

HeNe 激光双折射外腔回馈位移测量仪研究

邓 勇¹, 马志强¹, 江 奕¹, 张 松², 蔡 婷¹

(1. 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019;
2. 清华大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 基于单模激光器的双折射外腔回馈位移测量系统能输出两路回馈条纹信号, 且条纹相位差不受回馈外腔长的影响, 因此在研制大量程、高分辨位移测量系统方面极具潜力。开展了双折射外腔回馈的相关现象研究, 研制了性能优良的位移测量仪器。稳频和回馈外腔扫描技术相结合, 进一步提高了系统的频率稳定度(优于 10^{-7})和抗干扰能力。试验对系统进行了零漂、拍频和比对测试, 其量程超过 200 mm, 分辨率为 15.82 nm, 线性度优于 2.3×10^{-7} 。分析了系统的主要误差来源, 估算了总的测量误差为 0.21 μm 。回馈位移测量仪具有结构简单、分辨率高、线性度好以及测量范围大的优点, 工业应用前景广阔。

关键词: 双折射外腔干涉; 激光回馈; HeNe 激光器; 位移测量

中图分类号: TN243, TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0206007

Research on displacement measurement in HeNe laser with birefringent external cavity feedback

Deng Yong¹, Ma Zhiqiang¹, Jiang Yi¹, Zhang Song², Cai Ting¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The displacement measurement based on single mode in HeNe laser with the birefringence optical feedback can output two feedback signals. The fringe phase difference is not affected by the feedback external cavity length, so it has great potential in the development of large range and high resolution displacement measurement system. Phenomenon of birefringence optical feedback was researched and displacement measurement system of high-performance was developed. The frequency stability and anti-jamming capability of the displacement measurement system were improved by combining the frequency stabilization technique and feedback cavity scanning technique. The stabilized frequency fluctuation was less than 10^{-7} . The zero drift, beat frequency and comparison of the system were tested. Its range was more than 200 mm, the resolution is 15.82 nm, the linearity is better than 2.3×10^{-7} . The main error sources of the system were analyzed, and the total measurement error was 0.21 μm .

收稿日期: 2016-06-05; 修订日期: 2016-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51375262, 61475082); 北京市科委项目(Z151100002415027)

作者简介: 马志强(1990-), 男, 硕士生, 主要从事测试技术与仪器方面的研究。Email: mazq13@163.com

导师简介: 邓勇(1965-), 男, 副教授, 主要从事测试技术与仪器方面的研究。Email: dengy@ntu.edu.cn

The displacement sensor features compact configuration, nanometer-scale resolution, good linearity and large measurement range, and has broad application prospects in industry.

Key words: birefringence external cavity interference; laser feedback; HeNe laser; displacement measurement

0 引言

激光回馈,又称作自混合干涉,是指激光器输出光被外部反射物体反射后,部分光重新回到激光器谐振腔,与输出光干涉。由于受到反射物体的作用,回馈光中包含了反射物体的速度、方向和位移等信息。和传统的双光束干涉现象一样,激光回馈信号的一个周期信号对应反射物体的半波长整数分之一的位移^[1-2]。在回馈系统当中,激光器既是光源,也作为感应器件,因而,回馈系统具有结构简单紧凑、易准直和成本低等特点。

激光回馈应用方面的研究也引起了各国研究人员的浓厚兴趣,目前激光回馈已被大量应用于位移、速度、角度、波片相位延迟量和形貌等的测量。通过激光回馈技术测量反射体的位移是微测量领域研究的一种趋势。目前,自混合干涉微位移测量主要有以下几种方法:条纹计数法、相位测量法、外差干涉法和相位锁定测量法^[3]。但这些方法在大量程和高分辨率方面有所欠缺,不能满足工业应用的需求。

基于单模 HeNe 激光器的双折射外腔回馈系统利用偏振分光棱镜分光,得到了两路具有位移和方向信息的回馈条纹信号,巧妙地解决了传统回馈系统只输出一路回馈条纹信号而难于判向的问题^[4]。输出两路具有位相差的回馈条纹信号,用于位移测量和判向,实现信号细分,且信号的相位差不随回馈外腔长的变化而变化,这为研制大量程、高分辨率的回馈位移测量仪打下了基础。

