

文章编号 1004-924X(2011)09-2029-07

共光路径向剪切干涉仪的设计

何 煦^{1,2}, 马 军^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对常规像移式干涉仪无法用于大口径、长光路光学系统波像差检测的工程问题,设计了共光路径向剪切干涉仪以消除采用标准波面所引入的系统误差。设计中采用由三角棱镜与斜方棱镜组合而成的胶合棱镜组作为波面剪切器件,将待测波面与其复制波面产生干涉,并通过一组有不同相对孔径的透镜切换装置来控制干涉仪剪切比。与 4D 动态干涉仪在不同条件下的比对试验数据表明,设计的剪切干涉仪的测试重复精度约为 $\lambda/80$, 实际测试精度 RMS 优于 $\lambda/20$ ($\lambda=630\text{ nm}$)。这种设计极大地缩小了仪器外形尺寸与重量,提高了超长光路干涉检测的效率。

关键词:光学测量;径向剪切干涉仪;波像差

中图分类号:TH744.3 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111909.2029

Design of common path radial shearing interferometer

HE Xu^{1,2}, MA Jun^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

** Corresponding author, E-mail: majun@ciomp.ac.cn*

Abstract: As conventional phase shifting interferometers can not test the wavefront aberration from a large diameter and long optical path system accurately, a new commonpath shearing interferometer is designed to eliminate the system error introduced by the standard wavefront. The new design takes an agglutination prism consisting of a triangular prism and a rhombic prism as a shear device to produce interference by the wavefront under-test with its replication. A group of different relative aperture lens switching devices are used to control the shearing ratio of the shearing interferometer. Compared with the data from 4D dynamic interferometers under different temperature conditions, it shows that the repeatability of designed shearing interferometer is about $\lambda/80$ and the accuracy of root mean square is better than $\lambda/80$ ($\lambda=630\text{ nm}$). The design of the commonpath shearing interferometer greatly reduces its dimension and weight and also improves the experiment efficiency for long optical path interference measurement.

Key words: optical testing; radial shearing interferometer; wavefront aberration

收稿日期:2010-11-08;修订日期:2011-01-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60538020)

1 引言

与经典的 Fizeau, Twyman-Green 干涉仪相比,径向波面剪切干涉仪(Radial Shearing Interferometer, RSI)无需标准镜提供参考光束,克服了传统干涉仪的某些不足,目前被广泛应用于光学表面检测、温度场检测等测试领域。

1959年, Brown 率先对径向剪切干涉仪进行研究,完成了采用会聚光照明的雅满形干涉仪的设计^[1]。1961年, Hariharan 和 Sen 设计了一台同样采用会聚光照明的循环式径向剪切干涉仪^[2],它通过两个焦距不同的组合透镜实现两波面剪切比的调节。1964年, Murty 提出了基于开普勒望远系统的循环式径向剪切干涉仪^[3]。1997年 Tsuguo Kohno 等利用基于波带片的 Mach-Zehnder 径向剪切干涉仪测量了凹面镜的波前相位分布,得到了与 ZYGO 干涉仪同样的测试结果^[4]。国内上海光机所、南京理工大学等单位也分别对横向与径向剪切干涉仪进行了研究,通过在 Mach-Zehnder 干涉光路中使用楔角方向正交放置的楔板实现矢量剪切与相移,并通过双波带板实现对光学非球面的检测^[5-7]。

常规的径向剪切干涉测量装置大多通过透镜组或偏振分光镜等组件实现波面剪切,干涉仪最终的精度由其中各光学组件的实际面形精度通过相乘关系运算后得到,因此,光路中所采用的光学平板、分光镜等光学器件的加工、装调精度对干涉仪的整机测试精度影响很大,甚至部分抵消了剪切干涉仪无标准镜头的优势。此外诸如基于 Mach-Zehnder 或 Brown 径向剪切光路(或变形光路)的剪切干涉仪不具备共光路的特性,因此对环境、震动等检测条件要求较高,只能应用于短光路、投射光学表面等应用领域的检测过程。

