

激光器内腔频差对双折射外腔激光回馈系统输出影响的理论及实验研究

牛海莎 祝连庆 宋建军 董明利 娄小平

Theoretical and experimental research on influence of cavity frequency difference in birefringent laser feedback system

Niu Hai-Sha Zhu Lian-Qing Song Jian-Jun Dong Ming-Li Lou Xiao-Ping

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 154201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180230

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180230>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[考虑探测器 \$\gamma\$ 特性的光电偏振成像系统偏振信息重构方法](#)

A new algorithm for polarization information restoration with considering the γ property of optoelectronic polarimeter

物理学报.2016, 65(9): 094201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094201>

[浑浊介质中图像对比度与成像方式的关系](#)

Image contrast for different imaging methods in turbid media

物理学报.2016, 65(8): 084201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084201>

[基于可调谐复振幅滤波器的超长焦深矢量光场](#)

The focused vectorial fields with ultra-long depth of focus generated by the tunable complex filter

物理学报.2016, 65(4): 044202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044202>

[基于光学全息的任意矢量光的生成方法](#)

Generation of arbitrary vector beam based on optical holography

物理学报.2015, 64(12): 124202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124202>

[基于扭曲向列液晶空间光调制器的矢量光生成](#)

Generation of vector beams in terms of the partial light modulator of a twisted nematic liquid crystal

物理学报.2015, 64(11): 114204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114204>

激光器内腔频差对双折射外腔激光回馈系统输出影响的理论及实验研究*

牛海莎¹⁾ 祝连庆^{1)†} 宋建军²⁾ 董明利¹⁾ 娄小平¹⁾

1) (北京信息科技大学, 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

2) (清华大学, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

(2018年1月30日收到; 2018年4月1日收到修改稿)

玻璃材料的内应力关系及所在系统的稳定性、安全性和可靠性, 是精密加工领域的重要问题. 基于双折射外腔激光回馈效应的应力测量技术以其先进新颖的测量原理受到普遍关注. 传统理论普遍认为双折射回馈系统中激光器的输出相位仅由外腔相位延迟决定, 而将测量误差归因于外腔镜的非线性运动. 本文结合正交偏振激光原理和三镜腔等效模型, 测量了激光器的内腔双折射引起的频差大小, 进行了频率调谐回馈实验, 并根据结论计算了内腔频差对外腔相位延迟测量结果的影响, 发现激光器的输出相位由外腔相位延迟、内腔频差、外腔长度共同决定. 本文总结了内腔和外腔各向异性共同作用下激光器正交偏振态的相位特性, 补充了激光回馈的物理内容, 对于应力-双折射、位移、距离等重要参量的精确测量, 都具有重要指导意义.

关键词: 内腔频差, 双折射, 回馈, 相位差

PACS: 42.25.Ja, 42.25.Lc, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.67.20180230

1 引言

玻璃材料的内应力直接影响玻璃零件加工质量和光学器件使用寿命, 更是关系整体系统性能、安全性和可靠性的重要因素, 在航空航天^[1]、精密光学系统^[2]、精密加工^[3]等领域普遍引起了高度重视. 对于精密成像系统中的玻璃材料而言, 内应力的存在会导致其光学性能下降而直接降低成像质量^[4]; 作为大功率固体激光器的增益介质时, 玻璃材料中的应力不但直接影响输出光的偏振态^[5], 更会缩短激光器的使用寿命; 而飞行器挡风玻璃、建筑物玻璃幕墙等承力玻璃中的应力集中, 更会由于机械性能的降低而引发爆裂等严重事故. 因此, 高灵敏度、大测量范围的应力检测技术已经成为当前的研究热点.

目前常见的应力测量方法有X射线衍射法^[6,7]、钻孔法^[8]、干涉色法^[9]、旋转消光法^[10]

等. 其中, X射线衍射法利用X射线在物质中的衍射效应进行物质结构分析^[11], 能够通过物质内部结构应变获得应力大小, 但是X射线发生器价格昂贵, 多用于金属探伤等领域; 钻孔法是在二维应力平面上钻孔, 并通过应力释放过程中孔周围的应变计获得应力的大小, 具有破坏性; 光学方法由于非接触、无损、高精度等优点, 在透光材料的应力测量中占主要地位. 对于应力分布定性检测, 干涉色法可以满足应用; 但对于精密光学系统中的玻璃材料, 应力引起的双折射值一般非常小, 需要定制高灵敏度的旋转消光应力仪. 一般而言, 旋转消光应力仪的测量范围在零到几十纳米, 测量范围增大则成本相应大幅提高.

