

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0153-05

基于短相干光源的动态干涉测量系统

徐 晨¹ 苏俊宏² 陈 磊¹ 李 博¹

(¹ 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)
(² 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要 为了在共光路的干涉仪上实现同步移相,达到干涉测量抗震的目的,设计了一种新的同步移相抗震方案并搭建了实验装置。通过改变半导体激光器的注入电流,改变其相干长度,作为短相干光源,利用光源的相干性,结合偏振延迟装置,分开了参考光和测试光形成一对正交偏振光。同步移相系统由二维正交光栅和偏振片组构成,两个 ± 1 级衍射光通过透振方向依次相差 45° 的偏振片组合,在一个 CCD 上同时得到 4 幅互有 90° 相移的移相干涉图。按照传统的四步法,复原待测波面。测试了一个平行平板样品,结果 PV 为 0.068λ ,RMS 为 0.013λ ($\lambda = 650 \text{ nm}$)。同一被测件用 Zygo 干涉仪测量结果 PV 为 0.063λ ,RMS 为 0.012λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),两者符合较好。

关键词 测量;动态干涉;共光路偏振干涉仪;短相干光源

中图分类号 TH744.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0153

Research on Low-Coherence Dynamic Interferometry

Xu Chen¹ Su Junhong² Chen Lei¹ Li Bo¹

¹ School of *Electronical Engineering and Photoelectric Technology*, *Nanjing University of Science & Technology*, *Nanjing, Jiangsu 210094, China*

² School of *Opto-Electronic Engineering*, *Xi'an Technological University*, *Xi'an, Shaanxi 710032, China*

Abstract An on-axis, vibration insensitive, polarization Fizeau interferential system is built. In this arrangement, a multimode semiconductor laser is used as the light source, of which coherence in conjunction with a polarization delay-line is used to effectively separate out the orthogonally polarized test and reference beam components for interference. Spatial phase-shifting system is realized by a 2D grating and a polarizer group. The four ties of rays including two ± 1 diffraction rays with the same intensity are projected through four polarizers, of which the axis directions are 0° , 45° , 90° , 135° , and four $\pi/4$ phase shifting interferograms are received by one CCD simultaneously. By using the 4-bucket algorithm, wavefront to be tested is recovered. Flatness of a parallel plate surface is measured by this system with PV of 0.068λ , RMS of 0.013λ ($\lambda = 650 \text{ nm}$) and by Zygo interferometer with PV of 0.063λ , RMS of 0.012λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$). The two results obtained are in close agreement.

Key words measurement; dynamic interferometry; common-path polarization interferometer; low-coherence source

1 引 言

同步移相法可在瞬间同时采集到 3 幅以上的移相步长恒定的干涉图用于波面复原计算,从而消除了震动对移相干涉测量的影响,逐渐成了动态干涉测试研究的主要方向。自从 1991 年 Phase Shift Technology 公司 Koliopoulos^[1]提出了同步移相干涉术以来,国内外陆续报道了同步移相干涉测量技

术的研究成果^[2~8],国外 4D 公司^[9],ESDI^[10]也相继推出了商品化的动态干涉仪。基于光的偏振技术的同步移相干涉仪共同点是,使参考光和测试光成为一对正交偏振光,然后通过分光,并在两束光中引入相移。分别改变参考光和测试光的偏振态在分光路型的干涉仪上较容易实现,而对于准共光路的 Fizeau 干涉仪,由于参考光和测试光从参考面往后

基金项目: 教育部博士点基金(20070288010)资助课题。

作者简介: 徐 晨(1982—),男,博士研究生,主要从事光学计量测试与光电智能化仪器方面的研究。

E-mail: happychen1982@163.com

导师简介: 陈 磊(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光学计量测试与光电智能化仪器方面的研究。

