

文章编号 1004-924X(2018)08-1954-06

基于傅里叶变换相位提取法的激光回馈应力测量系统

牛海莎¹, 祝连庆^{1*}, 刘 宁²

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;

2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 高端玻璃的内部应力精确测量关系其所在系统的安全性和可靠性。本文提出一种基于激光回馈效应的应力测量方法, 激光回馈系统由激光器和外部反射镜构成, 待测样品放置在回馈外腔中, 通过回馈光对激光器内部增益调制产生的偏振跳变现象提取双折射信息, 进而获得应力。首先, 从理论上分析了回馈系统中激光器输出的正交偏振模式相位与外腔应力双折射的关系; 接着, 通过傅里叶变换的方式得到双折射外腔激光回馈系统光强调谐曲线的相位信息; 然后, 采用标准四分之一波片对系统和算法的精度进行了测试。最后, 采用激光回馈系统对不同的飞机座舱有机玻璃样品内应力进行了测量, 并给出测量结果。实验结果表明: 该系统对应力的条纹数测量精度优于 8.3×10^{-4} , 满足高端玻璃的应力检测需求。

关键词: 精密测量; 激光回馈; 应力测量; 相位提取

中图分类号: O439; TH741 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20182608.1954

Laser feedback stress measurement system based on fourier transform phase extraction method

NIU Hai-sha¹, ZHU Lian-qing^{1*}, LIU Ning²

(1. *Institute of Instrument Science and Photoelectric Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;*

2. *Institute of Instrument Science and Photoelectric Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zhulianqing@sina.com*

Abstract: Accurate measurement of the internal stress in high-end glass relates to the safety and reliability of the system in which it is used. This paper proposes a stress measurement method based on the laser feedback effect. The laser feedback system consists of a laser and an external mirror. The sample to be measured is placed in the external cavity of the feedback system, and the polarization flipping of the laser induced by the gain modulation of feedback light is used to extract stress information. First, the relationship between the phase of the orthogonally polarized modes of the laser and the birefringence of the external cavity was theoretically analyzed. Next, the phase information of the orthogonally polarized tuning curve was obtained by Fourier transform. Then, the precision of the system and algorithm

收稿日期: 2018-04-16; 修订日期: 2018-05-15.

基金项目: 教育部“长江学者与创新团队发展计划”资助项目(No. IRT_16R07)

was tested using a standard quarter-wave plate. Finally, the laser feedback system was used to measure the internal stress in various aircraft cockpit plexiglass samples and measurement results are given. The experimental results show that the measurement accuracy of the system for fringe number is better than 8.3×10^{-4} , which meets the stress detection requirements of high-end glass.

Key words: precision measurement; laser feedback; stress measurement; phase extraction

1 引言

高端玻璃是航空航天、精密光学系统中的关键材料,其内部应力是关系整体系统性能、安全性和可靠性的重要因素。应力的危害首先表现在玻璃机械性能的降低,严重时会发生炸裂造成整个系统瘫痪^[1-2]。应力已引起多起航空有机玻璃炸裂事故,我国和欧美发达国家均有报道客机挡风玻璃破裂紧急返航或迫降的新闻,事故对乘机人员造成了极大的心理恐慌。长期以来为保障安全,航空有机玻璃通常选择定期更换的方式,既造成了资源浪费,又无法杜绝安全隐患。而且应力还会降低玻璃的光学性能。光学玻璃元件是观察显示、照相成像、测量瞄准、告警跟踪和精确制导等各种民用与军用仪器中的核心部件,而内应力的产生、叠加与释放可影响光学玻璃的光学均匀性和成像质量,进而影响光学系统的使用性能。对光学均匀性要求高和使用条件严苛的场合必须慎重考虑内应力的影响,例如,激光器元件中的残余应力是产生谐振腔各向异性的首要因素,会导致激光输出模式、频率和偏振特性的改变^[4];大口径天文望远镜镜片中的应力是诱使其形变、降低成像质量的主要原因;微光刻和激光镜头中,应力产生的双折射效应会导致严重的成像误差。因此,精确的内应力控制检测已成为关系整体系统成败的重要技术细节,研究一种能够检测玻璃内应力的测量技术,对降低事故概率、制造精密光学元件、提高光学系统性能具有重要意义。

