# 激光回馈双折射测量系统稳频技术研究

邓 勇,宋健军,汪晨旭,杨 元

(南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘 要:波片、晶体等自然双折射元件广泛应用于各种光学系统中。普通光学元件在加工、镀膜等过程 中会引入残余的内应力,形成双折射。双折射会对整个光学系统的性能产生影响,需要对其进行精确 测量。基于激光回馈效应,利用偏振跳变中光强调制曲线与双折射的线性关系,构建了光学元件双折 射测量系统。通过引入稳频技术,使激光器长期稳定单纵模运转,增强了激光器的抗干扰能力,提高了 系统的稳定性。实验结果表明,构建的激光回馈双折射测量系统测量精度优于 0.24°,重复测量最大偏 差 0.13°,标准差 0.06°,稳定性好,可靠性高,可实现在线测量。该系统有潜力应用于微小应力的在线测 量,如飞机座舱盖、汽车玻璃等。

关键词:激光回馈; 双折射测量; 稳频; 偏振跳变 中图分类号:TH741 文献标志码:A DOI:10.3788/IRLA201847.1217007

# Research on frequency stabilization of laser feedback birefringence measurement system

Deng Yong, Song Jianjun, Wang Chenxu, Yang Yuan

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Natural birefringent elements such as wave plates and crystals are widely used in various optical systems. During the processing and coating process, residual stress will be introduced into the common optical components, causing birefringence. The birefringence has influences on performances of whole optical systems, which needs to be measured precisely. The birefringence measurement system was constructed based on the laser feedback effect, utilizing the linear relationship between light intensity modulation curve and birefringence in polarization flipping phenomenon. The long -term stable single longitudinal mode functioning of the laser could be fulfilled by utilizing frequency stabilization technique, which improved the anti -disturbance capability of the laser and the stability of the system. The experimental results show that the measurement accuracy of the system is within 0.24 °, and standard derivation of multi-measurement is within 0.18 °. The system can work on-line with good reliability and high stability. The system has potentials to be applied to on-line measurement of micro-stress, such as stresses in aircraft canopy, automotive glass, etc.

Key words: laser feedback; birefringence measurement; frequency stabilization; polarization flipping

收稿日期:2018-07-10; 修订日期:2018-08-28

基金项目:国家自然科学基金(61775118)

作者简介:邓勇(1965-),男,教授,主要从事激光精密测量方面的研究。Email: dengy@ntu.edu.cn

# 0 引 言

双折射元件广泛应用于各种光学系统<sup>[1-2]</sup>。在外 差式激光干涉仪中,四分之一波片将激光器输出的 圆偏振光转换为线偏振光,其相位延迟的偏差会引 入线性误差,影响测量精度。在一些成像系统中,光 学组件的双折射对成像质量有显著影响<sup>[3]</sup>。因此,精 确测量双折射元件的相位延迟大小极其必要。

目前常用的相位延迟测量技术有旋转消光法<sup>[4-6]</sup>、 椭偏仪法<sup>[7-9]</sup>、频率分裂法<sup>[10-11]</sup>等。其中旋转消光法应 用广泛,分辨力较高,但其结构复杂,实际的精度在 3°左右。椭偏仪法测量光谱范围广,但波长的偏移制 约了其测量精度,且高精度测量需要建立复杂的数 学模型。频率分裂法测量精度最高,可达到 2′,目前 作为波片测量的国家标准,但被测样品需镀增透膜, 制约了它在生产过程中的应用。

激光回馈又称激光自混合干涉,是指激光器发 出的光被腔外物体反射或散射,部分光又反馈回激 光器谐振腔内,对激光器的功率、频率、偏振态等物 理量产生调制的效应<sup>[12-18]</sup>。在各向异性回馈腔中,通 过解调光强和偏振态的信息可实现双折射测量。文 中基于激光回馈效应构建了各向异性的回馈双折射 测量系统,但系统长时间工作会出现频率漂移和跳 模现象,严重影响双折射测量的精度和重复性甚至 无法测量,为提高测量的稳定性,系统引入稳频技 术,使激光器稳定处于单纵模输出状态,提高了激光 器抗干扰能力。利用优化后的系统对波片和 TGG 晶 体进行测量,结果表明该系统精度高,可靠性好,对 双折射元件的生产检测和应用具有重要意义。

