

全场光学相干层析成像系统的研制^{*}

杨亚良 丁志华[†] 王 凯 吴 凌 吴 兰

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

(2008 年 7 月 25 日收到, 2008 年 9 月 10 日收到修改稿)

研制了一套采用旋转 $1/2$ 波片无色散移相器进行移相操作的全场光学相干层析成像系统. 该移相器能在宽光谱范围内无色散地获得 8 倍于 $1/2$ 波片旋转角的移相量, 能快速、方便地为各种移相算法提供所需的移相量. 移相量实测结果表明: 系统获得了 8 倍旋转角的移相量, 提出的移相器结构正确. 采用 Hariharan 移相算法对反射镜样品进行的成像实验表明系统具有较高的移相精度. 最后进行的实物样品成像实验, 检验了系统的有效性.

关键词: 全场光学相干层析成像, 无色散移相器, 旋转 $1/2$ 波片

PACC: 4278F, 4225K, 8170G

1. 引 言

光学相干层析成像 (optical coherence tomography, OCT) 技术^[1]将低相干干涉仪和共焦扫描显微术相结合, 利用外差探测技术来获取组织内部的结构或功能信息, 其成像深度达 mm 量级, 空间分辨率在 μm 量级. 因此, OCT 技术一经出现就迅速成为生物医学成像领域的研究热点, 被认为是一种极有前途的高分辨无损实时成像工具^[2,3]. 为了减少成像过程中环境干扰和样品移动导致的图像失真, 快速成像一直是人们追求的目标. 全场光学相干层析成像 (full-field OCT, FF-OCT) 技术^[4]基于并行探测模式进行成像, 它采用面阵探测器记录干涉信号, 无需横向扫描即能获得样品的二维断面图像, 使得成像速度大为提高, 是实现上述目标的有效方法. 再加上其具有视场内所有点的图像被同时采集而保持一致性、易于实现高分辨、系统控制简单、和机械稳定性高等特点, 因而国外许多小组在开展这方面的研究工作.

FF-OCT 技术的信号提取分为载频和移相两种方式, 其中载频所需的驱动电路和后续信号处理较为复杂, 而移相方式因其信息存储量小和信号处理简单等特点而被广泛采用. 压电陶瓷驱动器是一种

被广泛运用的移相器, 它通过改变两相干光束间的光程差来实现移相操作. 然而在宽光谱条件下, 这种基于空间位移而获得的移相量与波长有关, 是一种有色散移相器. 此时继续沿用针对单色光的传统移相算法来提取信号, 将会在结果中引入系统误差^[5,6]. 基于 Pancharatnam 相位或者 Berry 相位^[7]的无色散移相器则能避免上述问题, 其移相量只依赖于偏振态改变的路径, 而与波长无关^[8,9]. 已报道了基于旋转 $1/2$ 波片^[8,10,11]和旋转偏振片^[5,12]两种形式的无色散移相器, 后者已被应用于 OCT 系统^[5], 但只能提供 2 倍于偏振片旋转角的移相量, 而旋转 $1/2$ 波片无色散移相器在 OCT 中的应用还未见报道. 在文献 [13] 中, 作者提出了一种基于旋转 $1/2$ 波片的新型无色散移相器结构, 和实施该移相器功能的 FF-OCT 系统结构, 能在宽光谱范围内无色散地获得 8 倍于 $1/2$ 波片旋转角的移相量, 为实现快速、高分辨 OCT 成像提供了一种有效方法.

本文利用文献 [13] 中提出的移相器结构, 研制一套采用无色散移相器进行移相操作的 FF-OCT 系统. 通过移相量实测实验来验证移相器结构的正确性, 采用 Hariharan 移相算法来验证系统移相量的准确性, 并通过实物样品成像实验来检验系统的层析功能.

^{*} 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 批准号: 2006AA02Z4E0, 国家自然科学基金 (批准号: 60878057, 60378041, 60478040) 和浙江省自然科学基金 (批准号: Z603003) 资助的课题.