材料内应力的测量方法可分为机械测量方法和物理测量方法两大类。机械测量方法起源于 19 世纪末期提出的“钻孔法”,即在应力平面钻孔,通过应力释放过程中孔发生的形变获得应力大小。后来学者们对这些机械测量方法进行了改进^[5],但破坏性测量限制了该方法在许多领域的应用。物理测量方法属于无损测量,典型的测量方法有 X 射线衍射法^[6-7]、简式偏光仪^[8], Senar-

mont 补偿法^[9-10]等。X 射线衍射仪价格昂贵,多用于测定物质的晶体结构及物相分析;简式偏光仪结构简单,但只能通过干涉色定性观察应力分布且无法察觉微小应力。近 20 年来,随着激光技术、机械制造水平的大幅提高,以 Senarmont 补偿法为基本原理研制的应力测量仪^[11]已经成为主流商用仪器,但是该仪器需要精密的光学元件及机械定位结构来保证测量精度,因此造价十分昂贵。

本文基于激光回馈效应提出一种玻璃内应力测量方法。该方法将待测应力元件置于回馈镜和激光器之间,在外腔长调谐的过程中,通过两个正交偏振态在一个调谐周期中的相位关系获得外腔中的应力。为提高系统的精度和抗干扰能力,采用傅里叶变换的方式得到了正交偏振态调谐曲线的基频分量相位信息,并根据拟合函数获得了相位差。实验证明,该方法有效消除了由正交偏振模式的增益差和外腔镜非线性运动产生的相位差,有效提高了系统精度。最后,通过该系统测量了 4 组不同有机玻璃样品并给出了测量结果。

2 激光回馈应力-双折射测量原理

2.1 应力光性定律

当处于无应力状态时,许多透明的非结晶材料是光学各向同性的;当处于受力作用时,就表现为光学各向异性,并且呈现出类似于晶体的特性。1953 年,麦克斯韦(J. C. Maxwell)揭示了材料双折射率变化与应力状态之间的关系,并实验证明:当光垂直入射二维应力模型中任意一点时,由于双折射效应,该点的主应力与主折射率之间有如下关系^[12]:

$$n_1 - n_0 = C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2, \quad (1)$$

$$n_2 - n_0 = C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2, \quad (2)$$

其中: n_0 为无应力时材料的折射率, n_1 为 σ_1 方向的折射率, n_2 为 σ_2 方向的折射率, C_1, C_2 为材料的应力光学系数。式(1)减去式(2)后得:

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (3)$$

设材料的厚度为 d , 偏振光通过应力材料后的光程差为:

$$\Delta = N\lambda = Cd(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (4)$$

其中: $C = C_1 - C_2$, λ 为偏振光波长, N 表示光程差为波长的 N 倍。令 $f_\sigma = \lambda/C$, 则有:

$$N = d(\sigma_1 - \sigma_2)/f_\sigma, \quad (5)$$

其中: f_σ 称为材料条纹值, 在材料弹性范围内为常数, 单位为 N/mm 。

2.2 双折射外腔激光回馈效应

当外腔中放置各向异性元件时, 弱回馈条件下激光输出幅值变化和偏振跳变现象可用三镜腔模型分析^[13-14], 其核心思想在于: 将回馈外腔对输出的影响转化为激光器腔镜的反射率变化。模型的表达式为^[15]:

$$E = R_1^{1/2} R_2^{1/2} E e^{2kl} \cdot e^{2gl} + (1 - R_2) R_c^{1/2} R_1^{1/2} e^{2k(L+D)} E e^{2gl}, \quad (6)$$

其中: E 为激光器的输出光电场, R_1 与 R_2 为内腔镜的反射率, R_c 为回馈镜的反射率, L 为激光器的内腔长度, l 为外腔长度, g 为激光增益系数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光输出波长。激光输出强度可表示为:

$$I = I_0 - \frac{R_c^{1/2}}{R_2^{1/2}} (1 - R_2) \cos(2kl), \quad (7)$$

其中: I 为回馈条件下激光器的输出光强, I_0 为无回馈条件下的输出光强。公式(6)可写为:

$$E = R_1^{1/2} e^{2kl} \cdot e^{2gl} E [R_2^{1/2} + (1 - R_2) R_c^{1/2} e^{2kl}] = R_1^{1/2} R_{\text{eff}}^{1/2} e^{2kl} \cdot e^{2gl} E, \quad (8)$$