1 双折射外腔回馈与位移测量

双折射外腔回馈信号如图 1 所示,信号为两路具有 90°相位差的类正弦波动回馈信号,该信号和光栅尺系统当中得到的可细分莫尔条纹信号非常类似,可以采用电子细分电路方便地实现高倍细分,得到较高的分辨率^[5]。在 PZT 电压的上升沿和下降沿,回馈镜移动方向相反,而 IX 和 IY 的相位差反号,但

相位差大小不变。因此可以直接地利用两路信号之间的相对相位关系来判别被测物体的运动方向。

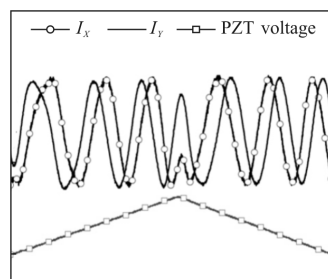


图 1 双折射外腔回馈信号

Fig.1 Signals of birefringence optical feedback

双折射外腔回馈系统所得到的回馈条纹相位差不随外腔长的变化而改变^[6],如图 2 所示。从图中可以看到,在不同的回馈外腔长处,双折射外腔回馈条纹相位差不发生变化。这为利用双折射外腔回馈进行大量程的位移测量提供了有力的依据,因此,基于单模 HeNe 激光器的双折射外腔回馈系统在位移测量领域具有很好的潜力。实验发现还发现激光管腔内双折射的大小也会影响回馈信号的相位差,腔内双折射的大小应控制在 10 MHz 以内,超过 10 MHz 的激光管可以通过在腔镜上打孔方法来调谐^[7-8]。

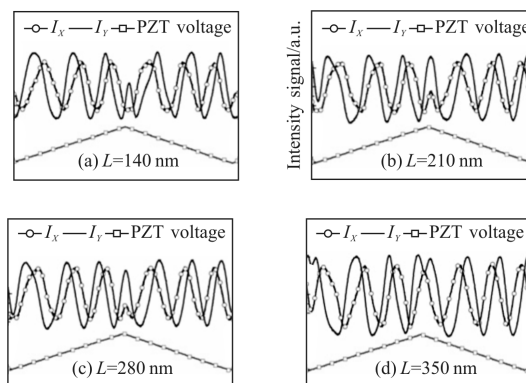


图 2 回馈外腔长 L 变化时的回馈条纹

Fig.2 Feedback fringes with the change of feedback external cavity length L changes

2 系统结构

回馈位移测量仪结构简单,如图 3 所示。主要包含三部分:光学测头、仪器电箱和测量靶镜。光学测头包括 HeNe 激光器、90°波片、渥拉斯顿棱镜 W 和探测器 D1 和 D2(光电池);仪器电箱主要包括信号处理和结果显示部分;测量靶镜即为回馈系统中的回馈镜 M3。

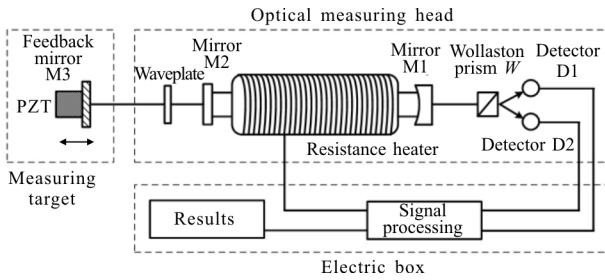


图 3 回馈位移测量仪系统结构图

Fig.3 System structure diagram of displacement measurement based on optical feedback

系统中所使用的光源是全内腔 HeNe 激光器,输出单纵模线偏振光,中心波长为 632.8 nm。腔镜 M2 端的输出光经测量靶镜即回馈镜 M3 反射之后,部分光回馈到谐振腔与腔内光场相互作用,形成回馈条纹。腔镜 M1 端输出的光信号被渥拉斯顿棱镜 W 分成偏振方向相互正交的两路光信号,分别被探测器 D1 和 D2 探测接收^[9]。回馈外腔当中放置 90°波片,使得探测器 D1 和 D2 接收到的回馈条纹具有 90°的相位差,然后再经信号处理电路进行滤波、放大、细分和脉冲计数等环节之后得到测量靶镜 M3 的位移值,其结果由显示模块给出。将探测器 D1 和 D2 输出的电压信号进行电路加和之后得到反映激光器总光强的电压信号,将这一信号输入稳频模块进行稳频^[10]。稳频的执行模块则是缠绕在激光器上的电阻丝。实物图如图 4 所示。测量时,被测物体推