[†] E-mail: zh_ding@zju.edu.cn

2. 系统与方法

旋转 1/2 波片无色散移相器由两块快轴 45° 放置的 1/4 波片 (QWP₁, QWP₂) 和一块快轴可绕光轴旋转的 1/2 波片 (HWP) 组成, 波片针对中心波长 550 nm 设计. 当 1/2 波片旋转 θ 时, 往返共两次通过移相器的两垂直分量间将引入 8θ 的移相量. 详细地理论计算及性能分析见文献 [13]. 采用上述移相器结构的 FF-OCT 系统如图 1 所示, 为 Linnik 干涉结构^[14]. 100 W 卤钨灯光源与系统隔离放置, 出射光由光纤传光束传递至系统, 以消除光源散热风扇运转时引起的振动和空气扰动. 经滤波片 F 后, 入射系统光束的中心波长 λ_0 为 550 nm, 带宽 $\Delta\lambda$ 为 25 nm. 光束经透镜 L_1 (双胶合消色差, 焦距 40 mm) 准直后, 被偏振片 P 起偏. 偏振光经过无色散移相器后, 被

宽带偏振分光棱镜 PBS 分解成 s 偏振光和 p 偏振光, 分别被显微物镜 MO_1 和 MO_2 (均为 $NA = 0.25$, 焦距 20 mm) 聚焦于样品和参考镜上, MO_2 和参考镜安装在平移台上. 被样品反射或后向散射的样品光, 以及被参考镜反射后的参考光各自沿原路返回, 再次经过无色散移相器后到达偏振片 P , 由偏振片 P 实施检偏. 被宽带分光棱镜 BS 反射后的光束, 被成像透镜 L_2 (双胶合消色差, 焦距 150 mm) 聚焦在面阵 CCD 探测器 (像素数: 795×596 , 像素尺寸 $6.5 \mu\text{m} \times 6.25 \mu\text{m}$) 上. 通过调节偏振片 P 透光轴的方向, 可实现两相干光束的光强匹配. 把上述各参量带入纵向分辨率公式 $\Delta z = \frac{2\ln 2}{\pi} \left(\frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \right)$, 得到系统的理论纵向分辨率为 $5.3 \mu\text{m}$; 带入横向分辨率公式 $\delta = 0.61\lambda_0/NA$, 得到系统的横向分辨率为 $1.35 \mu\text{m}$.

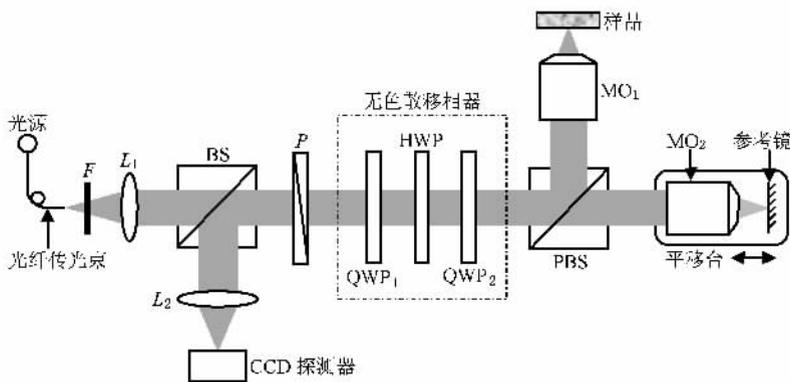


图 1 采用无色散移相器的 FF-OCT 系统

平移台带着参考镜轴向移动, 当样品臂和参考臂之间的光程差小于光源相干长度时, 参考光束和样品光束发生干涉, 此时 CCD 探测器接收到的光强信号为

$$I = I_0 + A \cos \phi, \quad (1)$$

其中, I_0 为直流项, ϕ 为初始相位差, A 为待求的样品信息. 电动旋转台带着 1/2 波片旋转 θ 时, 系统获得 8θ 的移相量, 此时 CCD 探测器接收到的光强为

$$I = I_0 + A \cos(\phi + 8\theta). \quad (2)$$

实验中用到的三种移相算法为:

1) Hariharan 算法: 要求的移相量为 $-180^\circ, -90^\circ, 0, 90^\circ, 180^\circ$, 分别由 1/2 波片旋转 $-22.5^\circ, -11.25^\circ, 0, 11.25^\circ, 22.5^\circ$ 而得到, 对应上述移相量时

CCD 采集的五幅干涉图为 I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 , 则样品的 OCT 图像由下式给出^[6]:

$$A = \frac{\sqrt{4(I_2 - I_4)^2 + (2I_3 - I_1 - I_5)^2}}{2(I_1 + I_2 + 2I_3 + I_4 + I_5)} \quad (3)$$

2) 四步算法: 要求的移相量为 $0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, 分别由 1/2 波片旋转 $0, 11.25^\circ, 22.5^\circ, 33.75^\circ$ 而得到, 对应上述移相量时 CCD 采集的四幅干涉图为 I_1, I_2, I_3, I_4 , 则样品的 OCT 图像由下式给出^[6,8]:

$$A = \frac{\sqrt{(I_4 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2}}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (4)$$

3) 三步算法: 要求的移相量为 $0, 120^\circ, 240^\circ$, 分别由 1/2 波片旋转 $0, 15^\circ, 30^\circ$ 而得到, 对应上述移相量时 CCD 采集的三幅干涉图为 I_1, I_2, I_3 , 则样品的

OCT 图像由下式给出^[5]:

$$A = \frac{[(2I_2 - I_1 - I_3)^2 + 3(I_1 - I_3)^2]^{1/2}}{3}. \quad (5)$$

3. 实验与结果

为了检验移相器结构的正确性,进行了移相量实测实验.采用反射镜作为样品,电动旋转台带着 1/2 波片连续旋转 90°,系统将获得 720°的移相量.软件控制 CCD 等间隔采集图像,采样间隔为 0.3°,共获得 300 幅干涉图像.取这些图像中同一像素点的光强值作为纵坐标,并进行归一化处理,得到光强值随 1/2 波片旋转角 θ 的变化如图 2 中的细实线所示.对该曲线进行 9 点平滑处理,得到如图中粗实线所示的移相量曲线. θ 从 0 至 90°变化,代入(2)式可得到理论移相量曲线.式中的初始相位差 ϕ 影响着理论曲线的左右位置,该值取为 180°并对函数值进行归一化处理,得到如图 2 中虚线所示的理论曲线.由图可见,理论与实测曲线较为接近,特别是在 50°至 90°旋转角范围内二者符合较好.这一结果表明:系统获得了 8θ 的移相量,移相器结构正确.虽然在 0°至 50°范围内理论与实测曲线存在着较大偏离,但这并不影响上述结论的成立,这一偏离是在实验过程中各种干扰导致的结果.而且在实际应用中,一般最大只需 360°的移相量,此时选取适当的初始相位差 ϕ 可使二者符合较好.

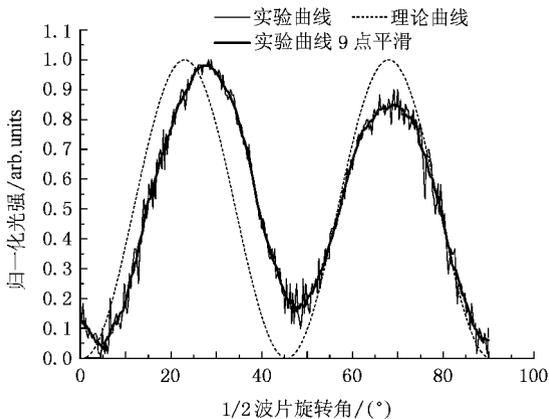


图 2 移相量实测曲线与理论曲线的对比

以 Hariharan 移相算法为例,来说明 OCT 成像的过程和检验系统移相量的准确性.反射镜样品的显微结构如图 3(a)所示,该图第 300 行的光强轮廓线如图 3(b)所示.调节参考镜的纵向位置直至 CCD 像

