

可用于小口径光束波前检测的横向剪切干涉仪

刘 蕾^{1,2} 曾爱军¹ 朱玲琳¹ 黄惠杰¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种可用于小口径光束波面检测的横向剪切干涉仪。该干涉仪由偏振分光棱镜、光轴与其表面平行的晶体平板、1/4 波片、反射镜及 CCD 构成。被测光束由偏振分光棱镜进行透射起偏和反射检偏, 利用反射镜的反射两次经过晶体平板、1/4 波片来实现剪切光束的等光程干涉。通过晶体平板剪切复制波面以获得小的剪切量, 可用于小口径光束波面的检测。晶体平板的旋转可以改变剪切量, 实现了不同口径不同波前的光束波面检测。对该干涉仪进行了仿真分析, 得到了不同入射角情况下的剪切干涉图, 仿真结果与理论分析结果相一致。实验中, 旋转晶体平板得到的剪切干涉图与仿真结果相一致, 很好地验证了该剪切干涉仪的有效性。

关键词 相干光学; 波面检测; 横向剪切; 干涉仪; 等光程差

中图分类号 TH744 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0108003

Lateral Shearing Interferometer for the Wavefront Test of Small Beam

Liu Lei^{1,2} Zeng Aijun¹ Zhu Linglin¹ Huang Huijie¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A lateral shearing interferometer for the wavefront test of small beam is proposed. The interferometer is composed of a polarization beam splitter, a crystal plate, a quarter-wave plate, a mirror and a CCD detector. The polarization beam splitter is used both as a polarizer and an analyzer. The interferometer can test wavefront of low coherent light for its equal optical path length. Small shearing amount can be obtained by the crystal plate whose optical axis is parallel to its surface, thus it's suitable for the wavefront test of small beam. The shearing amount can be continuously adjusted by rotating the crystal plate. Using ASAP software, the lateral shearing interferometer is simulated. The simulation result is well coincident with the theoretical derivation. In the experiments, the interferometer is built to obtain interferogram by rotating the crystal plate. The experimental result is well coincident with the simulation result. The usefulness of the interferometer is verified.

Key words coherence optics; wavefront testing; lateral shearing; interferometer; equal optical path difference

OCIS codes 260.3160; 260.1440; 220.4840

1 引 言

波面测量技术是光学测量技术的一个重要分支, 它利用波面的变化反映光波经过的媒质或系统的相关特性, 进而可以获得媒质或系统的多种相关信

息^[1-3]。波面测量技术被广泛应用于光束质量监测^[4]、气体动力学研究^[5]等方面。波面测量通常采用剪切干涉仪^[6-8]来实现, 它将被测波面与其被剪切复制的波面进行干涉, 对干涉图进行解包裹和波面重

收稿日期: 2013-06-18; 收到修改稿日期: 2013-08-30

基金项目: 国家国际科技合作项目(2011DFR10010)、国家科技重大专项(2011ZX02402)

作者简介: 刘 蕾(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: llei@siom.ac.cn

导师简介: 曾爱军(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事偏振光技术与光电检测技术等方面的研究。

E-mail: aijunzeng@siom.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

建。由于不需要标准参考面,所以具有结构简单、紧凑等特点,同时它的共光路干涉特性使其不易受环境影响。在横向剪切干涉仪中,最常用的剪切元件为玻璃平板、晶体平板等^[9]。由于受制造工艺的影响,玻璃平板的厚度不能太小,难以获得小的剪切量^[10]。玻璃平板利用它的前后表面产生两束相干光束,无法满足等光程干涉的要求。在晶体平板中,光轴与表面不平行的萨瓦平板可以利用双折射产生小的剪切量,但是也不能实现等光程剪切干涉^[11]。

针对现有剪切干涉技术的不足,本文提出了一种可用于小口径光束波前检测的横向剪切干涉仪。该干涉仪利用光轴与表面平行的晶体平板剪切复制被测波面,通过 1/4 波片和反射镜交换两束光的偏振态,补偿光程差以实现等光程干涉。将晶体平板绕其光轴旋转,可以实现剪切量可调,同时,该干涉仪还具有结构简单紧凑的优点。

2 原 理

可用于小口径光束波前检测的横向剪切干涉仪的光路如图 1 所示,它由偏振分光棱镜、晶体平板(PBS)、1/4 波片、反射镜、CCD 所构成。建立如图所示的右手坐标系,光束传输方向为 z 轴,晶体平板的光轴方向为 y 轴。偏振分光棱镜的透光轴与 x 轴、 y 轴成 45° 夹角。晶体平板是厚度较大的单轴晶体,其光轴与表面平行,晶体平板可以绕其光轴方向(y 轴)旋转。1/4 波片的快轴方向与与 x 轴、 y 轴成 45° 夹角。CCD 的光敏面与偏振分光棱镜的反射光出射表面平行。