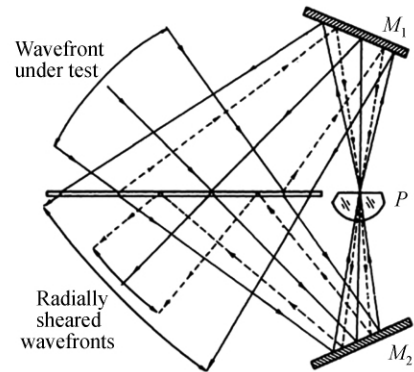
基于上述原因,本文提出了一种采用斜方棱镜与三角棱镜构成胶合组合棱镜实现波面剪切的共光路径向剪切干涉仪,该干涉仪无需标准镜即可以应用于长光路光学干涉检测。

2 组合棱镜剪切干涉仪原理

2.1 波面剪切干涉原理

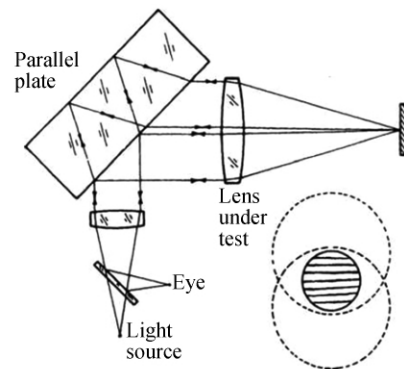
剪切干涉是通过特殊的光路结构将一个具有

空间相干性的波面剪切为两个相同或相似的波面,由于两个波面彼此产生空间位置的交叠与分离,在两波面的重叠区域就形成一组干涉条纹^[8],根据干涉条纹的形状与条纹分布即可获得原始波面包含的信息。图 1 是两种典型的径向剪切干涉仪的工作原理。



(a) Murty 径向剪切干涉仪

(a) Murty radial shearing interferometer



(b) Jamin 径向剪切干涉仪

(b) Jamin radial shearing interferometer

图 1 两种典型的径向剪切干涉仪

Fig. 1 Two typical radial shearing interferometers

本文设计的组合棱镜剪切干涉仪利用双通径向剪切干涉原理,采用特殊的光路设计,具备无需标准镜、共光路、可调剪切比、外形尺寸相对紧凑等特点。通过对干涉图的傅里叶变换条纹分析法,可以直接对干涉条纹进行计算,从而获得波面的实际畸变,其光路结构如图 2 所示。

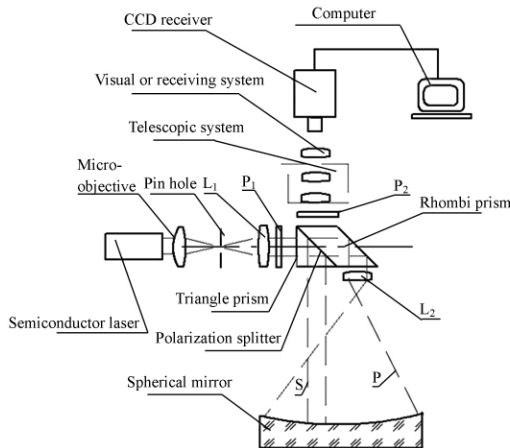


图 2 胶合棱镜径向剪切干涉仪光路原理

Fig. 2 Principle of agglutinated prism shearing interferometer

2.2 复合棱镜径向剪切干涉仪工作原理

径向剪切干涉仪光路由半导体激光光源 ($\lambda = 630 \text{ nm}$)、胶合棱镜组件、剪切比控制镜 (L_2)、扩束镜、空间滤波器、准直镜 (L_1)、成像镜组、偏振片 (P_1, P_2)、CCD 接收器等组成。

光路结构采用同轴共光路形式,共光路干涉系统具有对振动、温度和气流的变化能产生彼此共模抑制的优点,在隔振条件和恒温条件较低时也能获得稳定的干涉条纹。因此,具有抗干扰特性的共光路径向剪切干涉光路较为适合于长光路条件下光学系统波像差的实时检测与监控。