面出现干涉条纹,然后旋转 1/2 波片,在对应着 $-22.5^\circ, -11.25^\circ, 0, 11.25^\circ, 22.5^\circ$ 旋转角时由 CCD 采集图像,得到如图 3(c)和(e)所示的五幅干涉图 I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 ,并绘制它们第 300 行的光强轮廓线,得到如图 3(d)和(f)所示的曲线.由图 3(f)可见,五幅干涉图的光强轮廓线在水平方向上均匀分布,说明移相步长均匀.理论分析可知,移相准确时 I_1 和 I_5 的光强轮廓线在横轴方向应重合,为此单独绘出 I_1 和 I_5 的光强轮廓线如图 3(i)所示,可看出二者的符合程度非常高,说明移相器提供的移相量准确.由五幅干涉图运用(3)式,计算后可得到如图 3(g)所示的反射镜 OCT 图像,该图第 300 行的光强轮廓线如图 3(h)所示.在 OCT 图像中,样品细节清晰可见,得到了与原图较为符合的结果.但重建图像中仍保留有如图中斜线所示的干涉条纹痕迹.在 Choi 等人^[15]采用载频技术(由 PZT 提供),应用四步积分算法提取信号的 FF-OCT 实验中,也存在着这一现象.对此还有待进一步研究,通过系统参量优化可望解决这一问题.

采用 1 角硬币作为样品,选择图 4 中白色方框所示的区域进行成像.对成像深度的符号规定如下:成像深度以参考镜在空气中移动的距离表示,把参考镜对应着样品表面时的位置定为零位置 $Z = 0$,把深入到样品内部时的位置定为负值,如图中点画线所指断面的成像深度为 $Z = -a \mu\text{m}$.设样品折射率为 n ,则在样品中该断面离样品表面的距离为 $-a/n \mu\text{m}$.由于光线不能渗入硬币内部,而只选择与参考臂光程相等的那些表面轮廓进行成像,此时样品的折射率仍为 1,所以该断面离样品表面的距离为 $-a \mu\text{m}$.把样品光束聚焦于待测区域的右侧,得到如图 5(a)所示的样品显微像.调节参考镜的位置直至 CCD 像面出现干涉条纹,此时 $Z = 0$.分别运用四步和三步移相算法得到的 OCT 成像结果如图 5(b)和(c)所示.由图可见:样品右侧区域结构清晰,左侧只有几个突出的点被成像,其他结构则被滤除,表明系统确实具有层析能力,两种算法的结果较为接近,说明了系统的正确性.把样品光束聚焦于待测区域的左侧,得到如图 6(a)所示的样品显微像.移动参考镜至 $Z = -70 \mu\text{m}$ 时,CCD 像面出现干涉条纹,分别运用四步和三步移相算法得到的结果如图 6(b)和(c),系统具有的层析能力使得右侧区域结构不可见.