E-mail: chenlei@126.com

都是共光路的,所以较难分别改变两束光的偏振态。2006年 Millerd 等^[11]在同步移相 Fizeau 干涉仪专利技术中提出了两种解决这个问题的方案,即沃拉斯顿棱镜分光倾斜参考镜法和短相干光源光程匹配法,前一种方法需要将参考镜倾斜一个角度,这样难免会引入非共光路误差,而短相干光源光程匹配法保持了 Fizeau 干涉仪的共光路特性,其中短相干光源是关键技术之一。2008年,4D 公司推出了新产品 Fizecam3000,利用一套频移装置,匹配出频率相同的两路光相干涉^[12],该方法需要平移装置以某一速度推动参考镜产生多普勒频移,在参考镜口径比较大($D > 600$ mm)的情况下,该方法有一定的局限性。在短相干光源光程匹配方案中, Kimbrough 提出利用微波调制半导体激光器作为动态 Fizeau 干涉仪的短相干光源的方法^[13],该方法对电子器件要求较高。本文提出了一种新的方法,通过改变半导体激光器的注入电流来改变其相干性,作为短相干

Fizeau 干涉仪的光源。该方法相比于微波调制法简单易行。设计了一种基于 Fizeau 型干涉仪的同步移相干涉测量方案,搭建了实验装置,并对实测数据进行了处理。

2 原 理

系统的光路图如图 1 所示,图中左半部分可以看作是一个偏振泰曼型式的干涉仪,它为 Fizeau 干涉系统提供一个偏振方向正交的 P 光, S 光双光源,其中反射镜 B 固定在直线导轨上,在 P 光和 S 光之间引入 $2L$ 的光程差。P 光, S 光先后分别在参考镜 R 和被测镜 T 反射后,反射光中可分为四种光,分别是 R 反射的 P 光 r_p , R 反射的 S 光 r_s , T 反射的 P 光 t_p , T 反射的 S 光 t_s , 由非偏振的分光镜 BS 反射进入同步移相系统,参考面和测试面之间的干涉腔长为 Δ 。

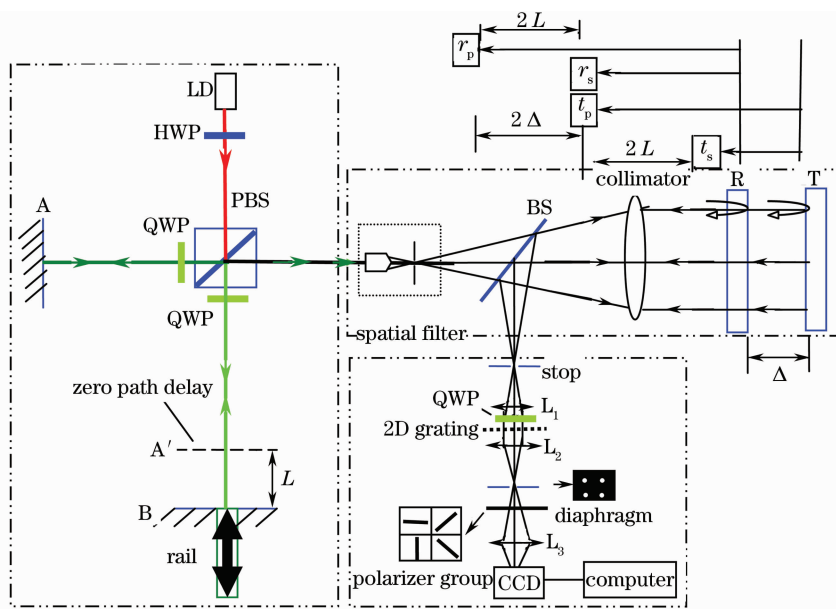


图 1 短相干光源动态 Fizeau 干涉仪的实验原理图

Fig. 1 Optical layout of low coherence dynamic Fizeau interferometer

同步移相系统主要由快轴与 x 轴成 45° 方向的 $\lambda/4$ 波片、二维正交光栅和偏振片组构成,参考光和测试光经过 $\lambda/4$ 波片和正交光栅,形成 $(\pm m, \pm n)$ 等级次的衍射光,其中 m, n 为非负整数,在光栅后透镜 L_2 的焦面上设置了一个特制的光阑,仅让 $(+1, +1), (+1, -1), (-1, +1)$ 和 $(-1, -1)$ 级衍射光通过,对于理想的二维正交光栅,这 4 组衍射光

