

正交偏振激光回馈干涉仪稳定性提高方法研究

徐 宁,秦水介*

(贵州大学 物理学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 激光回馈技术灵敏度高, 并且无须配合靶镜就能够测量诸如黑色、粗糙的目标的位移或形变。为了消除环境(气压、地基震动、温度漂移等)对测量精度的影响, 设计、构建了稳定的微片正交偏振激光器, 采用半导体激光器泵浦微片; 搭建了包括光学、电路的完整的正交回馈干涉仪系统, 系统工作稳定, 实现了远距离处测量。这一系统能有效地减小环境对测量的影响, 提高激光回馈干涉仪的精度。

关键词: 激光回馈; 正交偏振激光; 远距离测量; 环境补偿

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0320003

Stability improvement method of orthogonally polarized laser feedback interferometer

Xu Ning, Qin Shuijie*

(School of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The laser feedback technique had the advantage of high sensitivity, which could fulfill the displacement and deformation measurement of targets with black and rough surfaces without the need of cooperative target mirrors. In this paper, in order to eliminate the influences of environment (including air pressure, base vibration, drift in temperature, etc.) on measurement accuracy, steady orthogonally polarized microchip laser was designed and assembled. The orthogonally polarized laser feedback system was built with optical components and electric circuits. The system had capability to achieve long-distance measurement and work in steady state. The system could effectively reduce the influences of environment and improve the accuracy of the laser feedback interferometer.

Key words: laser feedback; orthogonally polarized laser; long-distance measurement; environment compensation

收稿日期: 2018-10-05; 修订日期: 2018-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61475082)

作者简介: 徐宁(1993-), 男, 硕士生, 主要从事激光及其精密测量技术方面的研究。Email: xuning299@126.com

导师简介: 秦水介(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与光电技术方面的研究。Email: shuijie_qin@sina.com

0 引言

自 1963 年 King 在实验中发现了激光回馈现象,研究者就开始对其理论和应用技术展开研究^[1]。激光回馈(laser feedback)又称激光自混合效应,指激光器输出光照射到物体外表面发生散射或者反射,部分光沿原路返回激光谐振腔内,返回的光与激光器谐振腔内光场发生相互作用,引起激光功率、模式、频率、线宽等一系列参数变化的现象。激光器输出调制的光能够反映目标物体外部的运动信息,后续经过解调即可获得位移、速度等参数^[2-9]。

与传统的干涉仪相比,激光回馈效应的仪器结构简单、易准直,能工作在粗糙表面,能够实现真正意义上的非接触、无需安装靶镜^[2,4-5,10]测量。因此,激光回馈效应较传统的激光干涉技术而言有着更为明显的优势,其应用和发展具有非常广阔的前景和价值。清华大学张书练课题组在激光回馈的理论和应用上展开了广泛的研究,取得了丰硕的成果^[1,2,5,8-11]。清华大学万新军博士^[4]构建一种新型固体回馈干涉仪,此系统利用声光移频器的不同衍射级次额外引入了一路移频回馈光,使得激光器输出功率中有两个不同频率的调制信号,但这种系统只能测量近距离目标;清华大学的任舟博士采用数字相位卡取代锁相放大器作为信号提取的工具,为此类干涉仪器的仪器化迈出了重大的一步;张松博士优化了固体激光器,提出了增大微片激光器弛豫振荡频率和移频频率的方法。

但这些改进在远距离测量时,依旧不能补偿环境带来的影响。尤其在环境恶劣情况下的测量,由于环境变化明显,会严重影响测量结果,因此提高激光回馈干涉仪稳定性是很有必要的。以张松博士激光回馈干涉系统为例,当目标距离激光器 400 mm 处,该系统的零漂值达到 2 μm,这在精密测量领域尤其是测量精度上有很大的局限。文中根据激光回馈效应的相关理论,搭建正交偏振激光回馈干涉仪,构建微片正交偏振激光器,设计一种准共路系统用以实现远距离测量,减小环境对测量结果的影响。