图 4 系统实物图

Fig.4 System physical map

动靶镜 M3 移动,回馈外腔长发生变化,激光器的功率受到调制而发生周期性波动,产生回馈条纹。通过对回馈条纹的检测得到测量靶镜的位移值。

3 电路设计

位移测量仪的电路,如图 5 所示包含四个部分:稳频模块、转换及放大模块、五细分模块和数字电路及显示模块。其中,转换及放大、五细分和计数显示三个模块为测量信号的处理电路,稳频模块为稳频信号的处理电路,其输出信号用于控制缠绕在激光器增益管上的加热电阻丝。两路回馈条纹信号经光电探测器转换为电流信号后进入转换及放大板,先被转化为电压信号,再经滤波放大后,送入五细分板,经移相、电压比较和逻辑运算后,五细分板输出两路相位正交的脉冲信号,其频率为五细分板输入信号的五倍,即实现回馈条纹信号的五细分。数字模块主要由 CPLD(complex programmable logic device,复杂可编程逻辑器件)和单片机组成。五细分板输出的两路正交的脉冲信号进入数字模块的 CPLD 后被再次细分,细分倍数为 4,得到计数脉冲,然后再由可逆计数器计数,计数结果送入单片机进行数据处理和显示,得到位移测量值。仪器分辨率为 $632.8 \text{ nm} / 2/20 = 15.82 \text{ nm}$ 。

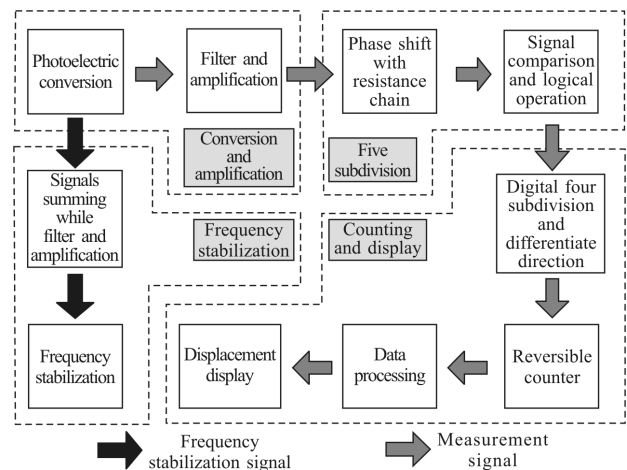


图 5 电路原理流程图

Fig.5 Flow chart of circuit schematics

4 频率稳定

由于现有的针对 HeNe 激光器的常用稳频方法不能直接应用于基于双折射外腔的位移测量仪^[11],设

计了图 6 所示稳频方案。在设计光电探测部分时没有在渥拉斯顿棱镜之前单独采用一个分光镜和光电探测器来直接获取稳频所需的激光总光强信号,而是将渥拉斯顿棱镜分光后得到的两路信号进行分别探测,再将这两路信号进行加和,得到激光总光强信号。再将这一信号经滤波之后与预先设置的参考电压进行比较,得到二者的差值。该差值经过 PID 环节处理之后,输出 PWM 脉宽控制信号。稳频的执行部分是缠绕在激光器增益管上的加热电阻丝,加热的通断由 PWM 脉宽信号控制。因此当激光器的总光强信号偏离参考电压时,PWM 输出信号控制加热电阻丝,调节激光器的腔长,进而改变激光光强时期重新稳定在参考电压处,达到稳频的目的。

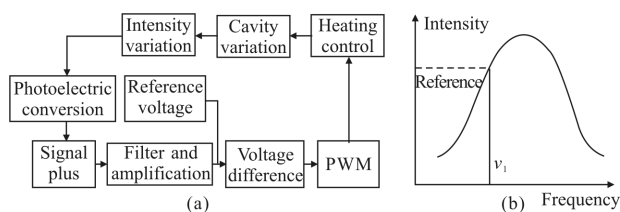


图 6 稳频方案示意图

Fig.6 Flow chart of frequency stabilization

5 系统稳定性提高

当测量靶镜(或被测物体)静止不动时,振动、空气流动等环境变化会造成回馈镜的抖动、引起回馈外腔长和激光器谐振腔长的变化,因此,回馈位移测量仪对环境的扰动非常敏感,具体表现为静态位移值波动较大,稳频模块工作不稳定,严重时甚至会失锁。