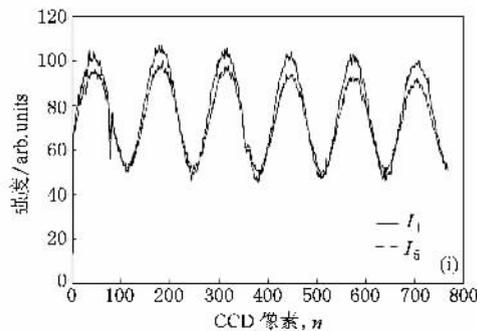
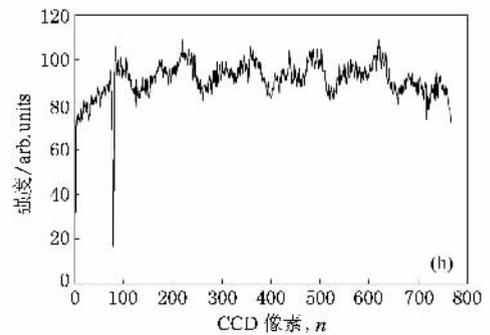
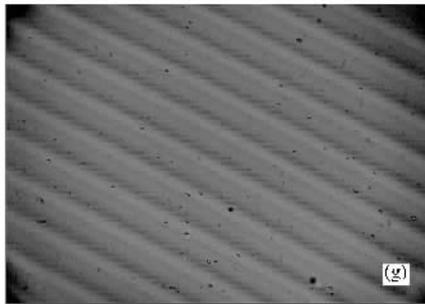
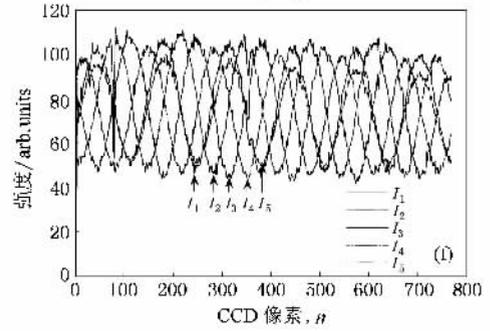
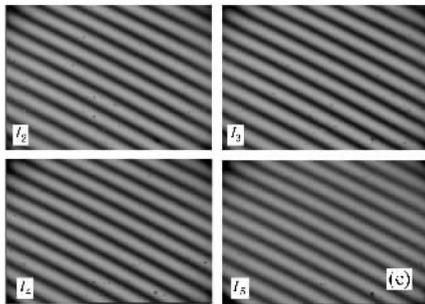
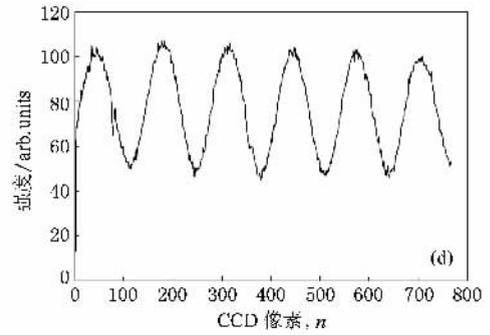
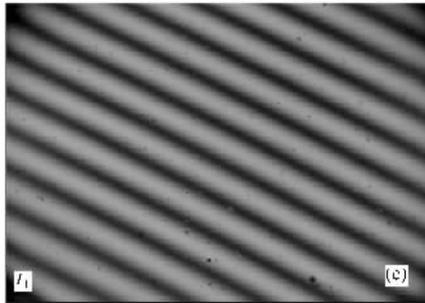
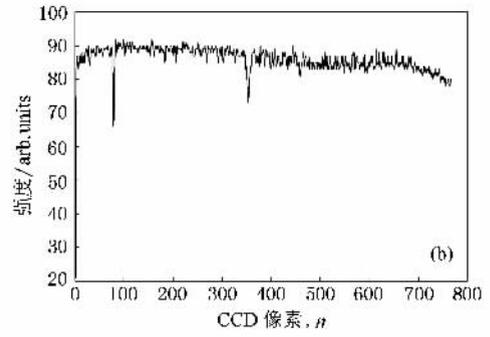


图 3 采用 Hariharan 移相算法的 OCT 成像过程及各图第 300 行的光强轮廓线图 (a) 样品显微图及 (b) 其光强轮廓线图 (c) 移相量为 $-\pi$ 时的干涉图 I_1 及 (d) 其光强轮廓线图 (e) 相量为 $-\pi/2, 0, \pi/2, \pi$ 时的干涉图 I_2, I_3, I_4, I_5 及 (f) $I_1 - I_5$ 的光强轮廓线图 (g) 样品的 OCT 图像及 (h) 光强轮廓线图 (i) I_1 和 I_5 的光强轮廓线对比图