具有相同的光强分布,让 4 组一级衍射光分别射向 4 个透振方向不同的偏振片组成的偏振片组,第 i 个偏振片的方位角为 $\alpha_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。这样就可以在 CCD 上得到 4 幅干涉图,整个系统实现同步移相的原理如下文分析给出。

设待测面的面形偏差为 δ_z ,参考光和测试光的琼斯矢量可以表示为

$$\mathbf{E}_R = \begin{bmatrix} E_{r_p} \\ E_{r_s} \exp(ik \cdot 2L) \end{bmatrix}, \mathbf{E}_T = \exp[ik(2\Delta + 2\delta_z)] \begin{bmatrix} E_{t_p} \\ E_{t_s} \exp(ik \cdot 2L) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

透振方向为 α_i 的偏振片和快轴与 x 轴成 45° 的 $\lambda/4$ 波片的琼斯矩阵为

$$\mathbf{P}(\alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha_i) & \sin(\alpha_i)\cos(\alpha_i) \\ \sin(\alpha_i)\cos(\alpha_i) & \sin^2(\alpha_i) \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_{\text{WP}}\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

则参考、测试光经过 $\lambda/4$ 波片和偏振片后的琼斯矢量可以表示为

$$\mathbf{E}(\alpha_i) = \mathbf{P}(\alpha_i) \times \mathbf{Q}_{\text{WP}}\left(\frac{\pi}{4}\right) \times (\mathbf{E}_T + \mathbf{E}_R). \quad (3)$$

设光源的相干度为 $|\gamma|$, 根据定态光场的一般干涉定律^[14], 可得到第 i 幅干涉图的光强表达式为

$$\begin{aligned} I(\alpha_i) = & \frac{1}{2} \{Er_s^2 + Et_p^2 - 2Er_sEt_p |\gamma(2\Delta - 2L)| \sin[k(2\Delta - 2L + 2\delta_z) - 2\alpha_i]\} + \\ & \frac{1}{2} \{Er_p^2 + Et_s^2 + 2Er_pEt_s |\gamma(2\Delta + 2L)| \sin[k(2\Delta + 2L + 2\delta_z) + 2\alpha_i]\} + \\ & \frac{1}{2} \{2Er_pEt_p |\gamma(2\Delta)| \cos[k(2\Delta + 2\delta_z)] + 2Er_sEt_s |\gamma(2\Delta)| \cos[k(2\Delta + 2\delta_z)]\} + \\ & \frac{1}{2} \{2Er_sEr_p |\gamma(2L)| \sin[k(2L + 2\alpha_i)] + 2Et_sEt_p |\gamma(2L)| \cos[k(2L + 2\alpha_i)]\}. \end{aligned} \quad (4)$$

若取 2Δ 和 $2L$ 相等, 并远大于光源的相干长度 L_c , 那么

$$|\gamma(2\Delta - 2L)| = |\gamma(0)| = 1, |\gamma(2\Delta + 2L)| = |\gamma(2L)| = |\gamma(2\Delta)| = 0. \quad (5)$$

则光强表达式可以简化为

$$\begin{aligned} I(\alpha_i) = & \frac{1}{2} \{Er_s^2 + Er_p^2 + Et_s^2 + Et_p^2 - 2Er_sEt_p \sin[k(2\delta_z) - 2\alpha_i]\} = \\ & \frac{1}{2} \{I_r + I_t - 2\sqrt{I_r I_t} \sin[k(2\delta_z) - 2\alpha_i]\}. \end{aligned} \quad (6)$$

