Xu Rongwei, Liu Hongzhan, Liu Liren. Phase-shifting vectorial-shearing interferometer with Mach-Zehnder configuration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 269~274  
徐荣伟, 刘宏展, 刘立人. 马赫-曾德尔型相移矢量剪切干涉仪[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 269~274
- 8 Sanjib Chatterjee. Measurement of single-pass wavefront distortion of optical components with phase shifting Jamin interferometer[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(4): 872~879
- 9 Zeng Xin, Ding Jianping, Liang Peiying *et al.*. Wavefront reconstruction from shearing interferograms using least square fitting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 335~340  
曾 新, 丁剑平, 梁佩莹等. 二维剪切干涉波前的最小二乘法重建[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 335~340