#### 1 实验系统及原理

文中构建的激光回馈双折射测量系统如图 1 所示。系统采用波长为 632.8 nm 的全内腔线偏振 He-Ne 激光器, 腔长 150 nm, 氦氖充气比为 9:1。为避免 兰姆凹陷, 氖气充双同位素, Ne<sup>20</sup>:Ne<sup>22</sup>=1:1。M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 为 激光器的谐振腔镜, 反射率分别为 99.5%和 98.9%。 BS 为分光镜, 激光光束经 BS 分光后一路进入探测 器 D<sub>1</sub>, 用来探测光强信号的变化, 另一路经沃拉斯 顿棱镜 WLP 后再次被分为两路, 分别为探测器 D<sub>3</sub> 和 D<sub>4</sub> 所接收。S 为待测样品, 文中所用样品为波片 和 TGG 晶体。 $M_{E}$  为回馈镜,反射率为 26%。 $M_{2}$ 、 $M_{E}$ 构成激光器回馈外腔,回馈外腔长 200 mm。PZT 为 压电陶瓷,由三角波电压驱动,使回馈镜  $M_{E}$  作周期性 往复运动,改变回馈外腔长度以调制光强信号。P 为偏 振片,偏振方向与激光光轴方向垂直,探测器  $D_{2}$  用来 探测调制后的偏振态信号。 $D_{1}$ 探测的光强信号和  $D_{2}$  探 测的偏振态信号经 A/D 转换后送入计算机处理。



图1激光回馈系统

Fig.1 Schematic diagram of laser feedback system

系统实物如图2所示。



图 2 实验系统图 Fig.2 Photo of experimental system

当回馈外腔长随着 M<sub>E</sub> 的往复运动作周期性的 变化时, D<sub>1</sub> 采集到的光强信号曲线呈现类余弦的变 化, 且回馈镜每移动半个波长, 光强波动变化一个周 期, 如图 3 所示。



在回馈外腔中插入双折射元件,回馈外腔由各 向同性腔变为各向异性腔。在双折射外腔回馈的作 用下,激光器的两个本征偏振态对应的损耗不一致, 将发生模式竞争并交替振荡,在光强曲线中呈现为 偏振跳变现象。正交偏振光的强度都会受到回馈外 腔的调制,调制周期等于传统激光回馈的调制周期, 如图 4 所示。



Fig.4 Polarization flipping waveform

从图 4 的偏振跳变曲线可以看出,在 PZT 驱动 电压上升沿,AB 段为 P 偏振态,即为 o 光,BD 段为 S 偏振态,即为 e 光,在 B 点偏振态由 P 跳变到 S, 此即为偏振跳变现象,B、F 均为偏振跳变点。由于两 个偏振态交替出现,激光通过偏振片后,D<sub>2</sub>采集到 的为方波信号。

为了阐述激光偏振跳变现象所蕴含的物理机制,用三腔镜理论模型对偏振跳变现象进行分析<sup>[19-20]</sup>。 假设激光器谐振腔长为L,回馈外腔长度为L。腔镜 M<sub>1</sub> 作为起始点,初始电场为 $E_0 \exp[i(\omega t + \varphi_0)], \omega$ 为激光 角频率, $\varphi_0$ 为初始相位,激光在三腔镜中往返一个周 期可分成两部分:一部分是激光在谐振腔内往返一 次;另一部分是激光透射过腔镜 M<sub>2</sub>,被回馈镜 M<sub>E</sub> 反 射回谐振腔内部。两部分激光在 M<sub>1</sub> 处叠加,叠加后 的电场为 E,则有:

$$E = r_{1} r_{2} E_{0} e^{i2kL} e^{2gL} + (1 - r_{2})^{2} r_{E} r_{1} E_{0} e^{i2k(L+1)} e^{2gL} = r_{1} e^{i2kL} e^{2gL} [r_{2} + (1 - r_{2})^{2} r_{E} e^{i2kI}] E_{0} = r_{1} r_{eff} e^{i2kL} e^{2gI} E_{0} = R_{1}^{1/2} R_{eff} e^{i2kL} e^{2gI} E_{0}$$
(1)

式中: $E_0$ 为初始电场;k 为真空下的波数;g 为激光 器增益系数;r<sub>1</sub>、r<sub>2</sub>和 $r_F$ 为腔镜  $M_1$ 、 $M_2$ 和  $M_E$ 振幅反 射率;  $R_1$ 、 $R_2$ 和  $R_E$ 分别为腔镜  $M_1$ 、 $M_2$ 和  $M_E$ 强度反 射率;  $r_{eff}$ 为  $M_2$ 等效振幅反射率;  $R_{eff}$ 为腔镜  $M_2$ 等效 强度反射率。