激光回馈双折射测量系统由于结构简单、紧凑、测量精度高并且最有望实现应力在线测量^[12]而获得了广泛关注. 其基本原理是激光器的输出光经过二维应力平面, 由外部反射面将光束原路返回

* 教育部长江学者与创新团队发展计划(批准号: IRT_16R07)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhulianqing@sina.com

谐振腔内, 携带应力双折射信息的回馈光对激光器的输出进行调制, 使激光器的正交本征模式发生交替振荡, 通过解调正交方向光强的相位信息, 可获得应力所致双折射大小. 然而, 激光器输出正交偏振激光是由于自身的残余应力导致内腔具有一定的双折射, 是测量信号的产生基础, 而激光器内腔双折射对整个回馈应力测量系统的影响分析尚未见报道. 本文结合正交偏振激光原理^[13]和三镜腔等效模型^[14-16], 测量激光器的内腔双折射引起的频差大小, 进行了频率调谐回馈实验, 并根据实验结论计算了内腔频差对外腔相位延迟测量结果的影响. 本文总结了内腔和外腔各向异性共同作用下激光器正交偏振态的相位特性, 补充了激光回馈的物理内容, 对激光回馈双折射测量系统^[17]的性能提高具有重要意义.

2 实验及理论分析

2.1 激光回馈双折射测量系统

双折射外腔激光回馈系统设置如图 1 所示. T 为氦氖激光器增益管, 内充氦氖混合气体, 充气比

例为 $\text{He}^3 : \text{Ne}^{20} : \text{Ne}^{22} = 9 : 0.5 : 0.5$; 凹面反射镜 M_1 和平面输出镜 M_2 构成激光器的谐振腔, 其反射率分别为 99.6% 和 99%; 激光器输出单纵模, 线偏振光, 中心波长为 632.8 nm; M_3 为外部反射镜, 反射率约 10%, 与 M_2 构成回馈外腔. 其中, 激光器谐振腔与外腔的长度均为 150 mm. 平面输出镜 M_2 固定在压电陶瓷 PZT_1 上, PZT_1 通过微调腔镜的位置改变激光器的纵模在增益曲线上的位置, 从而实现频率控制; M_3 固定在压电陶瓷 PZT_2 上, 可通过对 PZT_2 加电压的方式调谐外腔的长度.

激光器尾端输出由分光镜 BS_1 分成两束光, 一束照射到光电探测器 D_1 上用以观测输出光强的变化; 一束经过偏振片 P_2 照射到光电探测器 D_2 上, 且 P_2 的通光方向垂直于激光器初始偏振方向, 因此 D_2 可探测偏振态的变化. 输出端的光被 BS_2 分为两束, 一束入射扫描干涉仪 SI , SI 连接示波器观察激光器的纵模; 一束通过偏振片 P_1 对偏振态正交的光进行拍频, 并通过频谱仪读取拍频数据. 计算机通过采集卡采集 D_1 和 D_2 探测的光强, 并输出不同形式的电压对压电陶瓷进行驱动.

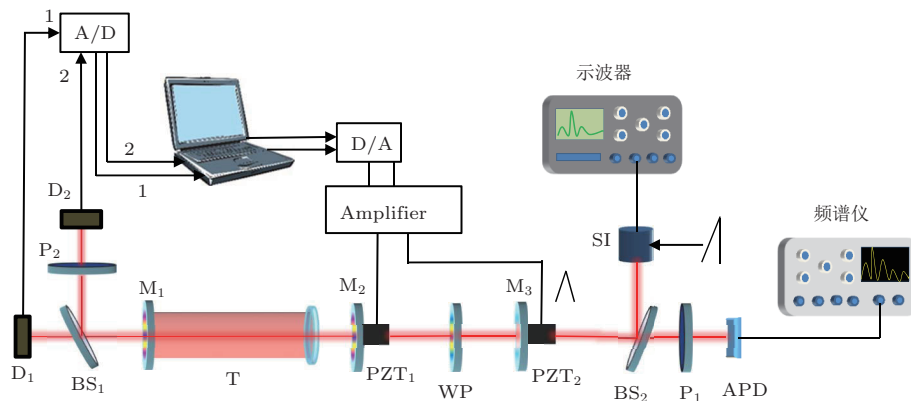


图 1 实验系统

Fig. 1. Experimental system.