其中: $R_{\text{eff}} = [R_2 + 2(1 - R_2) R_c^{1/2} \cos(2kl)]$, 为激光器腔镜 M_2 和回馈镜 M_E 的等效腔镜的反射率。此处将具有二维应力的有机玻璃等效为晶体, 且有 $n_1 < n_2$, 激光器的初始偏振方向为 X 方向, σ_1 方向平行于初始偏振方向, 由于二维应力有机玻璃在 X 方向和 Y 方向的折射率不同, 因此一个几何外腔长分裂为两个物理外腔长, 分别为:

$$\begin{aligned} l_x &= l + (n_1 - n_{\text{air}})d, \\ l_y &= l + (n_2 - n_{\text{air}})d, \end{aligned} \quad (9)$$

其中: d 为有机玻璃的厚度, n_{air} 为空气折射率。因此, 等效腔镜在 X 向和 Y 向的反射率分别为:

$$\begin{aligned} R_{\text{eff}}^X &= R_2 + 2(1 - R_2) R_c^{1/2} R_2^{1/2} \cos\left\{\frac{4\pi}{\lambda}[l + (n_1 - n_{\text{air}})d]\right\} \\ R_{\text{eff}}^Y &= R_2 + 2(1 - R_2) R_c^{1/2} R_2^{1/2} \cos\left\{\frac{4\pi}{\lambda}[l + (n_2 - n_{\text{air}})d]\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

由于有效增益正比于等效反射率, 激光器的输出光强是在一个固定直流分量上, 叠加了一个余弦分量, 且由式(11), X 向和 Y 向的调谐曲线相位差可表示为:

$$\alpha = \frac{4\pi d}{\lambda} (n_2 - n_1) = 2\varphi, \quad (11)$$

其中 φ 为双折射引起的位相延迟。又有 $n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2)$, 通过式(5)可得:

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \frac{\varphi f_\sigma}{2\pi d}, \quad (12)$$

其中 $\sigma_1 - \sigma_2$ 即为激光所穿过点的主应力差。

在上述模型中, 两个偏振光的输出强度均被外腔长调制, 强度互相转移, 如图 1(a) 所示。对于任一外腔长度来说, 均只有一个模式起振。当某一偏振态外腔相位为 0 时, 偏振态发生跳转, 如图 1(a) 中标识的位置, A 点为 X 偏振态消失、跳变至 F 点 Y 偏振态的时刻, 一个完整的外腔调谐周期应为 $C-A-F-B-D$, 如图 1(b) 所示。

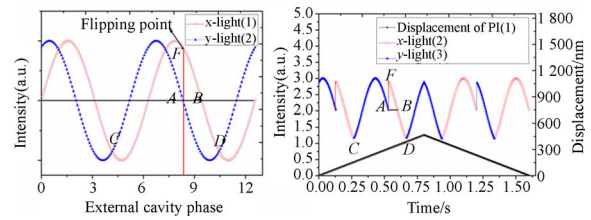


图 1 激光回馈系统输出调谐曲线

Fig. 1 Output tuning curve of laser feedback system

3 测量实验与结果

3.1 测量系统的搭建

激光回馈内应力测量装置如图 2 所示。测量装置光源为半外腔、单模、线偏振氦氖激光器, 初始偏振方向为 X 方向。激光的传播方向沿 Z 方向, 波长为 632.8 nm , 充气比例为 $\text{He} : \text{Ne} = 9 : 1$ 和 $\text{Ne}^{20} : \text{Ne}^{22} = 1 : 1$ 。激光腔由反射率为 99.8% 的高反镜 M_1 、 98.8% 的高反镜 M_2 组成, 激光器腔长为 150 mm 。压电陶瓷 PZT_1 (PI , P-010.05H) 与腔镜 M_2 粘连, 用于微调内腔长度, 稳定激光器偏振态; 回馈外腔由 M_3 、 M_2 组成, 长度为 100 mm , 待测样品 S 放于回馈外腔中, 材料为内部具有应力的有机玻璃, 且内应力主轴 σ_1 平行于初始偏振方向。回馈镜 M_3 的反射率为 15% , 使激光沿原路返回谐振腔内部。 P 为偏振