图 4 样品成像区域及成像深度定义示意图

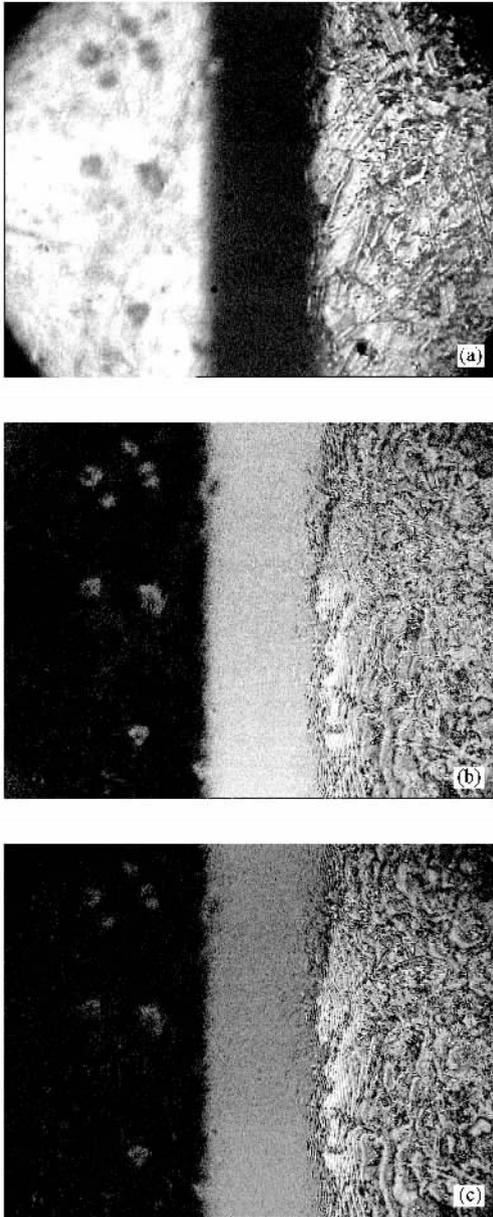


图 5 聚焦于样品右侧($Z = 0$)时的 OCT 图像 (a)样品显微图 (b)四步和(c)三步移相算法获得的 OCT 图像(图像尺寸 $0.67 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$)

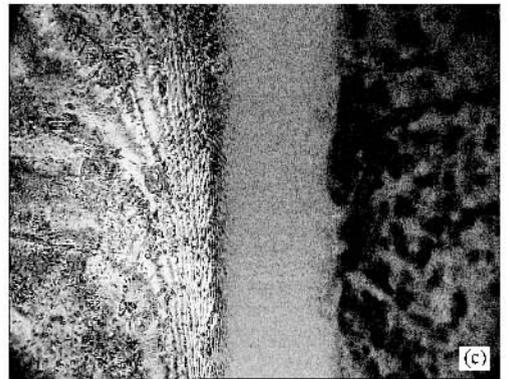
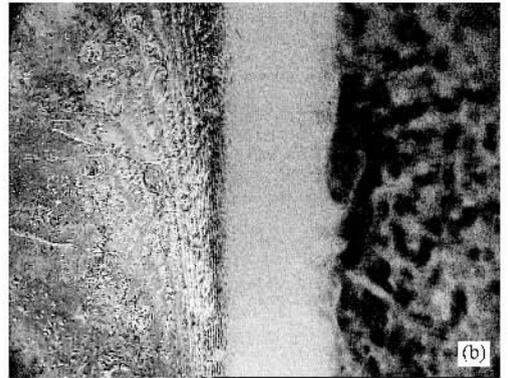
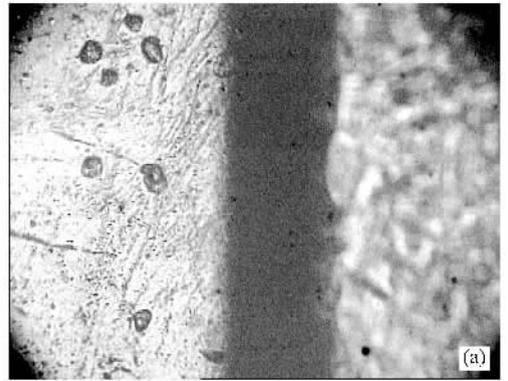