2.2 激光器内腔残余应力导致的频差测定

激光器中存在制作过程中产生的残余应力, 会使其同级纵模产生频差. 由于该频差值在频率分裂阈值以内, 故不能直接通过拍频的方式观察到. 但是, 通过比较激光器的相邻纵模间隔, 可以间接获得激光器的内腔频差.

如图 2 所示, ω 为激光角频率, 激光器的内腔频差为 $d\omega$, 每一个级次的纵模仅有一个偏振态可以起振, 且相邻级次纵模的偏振态是互相正交的. 因

此, 设第 m 级纵模的平行光起振, $m - 1$ 级和 $m + 1$ 级纵模均为垂直光起振. $m - 1$ 级、 m 级、 $m + 1$ 级起振纵模的纵模间隔分别为 Δ_1 和 Δ_2 , 相邻垂直光或平行光的纵模间隔为 Δ , 则根据图 2 中所示三者关系为

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta_1 - d\omega = \Delta_2 + d\omega \rightarrow d\omega \\ &= \frac{1}{2}(\Delta_1 - \Delta_2). \end{aligned} \quad (1)$$

由 (1) 式可知, 相邻纵模间隔差值的二分之一即为激光器内腔双折射引起的频差. 对 PZT_1 施加

电压微调谐振腔,使激光器的纵模按级次列队扫过出光带宽,相邻纵模间隔的拍频由雪崩光电二极管APD探测,经频谱仪读出分别为862.5 MHz和872.5 MHz.由(1)式可知,激光器由于自身残余应力的存在,具有5 MHz的频差.为分析内腔频差对双折射回馈系统的影响,接下来进行调频激光器回馈实验.

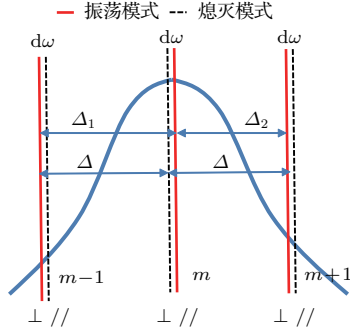


图2 激光器增益曲线与纵模间隔示意图
Fig. 2. Diagram of gain curve and longitudinal mode interval of laser.

2.3 调频光回馈现象及理论分析

向PZT₁施加三角波电压V₁,对激光器的内腔腔长进行连续调谐,使激光器的纵模扫过出光带宽的同时,对压电陶瓷PZT₂施加三角波电压V₂调谐外腔的长度.为通过不同调谐周期区分内腔和外腔的调谐曲线,将V₂的频率设为V₁的25倍. D₁探测到激光器的输出曲线如图3所示,内腔的调谐频率低,因此低频包络是由内腔的调谐产生,蓝色箭头指示部分为一个调谐周期,对应谐振腔长的二分之一波长变化;高频波动是外腔调谐产生的,图中蓝色箭头所示为一个调谐周期,对应外腔腔长二分之一波长的变化.由此可见,激光器输出调谐曲线的相位由内腔和外腔共同决定,下面进行理论分析.

根据三镜腔等效模型,将回馈镜M₃和腔镜M₂等效为一个腔镜M_{eff},则等效腔镜的反射系数为[18]

$$r_{\text{eff}} = r_2 [1 + \kappa \exp(-j\omega\tau_{\text{ext}})], \quad (2)$$

式中,ω为激光角频率;r₂为腔镜M₂的反射率;τ_{ext}为光在外腔往返一周的时间;κ为等效光回馈系数,

$$\kappa = (1 - r_2^2)r_3/r_2, \quad (3)$$

其中,r₃为腔镜M₃的反射率.根据激光器的自洽要求,有

$$r_1 r_{\text{eff}} \exp[j\omega\tau_0 + 2(g - \alpha)d] = 1, \quad (4)$$

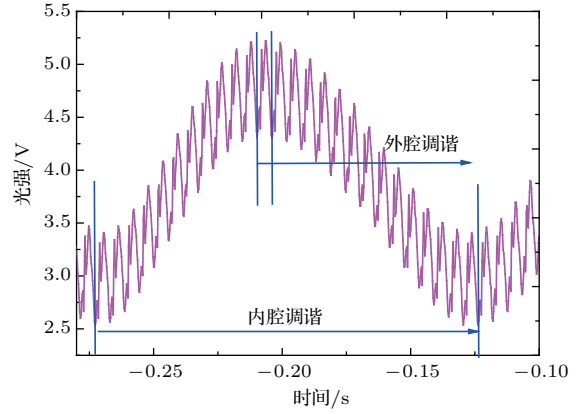


图3 调频光回馈实验曲线
Fig. 3. Experimental curve of frequency-modulated optical feedback.