若偏振片组中 4 个偏振片方位角分别取 $\alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 45^\circ, \alpha_3 = 90^\circ, \alpha_4 = 135^\circ$. 则在 CCD 上 4 幅干涉图中分别引入 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 的相移, 那么根据传统的四步移相法, 就可以复原出待测波面偏差, 由于 4 幅干涉图在同一时间得到, 环境对 4 幅干涉图影响完全相同, 从而有效抑制了震动对干涉测试的影响。

3 实 验

3.1 短相干光源

短相干光源是本系统关键技术之一, 系统要求光

源的相干长度必须小于干涉腔长的两倍并大于待测表面最大面形偏差的两倍。为了在短时间内实现光程匹配, 光源的相干长度也不能太小, 所以相干长度最好可调。本文所选用的半导体激光器的中心波长为 650 nm, 功率为 5 mW。通过改变半导体激光器的注入电流来改变激光器的光谱特性, 并在迈克耳孙干涉仪上测量了半导体激光器的相干性。首先用白光标定零光程差位置, 然后换上本实验采用的半导体激光器, 测试不同注入电流下半导体激光器的相干性, 测试臂每动一次采集一幅干涉图, 根据对比度的定义计算该光程差下的可见度即相干度。图 2(a) 中, 注入

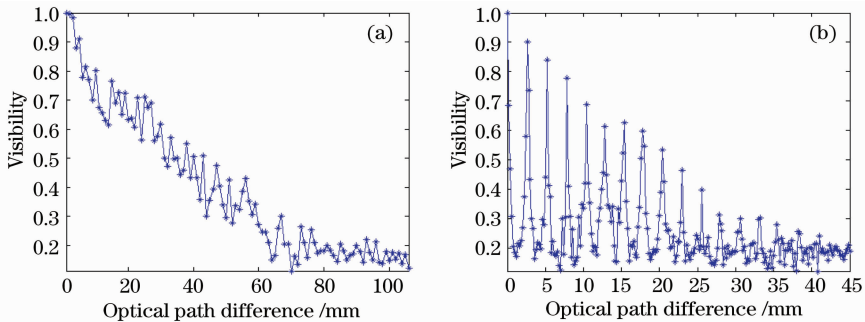


图 2 不同注入电流下的激光器对比度-光程差关系曲线。(a) 23.5 mA; (b) 18.4 mA

Fig. 2 Visibility curve versus optical path difference for laser diode with different injection current

(a) 23.5 mA; (b) 18.4 mA

电流为 23.5 mA, 动镜移动步距为 0.5 mm, 此时半导体激光器的相干长度约为 200 mm, 图 2(b) 中, 注入电流为 18.4 mA, 步距为 0.1 mm, 此时半导体激光器的相干长度约为 2.4 mm。实验表明, 半导体激光器的输出光谱分布和其注入电流存在一定的关系, 通过调整注入电流的大小, 可以改变其相干性。在本系统中, 长相干长度便于快速调出干涉条纹, 但此时干涉条纹强度分布如公式(4), 是多光束干涉的叠加, 而短相干长度则利于精确匹配出一对偏振态正交且满足相干条件的参考光和测试光, 从而为后面的同步移相做准备。

通过调节半导体激光器的工作电流来改变光源的相干长度, 而半导体激光器的波长将随着注入电流的变化而发生“漂移”。利用北京光学仪器厂 WDG30-Z 型光栅单色仪测量了激光器的中心波长, 图 3 为中心波长与注入电流之间的关系曲线, 可以看出, 中心波长随着注入电流的增大而逐渐增加。注入电流由 15 mA 变化到 30 mA 时, 半导体激光器的中心波长变化了 1.5 nm。

3.2 实际样品的测量与比对

在 Fizeau 干涉系统中, 10 倍显微物镜, 15 μm 针孔, 焦距为 550 mm 的望远物镜构成扩束系统, 扩束后的有效测量直径为 55 mm, CCD 选用了电子快门可调的 1/2 英寸黑白摄像机, 型号为 MTV-1881EX,