图 6 聚焦于样品左侧($Z = -70 \mu\text{m}$)时的 OCT 图像 (a)样品显微图 (b)四步和(c)三步移相算法获得的 OCT 图像(图像尺寸 $0.67 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$)

4. 结 论

研制了一套采用新型无色散移相器进行移相操作的 FF-OCT 系统,避免了宽光谱条件下采用有色散移相器和传统移相算法带来的系统误差.进行了 720° 移相量实测实验,获得的实验曲线与理论曲线较为符合,表明系统获得了 8θ 的移相量,文献 [13] 提出的移相器结构正确.运用 Hariharan 移相算法对

反射镜样品进行的成像实验结果表明,系统具有较高的移相精度.最后对实物样品运用两种移相算法进行了成像实验,检验了系统的层析功能和所得结

果的正确性.与现有系统相比,本系统具有成像速度快、算法适应性强和器件使用量少等优点.

- [1] Huang D , Swanson E A , Lin C P , Schuman J S , Stinson W G , Chang W , Hee M R , Flotte T , Gregory K , Puliafito C A , Fujimoto J G 1991 *Science* **254** 1178
- [2] Liang Y M , Zhou D C , Meng F Y , Wang M W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3246 (in Chinese) [梁艳梅、周大川、孟凡勇、王明伟 2007 *物理学报* **56** 3246]
- [3] Jia Y Q , Liang Y M , Zhu X N 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3861 (in Chinese) [贾亚青、梁艳梅、朱晓农 2007 *物理学报* **56** 3861]
- [4] Beaurepaire E , Boccara A C , Lebec M , Blanchot L , Saint-Jalmes H 1998 *Opt. Lett.* **23** 244
- [5] Yuuki W , Yasuhiro H , Manabu S , Naohiro T 2005 *Appl. Opt.* **44** 1387
- [6] David G F , Ben O 2001 *Proc. SPIE* **4251** 97
- [7] Rajendra B 1988 *Phys. Lett. A* **133** 1
- [8] Hariharan P , Roy M 1994 *J. Mod. Opt.* **41** 2197
- [9] Naoshi B , Kaichirou S 1997 *Opt. Rev.* **4** 593
- [10] Hariharan P , Roy M 1996 *Proc. SPIE* **2860** 100
- [11] Naoshi B , Naoshi M , Tsuyoshi I 2003 *Proc. SPIE* **4838** 1451
- [12] Helen S S , Kothiyal M P , Sirohi R S 1998 *Opt. Commun.* **154** 249
- [13] Yang Y L , Ding Z H 2007 *Acta Optica Sinica* **27** 1460 (in Chinese) [杨亚良、丁志华 2007 *光学学报* **27** 1460]
- [14] Dubois A , Vabre L , Boccara A C , Beaurepaire E 2002 *Appl. Opt.* **41** 805
- [15] Choi W J , Na J , Ryu S Y , Lee B H 2007 *J. Opt. Soc. Korea* **11** 18

Development of full-field optical coherence tomography system^{*}

Yang Ya-Liang Ding Zhi-Hua[†] Wang Kai Wu Ling Wu Lan

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China)

(Received 25 July 2008 ; revised manuscript received 10 September 2008)

Abstract

A full-field optical coherence tomography system using an achromatic phase shifter based on a rotating half-wave plate to implement phase shifting is developed. The phase shifter can achromatically introduce phase shift of eight times the rotating angle of the half-wave plate, and can rapidly provide various phase shifts for various algorithms. Real phase shift is measured and the result demonstrates that the system gives a phase shift of eight times the rotating angle of the half-wave plate, showing the achromatic phase shifter model is correct. Imaging experiment results of a mirror using Hariharan algorithm show that the system has high phase shift precision. A coin as the sample is imaged to demonstrate the performance of the system.

Keywords : full-field optical coherence tomography , achromatic phase shifter , rotating half-wave plate

PACC : 4278F , 4225K , 8170G

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA02Z4E0), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60878057 , 60378041 , 60478040) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province , China (Grant No. Z603003).

[†] E-mail : zh_ding@zju.edu.cn