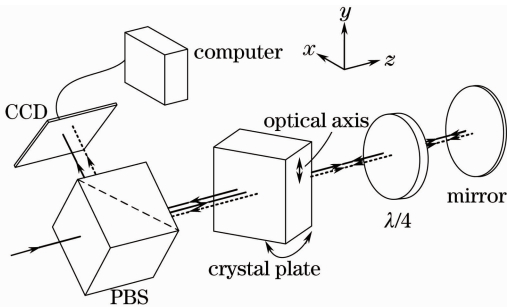


图 1 小口径光束横向剪切干涉仪的原理图
Fig. 1 Schematic diagram of lateral shearing interferometer for small beam

被测光束正入射到偏振分光棱镜上,其透射光为线偏振光。该透射光以一定角度入射到晶体平板上,在 xz 平面内被分为光强相等的两个子光束,这两个子光束通过 1/4 波片后分别变为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光。两束圆偏振光经过反射镜反射后

沿原路返回,再经过 1/4 波片后又变为线偏振光,但是其振动方向互换。这两个子光束再次入射到晶体平板上时,其剪切量加倍,光程差互相抵消。剪切量加倍的两个子光束最后由偏振分光棱镜的分光面反射并检偏,进而产生偏振剪切干涉,其剪切干涉图由 CCD 所接收。

入射光束在晶体平板中的剪切光路如图 2 所示(以负轴晶体为例, y 轴垂直于纸面向外)。入射光束以一定角度入射到晶体平板表面上,由于晶体平板的双折射特性而发生横向剪切。入射光分为两束偏振方向互相垂直的线偏振光,即寻常光 o 光和非常光 e 光。由于光轴平行于入射面,若绕光轴方向旋转晶体平板,则寻常光 o 光的光线方向 s_o 与其波法线方向 k_o 重合,非常光 e 光的光线方向 s_e 与其波法线方向 k_e 重合。

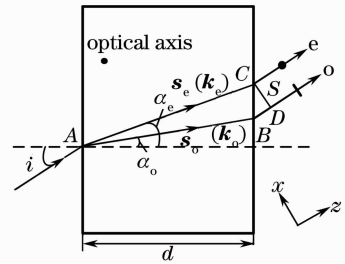


图 2 光束在晶体平板中的剪切光路

Fig. 2 Optic path of incident beam in crystal plate

根据几何关系可以得到光束通过晶体平板后 o 光和 e 光之间的剪切量 s 随光线入射角 i 的变化关系为

$$s = d[\tan(-\alpha_e) + \tan \alpha_o] \cos i, \quad (1)$$

式中 d 为晶体平板的厚度, i 为入射角。根据折射定律可知 α_o 和 α_e 分别为(以空气中为例)

$$\sin i = n_o \sin \alpha_o, \quad (2)$$

$$\sin i = n_e \sin \alpha_e, \quad (3)$$

式中 n_o 和 n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率。由(1)~(3)式可得,剪切量 s 为

$$s = d \cdot \sin i \left(\frac{1}{\sqrt{n_e^2 - \sin^2 i}} - \frac{1}{\sqrt{n_o^2 - \sin^2 i}} \right) \cos i, \quad (4)$$

$$i \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right].$$

由(4)式可知,剪切量 s 为关于入射角 i 的奇对称函数,以单位厚度的方解石平板为例,剪切量 s 随入射角 i 的变化曲线如图 3 所示。随入射角的增大,剪切量由小到大再减小,在 55.8° 时剪切量取得极大值。由图 3 可见,单位厚度的方解石平板的剪切量在 $0 \sim 0.053 \text{ mm}$ 内连续可调,故采用晶体平板

的横向剪切干涉仪适合于不同口径、波前的小口径光束波面的检测。

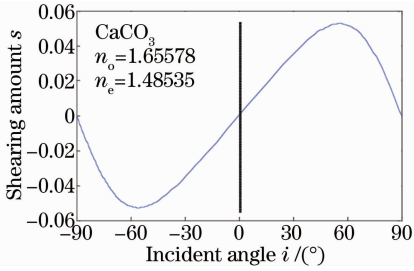


图 3 剪切量随入射角的变化曲线

Fig. 3 Curve of shearing amount versus incident angle

在图 1 中, 光束两次通过晶体平板的光路如图 4 所示。光束以角度 i 入射到晶体平板时, 分束成 o 光和 e 光, o 光沿着 \overline{AB} 方向传播, e 光沿着 \overline{AC} 方向传播, 两束光从晶体平板平行出射, 此时两束光的剪切量为 \overline{CD} 。当光束由反射镜反射, 经过 $1/4$ 波片后 o 光变 e 光, e 光变 o 光, 再次入射到晶体平板时, 入射角大小依然为 i , o (e) 光沿着 \overline{BF} (平行于 \overline{AC}) 方向传播, 而 e (o) 光沿着 \overline{CE} (平行于 \overline{AB}) 方向传播, 最后两束光从晶体平板的前表面平行出射, 剪切量为 \overline{GF} 。由几何关系可知 \overline{GF} 为 $2s$, 即两次经过晶体平板后其剪切量加倍。