曝光时间最短为 1/10000 s。利用该系统测量了一块平板样品的面形误差分布, 测量时首先粗略调整干涉腔长, 使其与偏振延迟量大致相等, 调节半导体激光器的注入电流, 降低其相干性, 利用精密直线导轨调整反射镜 B 使光程匹配, 待干涉图对比度最佳时, 瞬间采集得到 4 幅移相干涉图, 如图 4。然后采用位置标定程序分割出空间一致的 4 幅干涉图, 通过传统的四步移相算法, 求出被测平面的面形误差分布, 如图 5(a) 所示, 结果 PV 为 0.068 λ , RMS 为 0.013 λ ($\lambda = 650 \text{ nm}$)。利用 Zygo GPI-XP 型干涉仪, 测量同一被测件, 测量结果如图 5(b) 所示, PV 为 0.063 λ , RMS 为 0.012 λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 比对结果符合良好。

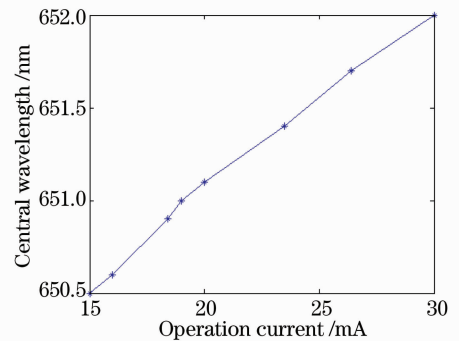


图 3 激光器中心波长与注入电流之间的关系
Fig. 3 Central wavelength versus the change of operation current

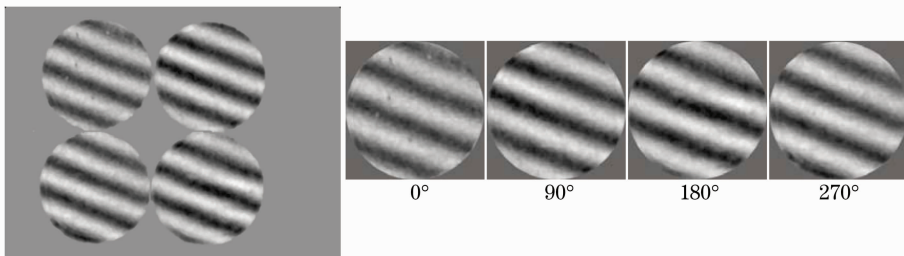


图 4 实验采集得到的同步移相干涉图

Fig. 4 Simultaneous phase-shifting interferogram

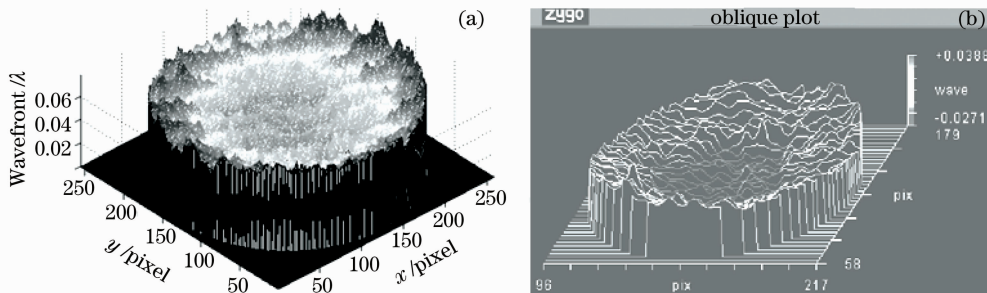


图 5 实验结果。(a) 解包后的三维面形分布; (b) Zygo 测得的三维面形分布

Fig. 5 Experimental results. (a) Retrieved surface map; (b) result measured by Zygo