片,通光方向平行于 Y 方向。D₁ 探测激光器的输出光,D₂ 探测激光器输出光的偏振状态变。

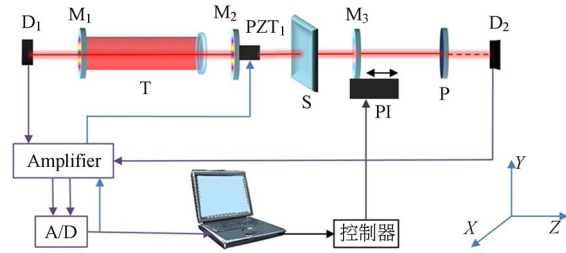


图 2 激光回馈测量系统

Fig. 2 Laser feedback measurement setup

PI 公司的高精度微位移台作为位移执行器驱动回馈镜 M₃ 往复运动扫描回馈外腔,微位移台的型号为 P-620.1CL,整个行程为 50 μm,闭环分辨率为 0.2 nm,开环分辨率为 0.1 nm,精度优于 1 nm,闭环位移线性度优于 99.8%。令 PI 微位移台沿正向和反向分别移动,扫描回馈外腔,得到的腔调谐曲线如图 3 所示。

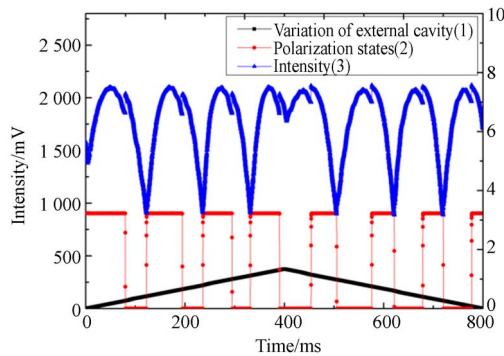


图 3 腔调谐曲线

Fig. 3 Cavity modulated curves

由图 3 可以看出,光强调谐曲线在一个调谐周期的某一时刻发生了变化,且偏振态曲线显示,光强调谐曲线的“凹陷”左侧偏振片透光,说明激光器的输出偏振方向与通光方向平行;“凹陷”右侧偏振态信号跳变为“0”,说明激光器的输出偏振方向垂直于通光方向,因此偏振态曲线呈方波形态,且方波的每一个上升沿或下降沿均为偏振态发生跳变的时刻。实验结果与理论分析一致。

3.2 信号处理与精度测试

根据式(11),双折射引起的相位延迟可以通过 X 偏振态和 Y 偏振态调谐曲线之间的相位差获得。参见图 1(a)和图 1(b),当外腔长均匀变化

时,两偏振态调谐曲线的相位差可通过时间间隔比较法计算:

$$\alpha = 2\varphi = \frac{AB}{CD} \times 2\pi, \quad (13)$$

其中 AB 和 CD 分别为两点之间的时间间隔。但是,通过观察图 3 的实验曲线可以发现,两偏振态的调谐曲线峰值并不相等,这是由于激光器正交方向的增益略有差别造成的,这种情况下采用时间比较法会引起较大的误差。并且,采用时间间隔比较法对环境的稳定性要求非常高,外腔纳米级的扰动叠加在调谐信号上,都会产生不容忽视的误差。因此,本文采用傅里叶变换的方式获得正交偏振调谐曲线不同频率分量的相位信息,并由此提取信号的相位差。将偏振方向正交的调谐曲线用沃拉斯顿棱镜进行分光后分别探测,对光强调谐曲线中的 $I_X(t)$, $I_Y(t)$ 进行傅里叶变换,得到:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[I_X(t)] &= a_x + c_{x1} \sin(\omega t + \theta_{x1}) + c_{x2} \sin(2\omega t + \theta_{x2}) + \dots \\ \mathcal{F}[I_Y(t)] &= a_y + c_{y1} \sin(\omega t + \theta_{y1}) + c_{y2} \sin(2\omega t + \theta_{y2}) + \dots \end{aligned} \quad (14)$$