实验时,PZT 驱动回馈镜一直往复运动,此时稳频模块工作正常,测量结果也是在一个范围内来回变化(PZT 驱动回馈镜往复运动),并不发生明显的漂移。对比回馈镜静止和运动时的稳频信号和参考电压,如图 7 所示,可以看出 PZT 驱动回馈镜运动

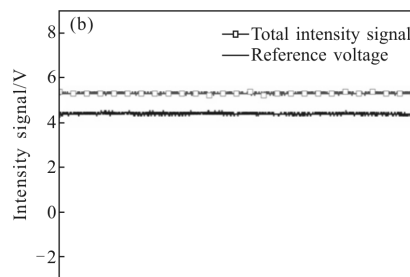
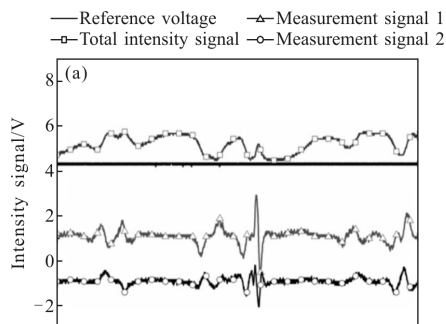


图 7 回馈镜静止和运动时的稳频信号和稳频参考电压

Fig.7 Frequency stabilization signal and reference voltage for frequency stabilization when feedback mirror keeps still or moving

后稳频信号是一个稳定的直流信号。因此利用 PZT 驱动回馈镜往复扫描回馈外腔能大大地提高系统的抗干扰性能,将这种技术称为回馈外腔扫描技术。

采用回馈外腔扫描技术之后,回馈镜始终来回运动,位移测量值也在一定范围内来回跳动,这个范围即为 PZT 扫描的位移长度。因为回馈镜的往复运动,位移测量的起始点和终点位置无法确定。为了解决这个问题,采用极小值算法来消除 PZT 扫描位移对测量的影响^[12-13]。

6 实验分析

6.1 零漂和稳频测试

分别测试仪器的零漂和稳频性能,其结果如图 8 所示。

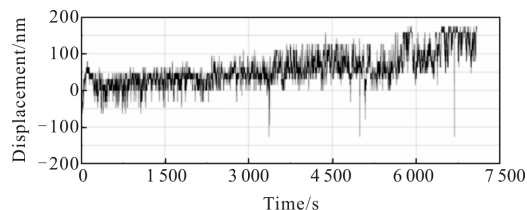


图 8 回馈位移测量仪零漂测试结果

Fig.8 Test result for zero drift of displacement measurement based on optical feedback

从图 8 可以看到,回馈位移测量仪在约 2 h 的测试时间内,位移波动量在 200 nm 左右(-50~150 nm),并呈现出整体递增的趋势。这是由于室内温度变化引起的仪器底板、导轨等膨胀导致引起的。

拍频实验系统结构图如图 9 所示。将回馈位移测量仪和碘稳激光器进行拍频实验,拍频值由计算机

采集记录。拍频时,回馈位移测量仪开启回馈外腔扫描技术。碘稳激光器购自中国计量科学院,型号 AI-04。由图 10 可以看出,在 5 h 的实验时间内,拍频值变化范围约为 20 MHz。因此,采用回馈外腔扫描技术后,回馈位移测量仪的频率稳定度优于 1×10^{-7} 。