4 结 论

研究了一种基于传统共光路 Fizeau 干涉仪的动态干涉测量系统,采用中心波长为 650 nm 的半导体激光器作为光源,通过实验研究了半导体激光器注入电流与相干性的关系,在适当的注入电流下,得到短相干长度的光源,利用光源的相干性和一套偏振延迟装置,匹配出一对满足相干长度且正交偏振的参考光和测试光,并应用一套空间分光偏振移相系统于瞬间获得 4 幅移相步长为 90° 的干涉图,从而有效避免了震动对干涉测试的影响。利用该实验平台实测了一块平面样品的面形分布,将结果与 Zygo 干涉仪的测试结果相对比,吻合较好。

由于系统采用了短相干长度的光源,所以只有满足相干条件的两个波面才能产生干涉,利用这个特点,本系统可以有效抑制杂散条纹的影响,可用于平行平板的各项参数的测量,如厚度、折射率均匀性、面形等。

传统的 Fizeau 干涉仪自参考面往后都是共光路的,然而对于偏振式的动态 Fizeau 干涉仪,参考光和测试光偏振态是正交的,如果共光路中存在应力,对两束光的影响将不再相同。由于 4 束光中只有 2 束参与干涉,干涉条纹的最大对比度为 50%,而一般的双光束干涉仪对比度可达 100%。另外,该系统干涉腔长也受到了偏振延迟光路长度的限制。本文采用调整半导体激光器的注入电流使激光器呈多纵模输出,实验中发现,多纵模半导体激光器对比度曲线周期性出现,且整体下降较慢,所以需要采取抑制干涉旁瓣措施。以上问题需要作进一步的研究探讨。

动态干涉测试技术使得大型天文仪器、激光武器等光学系统的安装、在线测试成为可能,还可以拓展应用于瞬态波面的测试,比如流场测试、实验力学

测试、大气扰动测试、角膜地形图测试等方面。

参 考 文 献

- 1 C. L. Koliopoulos. Simultaneous phase-shift interferometer[C]. *SPIE*, 1992, **1531**: 119~127
- 2 J. E. Millerd, N. J. Brock. Methods and Apparatus for Splitting, Imaging and Measuring Wave Fronts in Interferometry [P]. U. S. Patent 6, 2001, 304, 330
- 3 J. E. Millerd, N. J. Brock, J. Hayes *et al.*. Pixelated phase-mask dynamic interferometer[C]. *SPIE*, 2004, **5531**: 304~314
- 4 Qian Kemao, Miao Hong, Wu Xiaoping. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 64~67
钱克矛, 缪 泓, 伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 64~67
- 5 Yi Wang, Qun Hao, Qidong Zhu *et al.*. Real-time measurement of refractive index of solution during crystal growth by Michaelson interferometry[C]. *SPIE*, 2005, **5638**: 418~423
- 6 Y. J. Yu, J. Peng, Z. Q. Wang. Spatial phase-shifting interferential system on polarization interference and grating beam-splitting; phase-shifting error testing[J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2006, **48**: 992~997
- 7 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chunsheng. Simultaneous phase-shifting interferometry based on two-dimension grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 663~667
左 芬, 陈 磊, 徐春生. 基于二维光栅分光的同步移相干涉测量技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 663~667
- 8 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chen. Measurement performance of simultaneous phase-shifting interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1682~1687
左 芬, 陈 磊, 徐 晨. 同步移相干涉的测量性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1682~1687
- 9 <http://www.4dtechnology.com/products/fizcam2000.php>
- 10 http://www.engsynthesis.com/p/products/optics_metrology/intellium_h2000.php
- 11 J. E. Millerd, J. C. Wyant. Simultaneous Phase-Shifting Fizeau Interferometer[P]. U. S. Patent 7, 2007, 230, 718 B2
- 12 B. T. Kimbrough, E. Frey, J. E. Millerd. Instantaneous phase-shift Fizeau interferometer utilizing a synchronous frequency shift mechanism[C]. *SPIE*, 2008, **7063**: 1~11
- 13 B. T. Kimbrough. Low-coherence vibration insensitive Fizeau interferometer[C]. *SPIE*, 2006, **6292**: 1~12
- 14 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 459~523
M. 玻 恩, E. 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭荪译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 459~523