把回馈镜的作用等效成腔镜 M<sub>2</sub>反射率的变化, 可得:

$$R_{eff} = r_{eff}^{2} = \left| r_{2} + (1 - r_{2})^{2} r_{E} e^{i2kl} \right|^{2} =$$

$$r_{2}^{2} + 2r_{2} r_{E} (1 - r_{2})^{2} \cos(2kl) + (1 - r_{2})^{4} r_{E}^{2} =$$

$$R_{2} + 2R_{2}^{1/2} (1 - R_{2}) (1 - R_{E}) \cos(2kl) + (1 - R_{2})^{4} r_{E}^{2} \approx$$

$$R_{2} + 2R_{2}^{1/2} (1 - R_{2}) (1 - R_{E})^{1/2} \cos(2kl) \qquad (2)$$

因 R<sub>2</sub>≈1,表达式第三项可以忽略,公式(2)可简 化为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{R}_{1}^{1/2} \mathbf{e}^{12kL} \mathbf{e}^{2gL} \mathbf{E}_{0} \mathbf{R}_{2} + 2\mathbf{R}_{1}^{1/2} \mathbf{e}^{12kL} \mathbf{e}^{2gL} \cdot \mathbf{E}_{0} \mathbf{R}_{2}^{1/2} (1 - \mathbf{R}_{2}) (1 - \mathbf{R}_{E})^{1/2} \cos(2k\mathbf{I})$$
(3)

从上述表达式可以看出,在各向同性回馈下,激 光器输出光强受到回馈镜调制,呈现类余弦变化。

对于各向异性回馈系统,由于腔内插入了相位 延迟为δ的双折射元件,**o**光和 e 光的等效反射率 不同,二者等效反射率为:

$$\mathbf{R}_{eff}^{o} = \mathbf{R}_{2} + 2\mathbf{R}_{2}^{1/2} (1 - \mathbf{R}_{2}) (1 - \mathbf{R}_{E})^{1/2} \cos(2k\mathbf{I})$$
  
$$\mathbf{R}_{eff}^{e} = \mathbf{R}_{2} + 2\mathbf{R}_{2}^{1/2} (1 - \mathbf{R}_{2}) (1 - \mathbf{R}_{E})^{1/2} \cos(2k\mathbf{I} + 2\delta)$$
(4)

从上式可以看出随着回馈外腔长度1的变化,两 个偏振态的等效反射率出现类余弦变化,获得较大 增益的偏振态在谐振腔中将会优先起振,抑制另一 偏振态。随着1的变化,二者增益大小将会反复交 替,出现偏振跳变现象,且偏振跳变点的位置与双折 射元件相位延迟大小线性相关,公式如下:

$$\delta = \left(\frac{L_{BC}}{L_{AD}} + \frac{L_{FG}}{L_{EH}}\right) \times 90^{\circ} = 2\pi \frac{|n_o - n_e|}{\lambda} d$$
 (5)

因此,利用激光回馈效应中的偏振跳变现象,可 以实现双折射元件相位延迟的测量。

#### 2 系统优化关键技术

系统采用的光源为全内腔线偏振的 He-Ne 激 光器,为维持系统的正常工作,激光器必须工作在单 纵模状态。在多纵模或跳模状态下会出现偏振跳变 波形异常,某一偏振分量中混叠入另一纵模的偏振 分量,影响正常测量,所以必须对系统进行稳频,以 保证其稳定性。该系统参考正交偏振双频激光器中 的等光强稳频法<sup>[21-23]</sup>,对单纵模激光器引入参考电 压,设计了如图5所示的稳频方案。