式中,r₁为腔镜M₁的反射率,g为光回馈下的阈值增益,τ₀为光在内腔往返一周的时间,α为内腔吸收损耗,d为激光器毛细增益管的长度.根据自洽要求,在不存在光回馈的情况下,有

$$r_1 r_2 \exp[j\omega_0\tau_0 + 2(g_0 - \alpha)d] = 1, \quad (5)$$

式中,r₂为腔镜M₂的反射率;g₀和ω₀分别是激光器没有光回馈时的阈值增益和角频率.比较(4)和(5)式,激光器的增益在弱回馈和无光回馈情况下的增益变化Δg为

$$\Delta g = g - g_0 = -\frac{\kappa}{d} \cos(\omega_0\tau_{\text{ext}}). \quad (6)$$

又因为激光强度正比于Δg,则回馈系统中激光器的输出光强可以表示为

$$I = I_0(1 - k\Delta g) = I_0 + \xi \cos(\omega\tau_{\text{ext}}), \quad (7)$$

其中,k和ξ分别为增益相关常数.因此,当同时改变内腔的频率和外腔的长度时,激光器的输出相位变化为

$$\varphi = d(\omega\tau_{\text{ext}}) = d\omega \cdot \tau_{\text{ext}} + \omega \cdot d\tau_{\text{ext}}. \quad (8)$$

当外腔中存在双折射元件时,设双折射元件的厚度为x,沿o光和e光方向的折射率分别为n_o和n_e,则dτ_{ext}可表示为

$$d\tau_{\text{ext}} = \frac{2 \cdot |n_o - n_e|x}{c}, \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式有

$$\begin{aligned} \varphi &= d(\omega\tau_{\text{ext}}) = d\omega \cdot \tau_{\text{ext}} + 2\omega \cdot \frac{|n_o - n_e|x}{c} \\ &= d\omega \cdot \tau_{\text{ext}} + 2\sigma, \end{aligned} \quad (10)$$

其中,σ为外腔的双折射元件引起的相位延迟.可见当外腔中存在双折射元件时,激光器正交偏振光

调谐曲线相位差由外腔的相位延迟 σ 、内腔的频差 $d\omega$ 及激光在外腔往返一周的时间 τ_{ext} 共同决定.

2.4 双折射外腔回馈实验

为验证以上理论, 将标准零级四分之一波片 WP (Thorlabs WPQ10 M-633, 频率分裂法^[19]检测其加工精度优于 0.05° , 零级波片的相位延迟对激光的入射角度和外界温度不敏感) 放入回馈系统的外腔中, 且波片的光轴平行于激光器的初始偏振方向. 偏振片 P_2 的通光方向与初始偏振方向垂直, 因此一开始 D_2 探测不到光强. 保持激光器的纵模在增益曲线的中心频率处, 在 PZT_2 上施加三角波电压对外腔长进行调谐, 得到激光器的输出曲线如图4所示. 图4中曲线光强(1)由 D_1 探测得到, 为激光器的输出光强曲线, AC 为一个调谐周期; 图4中曲线偏振态(2)由 D_2 探测得到, 为激光器输出光强经过偏振片滤光之后得到的偏振态变化曲线. 由于激光器的输出光为正交偏振状态, D_2 探测到的信号在“有光、无光”之间跳转, 说明激光器的输出偏振态在一个调谐周期之中发生了跳变, 跳变点为 B , 其中 AB 为 o 光振荡, BC 为 e 光振荡; o 光和 e 光的调谐曲线出现相位差 φ ; 图4中曲线 PZT_2 电压(3)为对压电陶瓷施加的三角波电压. 根据前节的论述, o 光和 e 光的相位差 φ 由三个因素共同决定, 即外腔相位延迟 σ 、内腔频差 $d\omega$ 和外腔长度 L_{ext} .