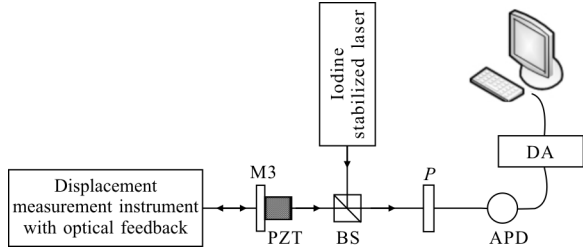


图 9 拍频实验系统示意图

Fig.9 Schematic diagram of beat frequency experiment system

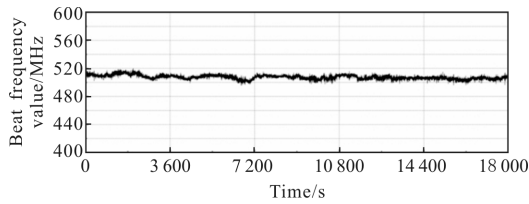


图 10 拍频实验曲线

Fig.10 Beat frequency experiment curve

6.2 误差分析

回馈位移测量仪的基本测量原理是:测量靶镜每移动半个波长的位移,激光光强波动一个周期,回馈信号也产生一个周期的波动,因此,系统在测量过程中不会产生累计误差^[14]。对回馈位移测量仪的主要误差来源进行分析,并估计其总的测量误差。

波长漂移引起的误差 ΔD_λ 可以表示为:

$$\Delta D_\lambda = 1 \times 10^{-7} \times l = 1 \times 10^{-7} \times 500 \text{ mm} = 50 \text{ nm} \quad (1)$$

式中: l 为测量靶镜的工作距离。

信号相位差变化引起的误差 ΔD_p 为:

$$\Delta D_p = \lambda/2/20 \times 2 = 31.6 \text{ nm} \quad (2)$$

压电陶瓷的蠕变特性引起的测量误差 ΔD_{sc} 估值为 20 nm ^[15]。

测量起始和终止时引起的测量误差 ΔD_s 为两个计数脉冲,即

$$\Delta D_s = \lambda/2/20 \times 2 \quad (3)$$

环境参数变化(温度、湿度、气压等)会引起空气折射率的变化,导致误差的产生,根据 Edllen 公式,空气折射率的变化 Δn 为:

$$\Delta n = (0.0026 \Delta P - 0.929 \Delta t - 0.00042 \Delta f) \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中: ΔP 、 Δt 和 Δf 分辨表示大气压强、温度和湿度的变化。在实验室环境下,假设 $\Delta P = 10 \text{ Pa}$, $\Delta P = 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta f = 10 \text{ Pa}$, 则空气折射率变化带来的误差 ΔD_n 可以表示为:

$$\Delta D_n = \Delta n \times l = 100 \text{ nm} \quad (5)$$

式中: l 为回馈外腔长度,即靶镜的工作距离,这里取中间值 500 mm 。

环境温度的漂移还会引起激光增益管长度发生变化。激光增益管所用材料的线膨胀系数为 7×10^{-6} , 激光增益管长改变量造成的测量误差为 $140 \text{ mm}/2 \times 7 \times 10^{-6} \times 0.2 = 98 \text{ nm}$ 。因此环境变化导致的测量误差 ΔD_n 约为 200 nm 。

总误差估值 ΔD_n 为:

$$\Delta D = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \Delta D_i^2} = \sqrt{(\Delta D_\lambda)^2 + (\Delta D_p)^2 + (\Delta D_{sc})^2 + (\Delta D_s)^2 + (\Delta D_E)^2} \quad (6)$$

其中, ΔD_i 表示上述分析中每个因素单独作用引起的误差,将各项误差代入公式(6),得到 15.82 nm 分辨率回馈位移测量仪的测量误差估值为 $0.21 \text{ } \mu\text{m}$ 。

6.3 比对试验

将回馈位移测量仪和安捷伦的双频激光干涉仪(HP5519A)进行测量比对,靶镜每移动 10 mm 采一次数据,共移动 200 mm ,实验方案如图 11 所示。并利用最小二乘法对采集到的 21 个数据进行线性拟合,得到的拟合曲线如图 12 所示,得到的拟合直线方程为:

$$Y_i = X_i - 2.1 \times 10^{-5} \quad (7)$$

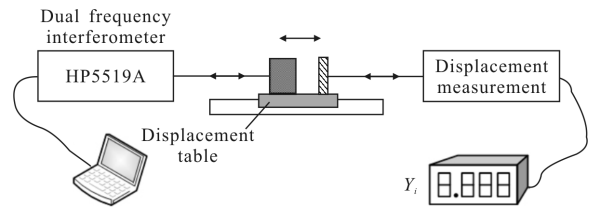


图 11 比对试验

Fig.11 Comparison test

最小二乘拟合之后,将拟合结果中的预测值和原始的测量值进行对比即可得到各点的线性偏差(即残差)。从中选出残差的最大值(记为 ΔY_{\max}),回馈位移测量仪的线性度 ΔY_{\max} 可以表示为:

$$L_i = \frac{\Delta Y_{\max}}{|Y_{\max} - Y_{\min}|} \quad (8)$$

利用拟合结果进行计算得到, 15.82 nm 分辨率回馈位移测量仪当回馈测量靶镜工作距离为 200 mm 时, 线性度为 2.3×10^{-6} 。

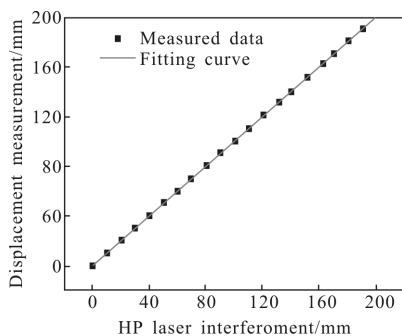


图 12 拟合结果

Fig.12 Fitting result

7 结 论

对单模 HeNe 激光器的双折射外腔回馈展开了研究, 研制了分辨率为 15.82 nm 的回馈位移测量仪系统。根据系统需要, 设计选定了激光器的各项参数以及其他光学元件。简要阐述了各个电路模块的原理, 采用电阻链细分和数字细分的方法, 最终实现了对回馈条纹信号的 20 倍细分, 仪器分辨率达 15.82 nm。设计了稳频方案, 引入回馈外腔扫描技术, 提高了仪器的抗干扰性能和稳定性能, 频率稳定度优于 1×10^{-7} 。最后, 对回馈位移测量仪的进行了零漂和稳频测试, 并对测量误差来源进行了分析, 得到总的误差估值为 $0.21 \mu\text{m}$, 与比对试验得出的数据相吻合。设计实现的 15.82 nm 分辨率的回馈位移测量仪量程超过 200 mm, 线性度优于 2.3×10^{-7} , 具有结构简单、分辨率高、线性度好以及测量范围大的优点, 工业应用前景广阔。

参 考 文 献:

[1] Chen Wenxue. Research on laser birefringent feedback [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)

[2] Zhang Shulian. Laser feedback technology and development [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007 (11): 65–71. (in Chinese)

[3] Deng Yong, Liu Ning, Cao Hongbei, et al. Nd:YAG laser feedback interference effects based PZT precision measurement technology and system [J]. *Infrared and laser*

Engineering, 2014, 43(10): 3434–3438. (in Chinese)

[4] Zhang Shulian, Fei Ligang, Liu Weixin. Nano-width interference fringes of laser feedback [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 38(2): 208–211. (in Chinese)

[5] Gao Xu, Li Junfeng, Zhang Shumei, et al. Real-time compensation of subdivision error for Moire fringe photoelectric signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3013–3018. (in Chinese)

[6] Lufei Z, Bin Z, Shulian Z, et al. Anisotropic optical feedback of single frequency intra-cavity He-Ne laser [J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(3): 1141–1146.

[7] Zhu Shoushen, Zhang Shulian, Liu Weixin, et al. Laser-micro-engraving method to difference of two-frequency modify frequency HeNe lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(6): 159–163. (in Chinese)

[8] Wu Y, Tan Y, Zhang S, et al. Polarization characteristics of He-Ne laser with different directions of polarized feedback [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(22): 5371–5375.

[9] Zhang Shulian, Wu Yun, Tan Yidong, et al. A kind of displacement measurement in HeNe laser with birefringent optical feedback, CN 102253389 B[P]. 2013.

[10] 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)

[11] Zhu Shoushen, Liu Weixin, Zhang Shulian. Intensity tuning curves in boot process and performance of full-inter-cavity He-Ne lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1106–1110. (in Chinese)

[12] Wu Y, Zhang S, Li Y. The intra-cavity phase anisotropy and the polarization flipping in HeNe laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13684–13690.

[13] Wu Yun, Tan Yidong, Zeng Zhaoli, et al. Note: High-performance HeNe laser feedback interferometer with birefringence feedback cavity scanned by piezoelectric transducer. [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(5): 56103.

[14] Li Jiang, Tan Yidong, Zhang Shulian. 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.

[15] Zeng Zhaoli, Qu Xin, Tan Yidong, et al. High-accuracy self-mixing interferometer based on single high-order orthogonally polarized feedback effects [J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 16977–16983.