Fig.5 Diagram of frequency stabilization scheme

在系统光路中加入 WLP, 通过 D<sub>3</sub> 和 D<sub>4</sub> 探测到 的光强信号对激光器的工作模式进行判断并控制稳 频电路的工作。当激光器工作在单纵模状态下,只有 一个探测器能探测到光信号。采集到的信号中包含 直流和交流分量,交流分量即光强受回馈镜调制的 类余弦波动。首先,采用低通滤波去除交流分量;第二, 将直流分量放大后与预设的参考电压进行比较,第三, 得到的电压差值经比例积分微分 (PID) 环节后,与 555 定时器产生的标准三角波信号同时输入电压比 较器,输出脉冲宽度调制(PWM)信号;最后,当激光 器的光强信号偏离参考电压时, PWM 信号控制光耦 使电阻丝加热,以调节激光器的腔长来改变其输出 强度,使输出光强重新稳定在参考电压处,实现测量 系统的长期稳定工作。当激光器处于双纵模工作状 态时, 探测器 D<sub>3</sub> 和 D<sub>4</sub> 均能采集到光强信号, 根据 He-Ne 激光器增益曲线的特点, 双模共存的两路光 信号加和幅值小于单纵模时的光强值,即偏离预设 的单纵模参考电压,此时系统会循环上述稳频过程。 不同相位延迟的双折射元件会引起不同的偏振跳 变,偏振跳变点的变化会引起 D<sub>3</sub>、D<sub>4</sub> 各自接收到的 光强信号经交流滤波后直流电压的变化,但两路信 号加和后直流电压波动在毫伏量级,对稳频电路的 影响可以忽略。需要注意的是,为避免电阻丝通断电 过程中电感效应对控制信号的干扰,PWM 信号应先 控制光耦的通断,而电阻丝的通断由光耦来控制。稳 频效果如图 6 所示。



(a) Without frequency stabilization in 5 hours



Fig.6 Laser intensity test results

图6(a)为激光器未稳频的光强信号,激光管由于 温度变化剧烈,腔长伸缩明显,激光器不断发生跳模 现象并始终工作在双纵模状态。图 6(b)为稳频后的 光强信号,施加稳频 10 min 后,PWM 信号通过不断 调控电阻丝加热,使激光器保持单纵模输出。

利用 HighFinesse 公司的 WS7-60 型高精度波长 计对稳频后的激光器频率漂移进行了检测,如图 7 所示,5 h 的频率稳定度达到 1.7×10<sup>-7</sup>。

综上所述,运用该稳频技术能够长时间维持激

光器的单纵模输出,有效提高了频率稳定度和测量 系统的稳定性。



### 3 元件双折射测量结果及分析

波片作为双折射元件应用于各种光学精密器件和测量场合中。为验证该系统的测量精度和可靠性,文中对曲阜师范大学加工的一套9级标准石英波片进行了测量,测量结果与激光频率分裂法<sup>[24]</sup>(国家标准 GB/T 26827-2011)的结果进行了对比,结果如表1所示。

# 表1 标准波片测量结果对比 Tab.1 Contrast results of standard wave plates

Wave plate number	Laser feedback/ (°)	Frequency splitting/(°)	Difference/(°)
1	16.48	16.42	0.06
2	27.93	27.89	0.04
3	46.37	46.59	0.22
4	71.44	71.61	-0.17
5	79.15	78.95	0.20
6	96.95	97.19	-0.24
7	128.83	128.97	-0.14
8	138.00	138.19	-0.19
9	140.44	140.20	0.24
10	157.21	157.09	0.12

从表1可以看出,该系统的测量精度优于 0.24°,可以满足波片精确测量的要求。

TGG 晶体由于其磁光常数大、透射损耗低等特性, 广范使用在法拉第旋光器和隔离器<sup>[25]</sup>等器件中。 若材料的内应力过大, 就会影响 TGG 晶体的质量和 使用。该系统可实现对光学元件微小应力的测量。研 究中待测样品为中国科学院高能物理研究所提供的 TGG 晶体,为验证系统的重复性,对晶体样品进行 了多次测量,将稳频前后的数据做对比,结果如图 8 所示。



Fig.8 Repeatable measurement results of TGG crystal

从图 8 中可以看出,稳频前重复测量最大偏差 0.3°,标准差为 0.22°,稳频后最大偏差 0.13°,标准 差为 0.06°。经过稳频有效提高了系统的稳定性和 重复性,为 TGG 晶体的制备和应用提供了有力的检 测手段。

需要指出的是,材料的内应力正比于相位延迟 的大小,文中用相位延迟来表征内应力大小。

#### 4 结 论

文中基于激光回馈效应构建了双折射回馈测量系统,该系统具有结构简单、操作简便等优点,被测样品无需做镀膜、测角等其他处理,可以实现高精度、实时的双折射在线测量。通过引入稳频技术,使激光器长期稳定工作在单纵模状态,提高了激光回馈双折射