由于回馈镜由高精度微位移台驱动,位移曲线具有良好的线性度,因此调谐曲线周期近似相等,基频分量 $c_1 \sin(\omega t + \theta)$ 在整个频谱中的能量最大,周期性最接近原始信号 $I_{X,Y}$,基频分量的相位差 $\alpha_1 = \theta_{x1} - \theta_{y1}$ 可等效为式(13)中原始信号的相位差 α 。并且,外界扰动对于两个调谐信号的影响是同时作用的,求取相位差时该部分影响可以抵消。因此,该方法具有更高的精度和更好的环境适应性。为验证该方法的精度,采用清华大学的频率分裂系统(中国国家波片测量标准,精度优于 0.01°)与激光回馈系统同时测量了零级标准四分之一波片(Thorlabs WPQ10M-633,加工精度优于 0.05°)进行比对,测量结果如表 1 所示。

表 1 零级标准四分之一波片比对测试结果

Tab. 1 Comparison results of zero-level standard quarter-wave plate

	1	2	3	4
频率分裂	89.992	89.994	89.992	89.991
激光回馈	89.770	89.895	89.832	89.791

测得标准四分之一波片的相位延迟为 89.770° ,误差小于 0.3° ,重复性优于 0.125° ,因此

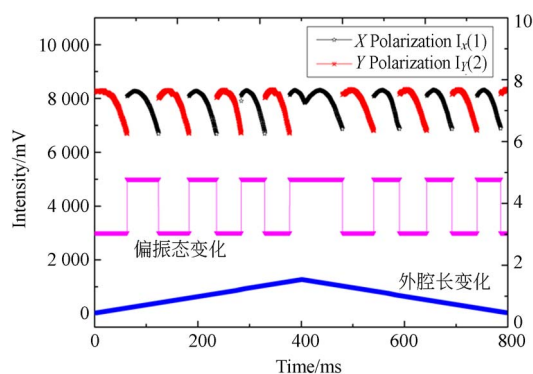


图 4 标准四分之一波片测试信号

Fig. 4 Experimental curves of standard quarter-wave plate

系统对条纹数的测试精度为 8.3×10^{-4} 。

3.3 飞机座舱有机玻璃样品的应力测试

采用激光回馈双折射测量系统对 4 块有机玻璃样品(清华大学航天航空学院提供)分别进行测量,其中样品 1#和 2#是从同一飞机座舱有机玻璃上切割而来,样品 3#和 4#来自另一块飞机座舱玻璃,4 块样品均为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的矩形,厚度分别为 4.615,4.613,8.540,8.580 mm。每块样品测试 4 个角和中间点,环境温度为 $20.2 \text{ }^\circ\text{C}$,测量得到样品的内应力条纹数 N 如表 2 所示。

表 2 条纹数 N 的测量结果

Tab. 2 Measurement result of fringe number

	1#	2#	3#	4#
点 A	0.020 5	0.014 5	0.044 8	0.051 3
点 B	0.017 1	0.015 8	0.040 3	0.055 9
点 C	0.016 6	0.030 3	0.050 5	0.051 9
点 D	0.018 6	0.015 7	0.040 5	0.045 3
点 E	0.015 8	0.017 4	0.045 5	0.044 5

参考文献:

- [1] TOMOZAWA M, LEZZI P J, HEPBURN R W, *et al.*. Surface stress relaxation and resulting residual stress in glass fibers: A new mechanical strengthening mechanism of glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, 358(18-19):2650-2662.
- [2] FINDLAY S J, HARRISON N D. Why aircraft fail[J]. *Mater. Today*, 2002, 5(11):18-25.
- [3] NORRBY S. Imaging quality of intraocular lenses[J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2006, 32(4):545-546.

有机玻璃的厚度如表 3 所示,已知 $f_s = 230 \text{ N/mm}$,根据式(5)可得样品上各点的主应力差 $\sigma_2 - \sigma_1$ 如表 3 所示。

表 3 主应力差的计算结果

Tab. 3 Calculation results of principal stress difference

	(MPa)			
	1#	2#	3#	4#
点 A	1.023	0.722	1.207	1.375
点 B	0.8505	0.7895	1.0845	1.499
点 C	0.826	1.508	1.359	1.392
点 D	0.925	0.785	1.090	1.214
点 E	0.788	0.866	1.225	1.192

根据激光回馈系统的条纹数 N 的精度,对于厚度为 4.615 mm 和 8.580 mm 的航空有机玻璃,应力测量精度分别为 0.039 9,0.021 4 MPa。