半导体激光器出射的光束经物镜、空间滤波器后,由准直透镜 L_1 扩束为平面波,经 P_1 偏振片,进入胶合棱镜。

胶合棱镜由三角棱镜与斜方棱镜胶合而成。其中三角棱镜为锐角为 45° 的等腰直角棱镜,斜方棱镜锐角也为 45° 。三角棱镜与斜方棱镜的胶合面是分束面,入射光在分束面上剪切为参考光与测试光。

在分束面反射的偏振光,即 s -偏振光,经偏振分光面反射进入被测光学系统(图中由待测球面反射镜表示),由于其口径与待测波前相比只占有极小的一部分(可近似为点干涉),因此可作为参考光束。另一束透射偏振光,即 p -偏振光束,透过偏振分光面进入斜方棱镜并反射,经 L_2 凸透镜匹配相对孔径后进入被检光学系统,并充满全口径。两束偏振光经被检光学系统反射后,互换位置。其中: s -偏振光返回时经 L_2 透镜透射、斜方

棱镜反射、偏振分光面反射进入 P_2 检偏器、成像系统,由探测器接收作为干涉仪的参考波面。 p -偏振光返回时经三角棱镜和偏振分光面透射后进入 P_2 检偏器和成像系统,与参考波面干涉并由探测器接收。通过对干涉条纹的计算即可获得待测光学系统的波面畸变(或波像差)信息。

3 剪切干涉的波面求解与重建

3.1 径向剪切干涉波面的求解

该径向剪切干涉仪主要用于长焦距反射式平行光管波像差的检测与监控,为双通向剪切干涉仪。与单通向剪切干涉仪相比,其测试原理如图 3 所示,光束需来回两次通过光学系统。为了避免反射回来的波前和初始波前产生干涉,利用偏振器 (P_1, P_2) 改变反射光束的偏振态。

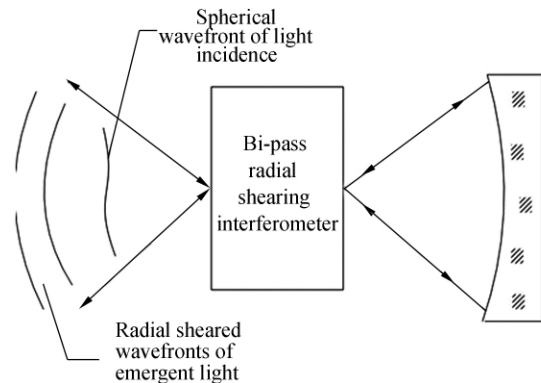


图 3 双通向剪切干涉原理

Fig. 3 Schematic diagram of bi-pass radial shearing interferometry

设待测波面位于 (r, θ) 极坐标系中,则待测波前可以表示为 $W(R, \theta)$,由 $W(R, \theta)$ 分束后可表示为 $W(r, \theta)$ 与 $W(rt, \theta)$,其中 t 为剪切比: $t = S_1 / S_2$,式中 S_1 与 S_2 为两剪切波面的孔径。于是径向剪切干涉仪中两剪切波面交叠区域的光强分布可表示为^[9]:

$$I(r, \theta) = |I \exp[ik W(r, \theta)] + I \exp[ik W(rt, \theta)]|^2 = |A|^2 \{2 + 2 \cos[k W_{OPD}(r, \theta)]\}, \quad (1)$$

式中, $W_{OPD}(r, \theta)$ 是两剪切波面的波像差,可表示为:

$$W_{OPD}(r, \theta) = W(r, \theta) - W(rt, \theta), \quad (2)$$

对式(2)进行数学处理,并重复进行 n 次迭代可表示为如下形式:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{OPD}}(rt, \theta) &= W(rt, \theta) - W(rt^2, \theta) \\
 &\vdots \\
 \sum_{i=1}^n W_{\text{OPD}}(rt^i, \theta) &= W(r, \theta) - W(rt^n, \theta). \quad (3)
 \end{aligned}$$