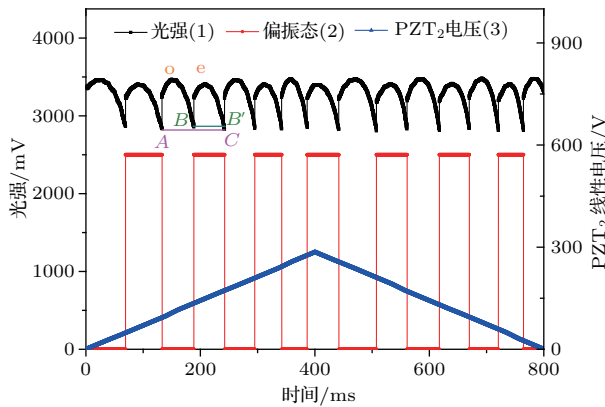


图4 外腔四分之一波片回馈实验曲线

Fig. 4. Experimental curves of quarter-wave plate external cavity feedback.

将 $L_{\text{ext}} = 150 \text{ mm}$, $d\omega = 5 \text{ MHz}$, $\sigma = 90^\circ$ 代入(10)式, 得到 o 光和 e 光的理论相位差为

$$\varphi = d\omega \cdot \tau_{\text{ext}} + 2\sigma = 180.573^\circ. \quad (11)$$

再对实验获得的 o 光和 e 光调谐曲线相位差进行计算. 如图4所示, 一个调谐周期为 AC , 偏振态跳变位置为 B , B' 为 e 光调谐曲线上与 B 点等高的点, 则 o 光和 e 光的相位差可表示为

$$\varphi = \frac{BB'}{AC} \times 360^\circ. \quad (12)$$

通过对不同周期的调谐曲线相位差进行计算, 并取平均得 o 光和 e 光相位差大小为 180.617° , 理论分析与实验结果符合. 因此, 对于内腔存在残余应力的激光器搭建的各向异性外腔回馈系统, 调谐曲线 o 光和 e 光的相位差并不等于外腔相位延迟的两倍^[20], 而是由外腔相位延迟、内腔频差、外腔长度共同决定. 在系统设计中, 必须考虑激光器的内腔频差和外腔长度, 校准 $d\omega \cdot \tau_{\text{ext}}$ 项以提高系统精度.

3 结 论

传统理论普遍认为双折射回馈系统中激光器的输出相位差为外腔相位延迟的两倍, 通过这种关系测量得到的外腔相位延迟总是存在误差. 本文研究了激光器内腔双折射^[21]导致的频差对双折射外腔回馈的影响, 发现双折射外腔回馈系统两个正交偏振态的调谐曲线相位差不仅由外腔相位延迟决定, 还与激光器的内腔频差和外腔长度有关. 对于激光器内腔频差 5 MHz 、外腔长度 150 mm 的回馈系统, 由频差引入的相位差约为 0.573° . 激光器在内腔频差约 40 MHz ^[13]以下均可输出单纵模, 且实际系统设计时外腔长度一般大于 150 mm , 这两项参数引入的相位差是不可忽略的, 必须予以校准. 该研究结合正交偏振激光原理, 总结了内腔和外腔各向异性共同作用下激光回馈系统输出的相位特性, 不仅补充了激光回馈的物理内容, 对于应力-双折射、位移、距离等重要参量的精确测量^[22], 都具有重要指导意义.

参考文献

- [1] Findlay S J, Harrison N D 2002 *Mater. Today* **5** 18
- [2] Tomozawa M, Lezzi P J, Hepburn R W, Blanchet T A, Cherniak D J 2012 *J. Non-Cryst. Solids* **358** 2650
- [3] He D B, Kang S, Zhang L Y, Chen L, Ding Y J, Yin Q W, Hu L L 2017 *High Power Laser Sci. Eng.* **5** e1
- [4] Rawer R, Stork W, Spraul C W, Lingenfelder C 2005 *J. Cataract Refr. Surg.* **31** 1618
- [5] Zhu S S, Zhang S L, Liu W X, Niu H S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 064201 (in Chinese) [朱守深, 张书练, 刘维新, 牛海莎 2014 物理学报 **63** 064201]