测量系统的稳定性。对波片和 TGG 晶体的测量结果表明,该系统测量精度优于 0.24°,重复测量的标准差为 0.06°,具有光明的推广前景和较大的发展潜力。

#### 参考文献:

- Li Jingzhen. Handbook of Optics[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2010: 1181-1201. (in Chinese)
- [2] Kliger D S, Lewis J W. Polarized Light in Optics and Spectroscopy[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 39–52.
- [3] Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong, et al. Influence of mounting stress on wavefront distortion of lithographic object lens[J]. Chinese Optics, 2013, 6(1): 57-63. (in Chinese)
- [4] Zhang P, Tan Y D, Liu W X, et al. Methods for optical phase retardation measurement: a review [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(5): 1155-1163.
- [5] Grunstra B R, Perkins H B. A method for the measurement of optical retardation angles near 90°[J]. Appl Opt, 1966, 5 (4): 585-587.
- [6] Zhang Zhiyong, Deng Yuanyong, Wang Dongguang, et al. Comparison and analysis of several methods for measuring waveplate retardation [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(11): 1678-1685. (in Chinese)
- [7] Yang Kun, Wang Xiangzhao, Bu Yang. Research progress of ellipsometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44
  (3): 43-49. (in Chinese)
  杨坤, 王向朝, 步扬. 椭偏仪的研究进展[J]. 激光与光电子
  学进展, 2007, 44(3): 43-49.
- [8] Aouadi S M, Mihut D M, Kuruppu M L, et al. Spectroscopic ellipsometry measurements of chromium nitride coatings [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2001, 19(6): 2800-2804.
- [9] Hayden J E, Jacobs S D. Automated spatially scanning ellipsometer for retardation measurements of transparent materials[J]. Applied Optics, 1993, 32(31): 6256-6263.
- [10] Yang S, Zhang S. The frequency split phenomenon in a HeNe laser with a rotational quartz plate in its cavity [J].
   Optics Communications, 1988, 68(1): 55-57.
- [11] Liu W, Liu M, Zhang S. Method for the measurement of phase retardation of any wave plate with high precision [J].
   Applied Optics, 2008, 47(30): 5562-5569.
- [12] Zhang Shulian. The Principle of Orthogonal Polarized Laser[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [13] Zhang S, Holzapfel W. Orthogonal Polarization in Lasers: Physical Phenomena and Engineering Applications [M]. New

York: John Wiley & Sons, 2013.

- [14] Tan Y, Zhang S, Zhang Y. Laser feedback interferometry based on phase difference of orthogonally polarized lights in external birefringence cavity [J]. Optics Express, 2009, 17 (16): 13939-13945.
- [15] Liu G, Zhang S, Zhu J, et al. Theoretical and experimental study of intensity branch phenomena in self - mixing interference in a He - Ne laser [J]. Optics Communications, 2003, 221(4): 387-393.
- [16] Groot P J, Gallatin G M, Macomber S H. Ranging and velocimetry signal generation in a backscatter -modulated laser diode[J]. Applied Optics, 1988, 27(21): 4475-4480.
- [17] Li J, Tan Y, Zhang S. Generation of phase difference between self-mixing signals in a-cut Nd: YVO<sub>4</sub> laser with a waveplate in the external cavity [J]. Optics Letters, 2015, 40 (15): 3615-3618.
- [18] Zhang P, Tan Y D, Liu N, et al. Phase difference in modulated signals of two orthogonally polarized outputs of a Nd: YAG microchip laser with anisotropic optical feedback [J]. Optics Letters, 2013, 38(21): 4296–4299.
- [19] King P G R, Steward G J. Metrology with an optical maser [J]. New Sci, 1963, 17(180): 14.
- [20] Li Jiyang, Tan Yidong, Wu Ji, et al. Birefringence measurement of liquid crystals based on laser feedback effect
   [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 0306003. (in Chinese)
- [21] Zhou Lufei. Research on realization of orthogonally polarized modes and high resolution displacement measurement based on optical feedback in He-Ne lasers [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [22] Tian Zhenguo, Zhang Li, Zhang Shulian. Isocandela points frequency stabilization in He-Ne Zeeman-birefringence dualfrequency lasers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 0505001. (in Chinese)
- [23] Zeng Zhaoli, Zhang Shulian. Dynamic modulation frequency stabilization technology in laser strong optical feedback system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (5): 1402-1407. (in Chinese)
- [24] GB/T 26827 -2011. Calibration method for measurement equipment of wave plate phase retardation [S], 2011. (in Chinese)
- [25] Long Yong, Shi Zibin, Ding Yutong, et al. Growth and characterization of large-size Terbium Gallium Garnet single crystal [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2016, 38 (3): 433-436. (in Chinese)