根据公式 3 所表达的实际物理意义, 当迭代次数 n 趋于无限大时, $W(rt^n, \theta)$ 表示波面的中心点, 其波面为一点, 可表示为常数 W_c , 则公式 3 可表示为:

$$W(r, \theta) = \sum_{i=1}^n W_{\text{OPD}}(rt^i, \theta) - W_c, \quad (4)$$

即:

$$W(R, \theta) = \sum_{i=1}^n W_{\text{OPD}}(Rt^i, \theta) - W_c. \quad (5)$$

3.2 条纹处理及波前的重建

公式 5 中的 $W_{\text{OPD}}(Rt^i, \theta)$ 可通过对干涉条纹进行解调而获得, 即可采用傅里叶变换条纹分析法对干涉条纹进行计算^[10]. 调制后的干涉条纹的光强可以表示为如下形式:

$$\omega(x, y) = a(x, y) + i(x, y) \cos[2\pi fx + \phi(x, y)], \quad (6)$$

式(6)中 $a(x, y)$ 表示本底光强, $i(x, y)$ 是振幅, $\phi(x, y)$ 表示相位差, 将公式(6)表示为指数形式.

$$\omega(x, y) = a(x, y) + i'(x, y) \exp(2\pi jfx + i' \times (x, y) \exp(-2\pi jfx)), \quad (7)$$

对式 6 进行沿 x 方向的一维傅里叶变换:

$$W(f_x, y) = A(f_x, y) + I'(f_x - f, y) + I' \times (f_x - f, y), \quad (8)$$

式(8)中的 W, A, I' 表示 ω, a, i' 的傅里叶变换, f_x 表示沿 x 方向的空间频率. 当 f_x 大于该方向的截止频率 f 时, 则在剪切交叠区域内由截止频率 f 所确定的正、负一级谱分量和零级谱就可以充分展开. 在式(8)中, $A(f_x, y)$ 表示零级谱分量, 后两项分别表示正、负一级谱分量. 通过对条纹的图像处理可以计算出其中的一级谱分量, 可得 $I'(f_x, y)$. 对 $I'(f_x, y)$ 进行傅里叶逆变换, 得:

$$i'(f_x, y) = F^{-1}\{I'(f_x, y)\}, \quad (9)$$

则被测波前的相位分布可以表示为如下形式:

$$\phi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[i'(x, y)]}{\text{Re}[i'(x, y)]} \right\}, \quad (10)$$

式(10)中的 Im 与 Re 分别表示取实部和虚部函数. 则 $W_{\text{OPD}_x} = \lambda \phi(x, y) / 2\pi$, 对 W_{OPD_x} 沿 x 方向进行积分, 可得:

$$W_{\text{OPD}}(x, y) = \int W_{\text{OPD}_x}(x, y) dx. \quad (11)$$

将计算结果转化为极坐标形式, 再代入式(5)即可以计算出 x 方向的波面面形, 同理可计算 y 方向的波面面形; 拟合后即获得待测系统与剪切参考波面的波像差.

4 剪切干涉仪光机系统设计实例

该剪切干涉仪的光机系统采用双层结构设计, 中间层布置干涉仪的主光路结构, 包括激光器光源、扩束镜组件、偏振片 P_1 和胶合棱镜组件.

在主光路结构的后侧是可调偏振片组件 P_2 和 CCD 接收器.

在主光路结构之前设计了相对孔径为 $F\#4 \sim F\#20$ 的相对孔径匹配镜组. 进行不同光学系统波像差检测时可根据需求对其进行切换, 从而实现不同的剪切比. 切换转盘通过弹性钢球实现切换定位. 探测器为 $2048 \text{ pixel} \times 1536 \text{ pixel}$ 的彩色低照度 CCD, CCD 与其前端的显微照相物镜相连.

激光器采用波长为 630 nm 的半导体激光器, 具有较高的相干性与低发热量(无需散热), 激光器与电源共同集成在干涉仪壳体内.