4 结 论

本文根据目前对高端玻璃材料内应力精确测量的需求,提出了基于傅里叶变换法提取相位信息的激光回馈应力测量方法。从理论上对激光回馈系统与双折射元件相互作用时激光器的输出特性进行了分析及实验验证,针对 X 偏振态和 Y 偏振态的调制曲线的峰值不等且易受环境干扰等问题,提出了对激光器输出信号进行分光并分别进行傅里叶变换提取基频相位信息的方法。通过标准四分之一波片对该方法进行测试,证明系统误差小于 0.3° ,重复性优于 0.125° ,对应力条纹数的精度优于 8.3×10^{-4} ,满足高端玻璃的应力检测需求。

- [4] WU Y, ZHANG S L, LI Y. The intra-cavity phase anisotropy and the polarization flipping in HeNe laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13684-13690.
- [5] CHUPAKHIN S, KASHAEV N, HUBER N. Effect of elasto-plastic material behaviour on determination of residual stress profiles using the hole drilling method[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2016, 51(8): 572-581.
- [6] VOURNA P, HERVOCHES C, VRANA M, *et al.*. Correlation of magnetic properties and residual stress

- distribution monitored by X-ray and neutron diffraction in welded AISI 1008 steel sheets[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(1): 1-4.
- [7] OKORO C. Nondestructive measurement of the residual stresses in copper through-silicon vias using synchrotron-based microbeam X-ray diffraction[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, 61(7): 2473-2479.
- [8] MONTALTO L, PAONE N, RINALDI D, *et al.*. Inspection of birefringent media by photoelasticity from diffuse light polariscope to laser conoscopic technique[J]. *Opt. Eng.*, 2015, 54(8), 081210.
- [9] 唐玉国, 何森, 崔继承, 等. 用于红外晶体双折射测量的单 1/4 波片法[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10):2176-2183.
- TANG Y G, HE M, CUI J CH, *et al.*. Senarmont based measuring method for birefringence of infrared crystal[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10):2176-2183. (in Chinese)
- [10] NAGIB N N, BAHRAWI M S, ISMAIL L Z, *et al.*. Evaluation of a photometric method for retardance measurement of a quarterwave phase plate [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2015, 69:77-79.
- [11] MORI A, TOMITA R. Semi-automated Senarmont method for measurement of small retardation[J]. *Instrum. Sci. Technol.*, 2015, 43(4):379-389.
- [12] 李克武, 王黎明, 王志斌, 等. 弹光和光电级联的组合相位调制型椭偏测量术[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4):690-697.
- LI K W, WANG L M, WANG ZH B, *et al.*. Phase-modulated ellipsometry combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2016, 24(4): 690-697. (in Chinese)
- [13] LI J, TAN Y D, ZHANG S L. Generation of phase difference between self-mixing signals in a-cut Nd: YVO₄ laser with a waveplate in the external cavity[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3615-3618.
- [14] ZHU K Y, GUO B, LU Y Y, *et al.*. Single-spot two-dimensional displacement measurement based on self-mixing interferometry[J]. *Optica*, 2017, 4(7): 729-735.
- [15] 田振国, 张立, 朱开毅. 基于微片 Nd: YVO 激光回馈的共焦层析成像系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10z):29-34.
- TIAN ZH G, ZHANG L, ZHU K Y. Laser feedback confocal tomographic system based on microchip Nd: YVO lasers[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2015, 23(10z):29-34. (in Chinese)

作者简介:



牛海莎(1984—),女,河北石家庄人,博士,讲师,2008年于武汉大学获得学士学位,2017年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事基于正交偏振激光、激光器自混合干涉效应的精密测量研究。E-mail: niuhs@buaa.edu.cn

通讯作者:



祝连庆(1963—),男,浙江兰溪人,博士,教授,博士生导师,1984年、1989年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位,北京学者,国家有突出贡献中青年专家,国家级百千万人才,国务院特殊津贴专家,北京市有突出贡献科学技术人才,科技北京百名领军人才,高创计划杰出人才,教育部“长江学者创新团队”带头人,全国优秀科技工作者,主要从事光纤传感与激光器、生物医学检测技术及仪器、精密测量与系统的研究。E-mail: zhulianqing@sina.com