- [6] Okoro C, Levine L E, Xu R 2014 *IEEE Trans. Electron Dev.* **61** 2473
- [7] Vourna P, Hervoches C, Vrána M 2015 *IEEE Trans. Magn.* **51** 6200104
- [8] Chupakhin S, Kashaev N, Huber N 2016 *J. Strain Anal. Eng. Des.* **51** 572
- [9] Montalto L, Paone N, Rinaldi D, Scalise L 2015 *Opt. Eng.* **54** 081210
- [10] Nagib N N, Bahrawi M S, Ismail L Z, Othman M H, Abdallah A W 2015 *Opt. Laser Technol.* **69** 77
- [11] He J S, Zhang M, Zou J J, Pan H Q, Qi W J, Li P 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 216102 (in Chinese) [何菊生, 张萌, 邹继军, 潘华清, 齐维靖, 李平 2017 物理学报 **66** 216102]
- [12] Zhu K Y, Guo B, Lu Y Y, et al. 2017 *Optica* **4** 729
- [13] Yang S, Zhang S 1988 *Opt. Commun.* **68** 55
- [14] Wang W M, Boyle W J O, Granttan K T V, Palmer A 1993 *Appl. Opt.* **32** 1551
- [15] Zhang P, Tan Y D, Liu N, et al. 2013 *Opt. Lett.* **38** 4296
- [16] Zhang S H, Zhang S L, Sun L Q, et al. 2016 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28** 1593
- [17] Tan Y D, Zhang S L, Zhang S, et al. 2013 *Sci. Rep.* **3** 2912
- [18] Li J, Tan Y D, Zhang S L 2015 *Opt. Lett.* **40** 3615
- [19] Liu W X, Liu M, Zhang S 2008 *Appl. Opt.* **47** 5562
- [20] Niu H S, Niu Y X, Liu N, Liu W W, Wang C L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 084208 (in Chinese) [牛海莎, 牛燕雄, 刘宁, 刘雯雯, 王彩丽 2015 物理学报 **64** 084208]
- [21] Cen Z F, Li X T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5784 (in Chinese) [岑兆丰, 李晓彤 2010 物理学报 **59** 5784]
- [22] Huang K, Li S, Ma Y, Tian X, Zhou H, Zhang Z Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 064205 (in Chinese) [黄科, 李松, 马跃, 田昕, 周辉, 张智宇 2018 物理学报 **67** 064205]

Theoretical and experimental research on influence of cavity frequency difference in birefringent laser feedback system*

Niu Hai-Sha¹⁾ Zhu Lian-Qing^{1)†} Song Jian-Jun²⁾ Dong Ming-Li¹⁾ Lou Xiao-Ping¹⁾

1) (School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

2) (State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 30 January 2018; revised manuscript received 1 April 2018)

Abstract

The internal stress of glass material directly affects the processing quality of glass components and the service life of optical components. It is an important factor that relates to the overall system performance, safety, and reliability. Aerospace, precision optical systems, precision machining and other areas generally highly value the stress measurements of glass components. For example, the internal stress in the medium-glass material of precision imaging system will lead to the degradation of optical performance and reduce the image quality; the stress in the glass material used as the gain medium of high-power solid-state lasers not only directly affects the polarization state of the output light, but also shortens the service life of the laser; the stress concentration in the load-bearing glass of aircraft windshields, building glass curtain walls, etc., will cause serious accidents such as popping due to the reduction of glass mechanical properties. Therefore, the high sensitivity and large measurement range of stress detection technology has become a current research hotspot. Stress measurement techniques based on the birefringent external cavity laser feedback effect has received widespread attention due to its advanced and novel measurement principle. It is generally accepted in the traditional theory that the output phase of the laser in a feedback system is only determined by the phase retardation of birefringent element in an external cavity, and the measurement error is induced by the non-linear movement of external mirror. In this paper, the orthogonally polarized laser principle and the three-cavity equivalent model are combined to explain the influence of cavity frequency difference on the output of laser in feedback system. The frequency difference caused by the birefringence of the laser cavity is measured by comparing the intervals between adjacent longitudinal modes, and the frequency tuning feedback experiment is carried out. Theoretical analysis and experimental results show that the output phase of the laser is determined by the phase retardation of the external cavity, the frequency difference of the internal cavity, and the length of the external cavity. This conclusion is also confirmed by the measurement of the standard quarter wave plate. For a feedback system with an internal cavity frequency difference of 5 MHz and external cavity length of 150 mm, the phase difference induced by internal cavity frequency difference is about 0.573° . The laser can output a single longitudinal mode below 40 MHz of the internal cavity frequency difference, and the length of the external cavity is generally larger than 150 mm when the actual system is designed, so the phase difference introduced by these two parameters cannot be ignored and must be calibrated. This study summarizes the phase characteristics of the orthogonally polarized laser under the joint of anisotropy feedback cavity, supplements the physical content of the laser feedback, and has great significance for accurate laser measurement of stress-birefringence, displacement, and distance.

Keywords: cavity frequency difference, birefringence, feedback, phase difference

PACS: 42.25.Ja, 42.25.Lc, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.67.20180230

* Project supported by Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University, China (Grant No. IRT_16R07).

† Corresponding author. E-mail: zhulianqing@sina.com