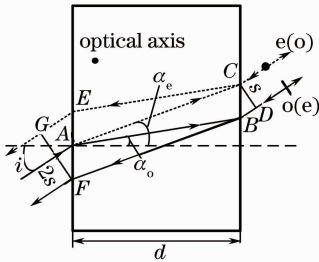


图 4 光束两次通过晶体平板的光路

Fig. 4 Optic path of incident beam passing crystal plate twice

由晶体平板前表面出射的两束光总的光程差 (OPD, l_{OPD}) 为

$$l_{OPD} = (\overline{AB} \cdot n_o + \overline{BD} - \overline{AC} \cdot n_e) + (\overline{BD} + \overline{BF} \cdot n_e - \overline{CE} \cdot n_o - \overline{GE}), \quad (5)$$

由图 4 中几何关系可知

$$\overline{AB} = \overline{CE}, \overline{AC} = \overline{BF}, 2\overline{BD} = \overline{GE}. \quad (6)$$

由(5)~(6)式可得光程差为零。可见, 最后从晶体平板前表面出射的两束偏振光的光程差互相抵消。

该干涉仪利用光轴与表面平行的晶体平板剪切复制波面, 可以获得小的剪切量, 适合小口径光束的波面检测。将晶体平板绕其光轴旋转改变入射角, 可以实现剪切量的可调。通过 $1/4$ 波片和反射镜来

交换两束光的偏振态, 可以补偿光程差以实现等光程干涉。同时, 该干涉仪实现了循环光路剪切干涉, 具有结构简单紧凑的优点。

3 仿 真

为了验证小口径光束横向剪切干涉仪的有效性, 利用 ASAP 软件对该干涉仪进行了仿真分析。在仿真过程中, 被测波面的波长为 635 nm, 口径为 2 mm, 发散角为 0.23° 。偏振分光棱镜设置为镀有偏振分光薄膜的立方棱镜。晶体平板的材料设置为方解石, 折射率 n_o 为 1.65578、 n_e 为 1.48535。晶体平板的厚度设置为 12 mm, 光轴与其表面平行。 $1/4$ 波片设置为延迟量为 90° 的理想波片。反射镜设置为镀有全反膜的平板。探测器设置为垂直于干涉光束的平面。

由于仿真用的被测波面为球面波, 剪切复制的两个波面之间则具有光程差。通过旋转晶体平板以改变被测光束在晶体平板上的入射角, 从而改变了剪切量, 可以得到不同剪切量条件下的剪切干涉图, 如图 5 所示。图 5(a)~(f) 分别为入射角分别取 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 时得到的剪切干涉图。由这些剪切干涉图可以看出, 随入射角的增大, 剪切干涉条纹的密度先增大后开始减小, 说明剪切量也是由小到大再减小, 与图 3 所示的变化规律一致。

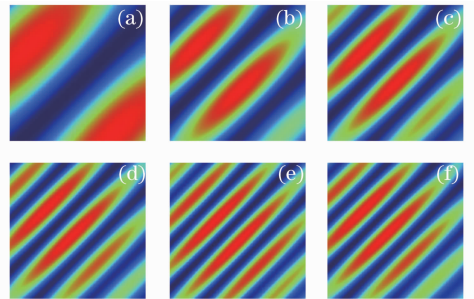


图 5 随入射角增加的剪切干涉仿真结果

Fig. 5 Interference patterns of different incident angles in the simulation

4 实 验

实验中, 被测光束的光源为 635 nm 激光二极管, 它经过光纤耦合后出射并由短焦距透镜进行光束准直, 调节透镜与光纤之间的距离可以得到出射口径为 2 mm 的发散光束。偏振分光棱镜为两块 K9 材料的等腰直角棱镜胶合形成的立方棱镜, 胶合面镀有偏振分光薄膜, 其透光轴与入射面的夹角为 45° , 其消光比为 50:1。晶体平板为光轴与表面平

行的方解石,厚度为 12 mm,折射率 n_o 为 1.65578, n_e 为 1.48535。1/4 波片为石英波片,延迟量精度为 1/300。反射镜采用楔形平板的前表面来实现。CCD 的像素数为 1024 pixel×1024 pixel。