经过对干涉仪整体光路以及机械结构系统的优化与排布, 系统的整体外形尺寸为 $142 \text{ mm} \times 46 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$, 在保证测试精度的前提下, 其外形尺寸与结构重量远远小于传统的 Fizeau、Twyman-Green 型干涉仪, 与常规基于 Mach-Zehnder 光路结构的剪切干涉仪相比, 其抗干扰能力、外形尺寸、重量也具有一定优势. 该型球面径向剪切干涉仪光机系统的设计结果如图 4 所示.

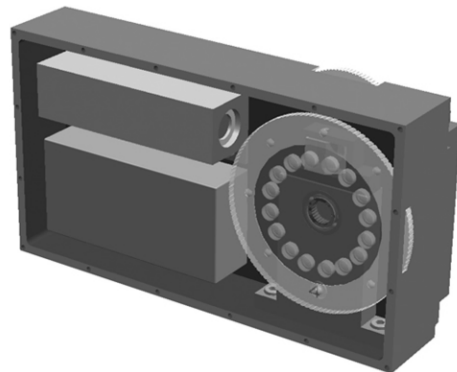


图 4 剪切干涉仪光机系统设计实例

Fig. 4 Design of shearing interferometer

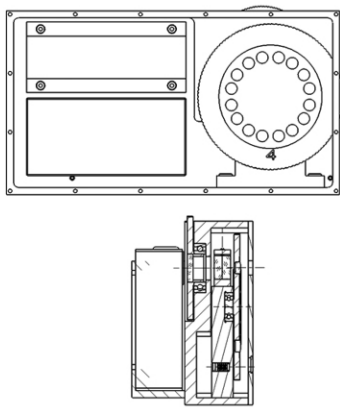


图 5 剪切干涉仪结构设计

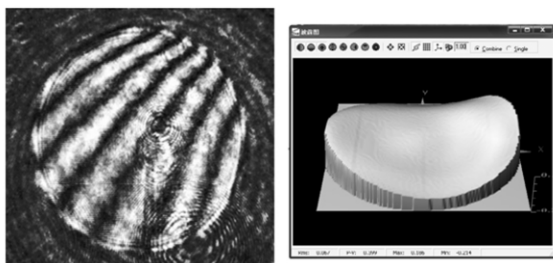
Fig. 5 Machinery of shearing interferometer

5 剪切干涉仪标定试验

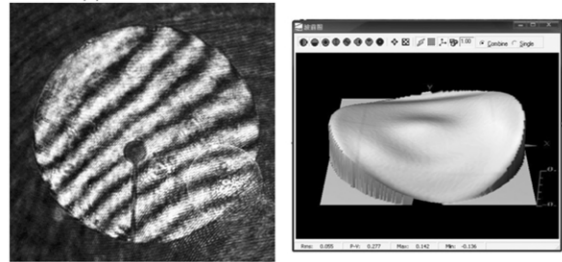
干涉仪完成装调后,采用比对试验的方法对其实际的测试精度进行标定。在标定试验中使用研制的剪切干涉仪与商用 4D 动态干涉仪在不同温度条件下所测试的光学系统波像差进行比对。

标定试验中的测试对象为牛顿式平行光管的波像差。平行光管焦距为 20 m,口径为 1 000 mm。使用干涉仪进行标定试验时,对应的测试光路达到 40 m(此条件下 ZYGO 干涉仪已经无法稳定地采集干涉条纹),测试实验室的温度为 $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ 。进行标定实验时,在平行光管焦面位置安装分束镜,使 4D 动态干涉仪与剪切干涉仪同时(在同一温度点)采集待测平行光管的波前。使用 1 m 口径的标准平面反射镜 ($\text{RMS} = \lambda/50, \lambda = 632.8\text{ nm}$)与平行光管、干涉仪构成准直测试光路。标定试验过程中采集的干涉条纹如图 6 所示。

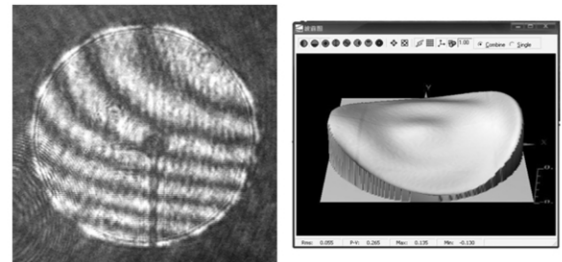
表 1 列举了径向剪切干涉仪与 4D 动态干涉仪在不同温度点测试数据的比对结果。