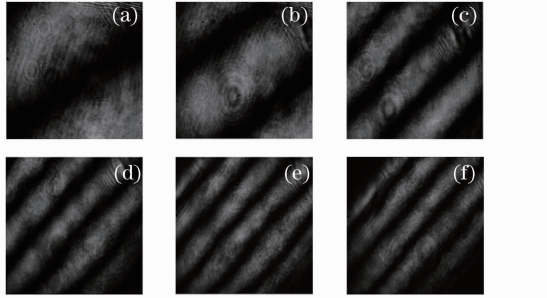


图 6 随入射角增加的剪切干涉实验结果
Fig. 6 Interference patterns of different incident angles in the experiment

实验中通过调整短焦距透镜与光纤出射面的距离来改变波面形状,通过旋转晶体平板以改变被测光束在晶体平板上的入射角,从而改变了剪切量,可以得到不同剪切量条件下的剪切干涉图,如图 6 所示。图 6(a)~(f)分别为入射角分别取 10°、20°、30°、40°、50°和 60°时得到的剪切干涉图。可以看到,实验中晶体平板旋转不同角度得到的剪切干涉图与仿真得到的相一致,验证了该小口径光束剪切干涉仪原理的有效性。

5 结 论

提出了一种小口径光束横向剪切干涉仪。利用光轴与表面平行的晶体平板对被测波面进行剪切复制,可以获得很小的剪切量,适合小口径光束波面的检测。该干涉仪实现等光程干涉,适合低相干波面的检测。通过旋转晶体平板可以实现剪切量连续可调的剪切干涉,适合不同口径、波前光束波面的检测。该干涉仪共光路干涉,结构简单紧凑。仿真分析了该干涉仪的剪切干涉过程,得到了不同剪切量条件下的剪切干涉图。对该干涉仪进行实验验证,其实验结果与仿真结果相一致,很好地验证了该干涉仪的有效性。

参 考 文 献

- 1 Ma Chuntao, Luo Hongxin, Wang Jie, *et al.*. Surface error measurement of plane mirrors based on oblique incidence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(7): 071201.
马春桃, 罗红心, 王 劫, 等. 斜入射法检测平面反射镜的面形误差[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(7): 071201.
- 2 Zhao Qi, Jiang Zewei, He Yong, *et al.*. Development and calibration of a radial-shearing interferometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 041204.
赵 琦, 蒋泽伟, 何 勇, 等. 径向剪切干涉仪系统的研制与校准研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 041204.
- 3 Zheng Xiaoyi, Wang Yurong, Wang Qingpu, *et al.*. Measurement of optical inhomogeneity with dual-wavelength phase-shifting interferometry [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s108008.
郑箫逸, 王玉荣, 王青圃, 等. 采用双波长相移干涉测量光学非均匀性的研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s108008.
- 4 Dong Liu, Yongying Yang, Lin Wang, *et al.*. Real time diagnosis of transient pulse laser with high repetition by radial shearing interferometer [J]. *Appl Opt*, 2007, 46 (34): 8305-8314.
- 5 Jiang Zongfu, Xi Fengjie, Hou Jing, *et al.*. Optical effects measurements in a low velocity turbulent jet [J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(8): 943-946.
姜宗福, 习锋杰, 侯 静, 等. 低速湍流中的气动光学效应实验研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(8): 943-946.
- 6 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.
- 7 Zeng Xin, Ding Jianping, Liang Peiyong, *et al.*. Wave front reconstruction from shearing interferograms using least square fitting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(3): 335-340.
曾 新, 丁建平, 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.
- 8 Luan Zhu, Wang Lijuan, Zhou Yu, *et al.*. Large-aperture lateral double shearing laser interferometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(s1): 273-276.
栾 竹, 王利娟, 周 煜, 等. 大口径横向双剪切激光干涉仪[J]. *中国激光*, 2010, 37(s1): 273-276.
- 9 M V R K Murty, The use of a single plane parallel plate as a lateral shearing interferometer with a visible gas laser source[J]. *Appl Opt*, 1964, 3(4): 531-534.
- 10 Zheng Xin, Guo Xiuzhen, Xiong Xueshuang, *et al.*. Real-time inspection of collimated light beam with small aperture [J]. *Journal of Jilin University*, 2006, 44(2): 246-249.
郑 欣, 国秀珍, 熊雪霜, 等. 小口径光束准直性的实时检测[J]. *吉林大学学报*, 2006, 44(2): 246-249.
- 11 S T Lin, S H Shih, H N Feng, *et al.*. Phase-shifting Savart shearing interferometer[J]. *Opt Eng*, 2006, 45(12): 125602.

栏目编辑:何卓铭