(a) $\text{RMS} = \lambda/17, \text{PV} = \lambda/3, \lambda = 630\text{ nm}, t = 23\text{ }^\circ\text{C}$



(b) $\text{RMS} = \lambda/18, \text{PV} = \lambda/4, \lambda = 630\text{ nm}, t = 24\text{ }^\circ\text{C}$



(c) $\text{RMS} = \lambda/18, \text{PV} = \lambda/4, \lambda = 630\text{ nm}, t = 25\text{ }^\circ\text{C}$

图 6 实测的干涉条纹与计算的波面

Fig. 6 Fringes and wavefronts of examination

表 1 比对试验测试结果

Tab. 1 Data of parallel experiment

| 剪切干涉仪测试结果(RMS) | 4D 测试结果 (RMS) | 温度 / $^\circ\text{C}$ | 湿度 (%) |
|----------------|---------------|-----------------------|--------|
| $\lambda/15$ | $\lambda/18$ | 25 | 70 |
| $\lambda/14$ | $\lambda/17$ | 25 | 70 |
| $\lambda/16$ | $\lambda/18$ | 24 | 69 |
| $\lambda/15$ | $\lambda/17$ | 23 | 69 |
| $\lambda/15$ | $\lambda/17$ | 23.5 | 69 |
| $\lambda/15$ | $\lambda/17$ | 23 | 67 |
| $\lambda/14$ | $\lambda/17$ | 23 | 67 |
| $\lambda/12$ | $\lambda/17$ | 23 | 68 |
| $\lambda/14$ | $\lambda/16$ | 23 | 65 |
| $\lambda/16$ | $\lambda/17$ | 23 | 65 |
| $\lambda/15$ | $\lambda/17$ | 23 | 64 |
| $\lambda/14$ | $\lambda/17$ | 22.5 | 60 |
| $\lambda/13$ | $\lambda/17$ | 23 | 60 |
| $\lambda/15$ | $\lambda/17$ | 23.5 | 60 |
| $\lambda/14$ | $\lambda/18$ | 24 | 60 |
| $\lambda/15$ | $\lambda/18$ | 24 | 60 |
| $\lambda/15$ | $\lambda/17$ | 23.5 | 60 |
| $\lambda/16$ | $\lambda/17$ | 22 | 55 |
| $\lambda/17$ | $\lambda/17$ | 22 | 55 |

比对结果表明:除个别数据点存在粗大误差外,径向剪切干涉仪的波像差均方根值测试结果与相同条件下 4D 动态干涉仪的测试结果的平均

偏差 $<30\%$, 试验中所使用的 4D 动态干涉仪的 RMS 测试精度优于 $\lambda/100$ 。考虑到图像处理过程中的系统误差, 径向剪切干涉仪的测试精度优于 $\lambda/20$ (RMS, $\lambda=630\text{ nm}$)。



图 7 剪切干涉仪实物照片

Fig. 7 Photograph of shearing interferometer

参考文献:

- [1] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. New York: Wiley, 1994:214-216.
- [2] HARIHARAN P, STEEL W H. Fringe localization depth; a comment [J]. *Applied Optics*, 1989, 28 (3):20-29.
- [3] MURTY M, SHUKLA R P. Radial shearing interferometers using a Laser source [J]. *Applied Optics*, 1973, 12 (11): 2765-2767.
- [4] WALDEMAR W K. Corneal topography measurement by means of radial shearing interference; part 1-theoretical consideration [J]. *Optical Engineering*, 2002, 113(1):39-45.
- [5] 马力, 韩道福. 用双光收缩式径向剪切干涉仪测量气体温度场 [J]. *光学学报*, 2005, 25 (11): 1494-1496.
- MA L, HAN D F. Two-beam-contracted radial shearing interferometer for measuring the gas temperature field [J]. *Acta Optica Science*, 2005, 25 (11):1494-1496. (in Chinese)
- [6] 王利娟, 刘立人. 相移雅满横向剪切干涉仪 [J]. *中国激光*, 2009, 36(5):1156-1159.
- WANG L J, LIU L R. Phase shifting jamin lateral shearing interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(5):1156-1159.
- [7] 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.
- XU R W, LIU H ZH, LIU L R. Phase-shifting vectorial-shearing interferometer with Mach-Zehnder configuration [J]. *Acta Optica Science*, 2006, 26 (2):269-274.
- [8] 张斌, 马力, 王鸣, 等. 使用双波带板径向剪切干涉仪检测非球面镜 [J]. *激光技术*, 2007, 31(1):37-46.
- ZHANG B, MA L, WANG M, et al.. Aspheric lens testing by means of compact radial shearing interferometer with two zone plates [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1):37-46.
- [9] HARIHARAN P, OREB B F, ZHOU W Z. Digital radial shearing interferometry: testing mirrors with a central hole [J]. *Opt Acta*, 1986, 33(3):251-254.
- [10] 冯胜, 吴健, 郑春燕. 径向剪切干涉仪 [J]. *激光与红外工程*, 2008, 37(9):188-192.
- FENG SH, WU J, ZHENG CH Y. Radial shearing interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(9):188-192. (in Chinese)

6 结 论

设计了新型共光路径向剪切干涉光路结构, 采用三角棱镜与斜方棱镜胶合而成的组合棱镜对波前进行剪切, 可以应用于反射式光学系统的波像差检测。与传统的静态干涉仪相比, 设计的共光路径向剪切干涉系统可以应用于超长光路的测试, 同时具有调试相对简单、外形尺寸较小的优势。

同环境下与 4D 动态干涉仪进行了对比试验, 完成了对 20 m 焦距平行光管波像差的检测试验。结果显示, 研制的径向剪切干涉仪的测试精度优于 $\lambda/20$ (RMS, $\lambda=630\text{ nm}$)。

作者简介:



何 煦(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事光学系统检测和装调技术的研究。E-mail: 911max@sina.com

通讯作者:



马 军(1961—),男,吉林长春人,研究员,主要从事精密光学检测技术和光学仪器的研究。E-mail: majun@ciomp.ac.cn

●下期预告

利用电场与磁场耦合制备微型化频率选择表面

徐念喜^{1,2},高劲松¹,梁凤超¹,赵晶丽¹,冯晓国¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033;2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了实现频率选择表面(FSS)微型化,利用感性表面(金属栅格)与容性表面(间隔的金属环形贴片)之间的耦合机制制备了微型频率选择表面(MEFSS)。依据传输线理论给出电感、电容近似公式,定性分析了 MEFSS 结构参数,采用全波分析矢量模匹配法计算了不同几何结构参数与耦合层电参数 MEFSS 的传输特性,通过镀膜与光刻法在 $500\ \mu\text{m}$ 厚聚酰亚胺膜两侧以矩形排列方式制备了 12 个 0.125λ 集总电感单元与集总电容单元,利用自由空间法测试了 $240\ \text{mm}\times 240\ \text{mm}$ MEFSS 样件的传输特性。结果显示:测试样件中心频点 f_0 为 $14.636\ \text{GHz}$ 、透过率为 $-0.382\ \text{dB}$ 、 $-3\ \text{dB}$ 带宽为 $2.17\ \text{GHz}$ 时单元尺寸为 0.125λ 。当单元尺寸变小时,中心频点向高频漂移,其透过率下降;固定单元尺寸,中心频点随某些参量增加向高频漂移;耦合层厚度增加 $0.4\ \text{mm}$ 中心频点向低频漂移 $1.4\ \text{GHz}$ 且透过率降低 $2.6\ \text{dB}$,相对介电常数由 3.5 变为 2 ,中心频点高漂 $2.8\ \text{GHz}$ 。结论认为,利用感性与容性表面耦合机制能制备单元尺寸为 0.125λ 的 FSS,具有微型化、宽通带和对入射波角度不敏感的特点。