1 光学系统及结构

1.1 正交偏振激光器

激光器是回馈干涉仪的核心,微片激光器具有

结构简单、体积小、易输出单纵模的特点。单个半导体激光器(LD)泵浦微片只能产生一束激光,系统使用两个 LD 同时泵浦微片不同位置产生两束激光。同时,为了使两束激光的工作特性相似,两个 LD 采取并联连接方式,分别供电。如图 1 所示。图中,ML1,ML2 为 Nd:YVO₄ 微片激光器;CC 为方解石晶体;BS 为分光镜;WP 为沃拉斯顿棱镜;PD1,PD2 为光电探测器;AOM 为声光移频器组;L1 为准直镜;L2 为回馈镜;PBS 为偏振分光镜;T1 为测量目标;T2 为参考目标。半导体激光器输出 808 nm 的激光,钽酸钷微片厚度为 0.75 mm。

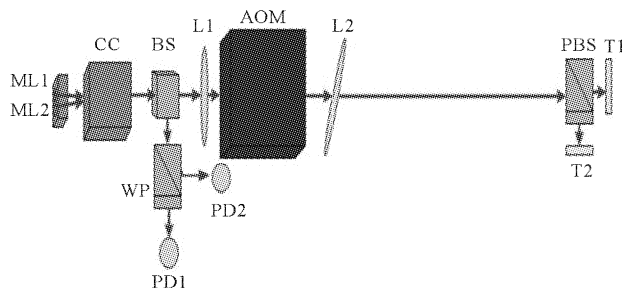


图 1 正交偏振激光回馈干涉仪光路图

Fig.1 Schematic diagram of orthogonally polarized laser feedback interferometer

正交偏振激光器工作原理(见图2)^[10,12-16]:两个 LD 输出的两束泵浦光近距离传输到钽酸钷(Nd:YVO₄)微片的不同位置;并输出两束偏振方向一致相互平行的线偏振光;这两束激光经过方解石晶体后,使其中一束光的 e 光与另一束光的 o 光重合,从而形成空间上重合的正交偏振光,经方解石后的光阑只允许正交偏振光通过,从而实现了激光器输出正交偏振光。

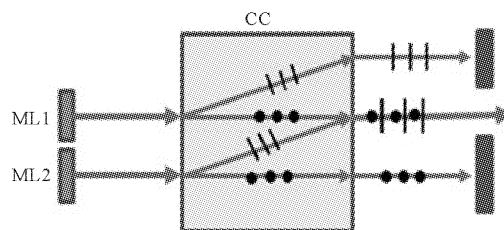


图 2 正交偏振激光器示意图

Fig.2 Diagram of orthogonally polarized laser

1.2 光学系统

正交偏振激光回馈干涉仪光学系统:激光经过

方解石晶体后,通过分光镜分成两部分,一部分被沃拉斯顿棱镜分光后分别到达两个光电探测器;一部分被声光移频器移频;移频后的正交偏振光会一部分被回馈镜(L2)反射回去产生一倍移频信号,另一部分光会继续传播,经偏振分光镜后正交偏振光分开,分别照射测量目标和参考目标后,产生二倍移频的信号。光电探测器接收到的光信号经信号处理模块,输入到相位卡,相位卡求取光信号转换来的电压信号及声光移频器驱动电压信号的相位,并将其输入到计算机中计算相位的变化。为了减小激光光束的发散角,设计 L1 透镜作为准直镜,焦距大小为激光器到透镜表面的距离。系统具体光路如表 1 和图 3 所示。

表 1 正交偏振激光回馈干涉仪光路

Tab.1 Light paths of orthogonally polarized laser feedback interferometer

Numbered list	Light way
Light path 1	ML1→AOM→L2→AOM→ML1→PD1
Light path 2	ML1→AOM→L2→PBS→T1→PBS→L2→AOM→ML1→PD1
Light path 3	ML2→AOM→L2→AOM→ML2→PD2
Light path 4	ML2→AOM→L2→PBS→T2→PBS→L2→AOM→ML2→PD2

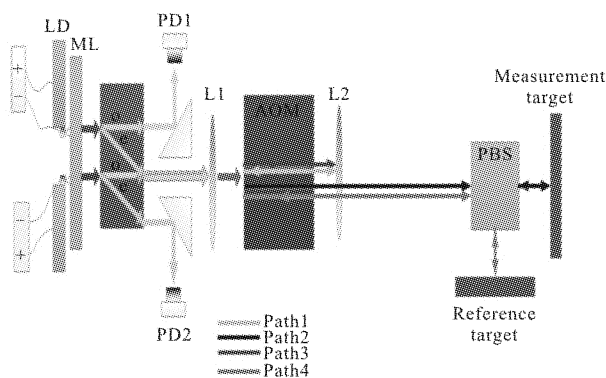


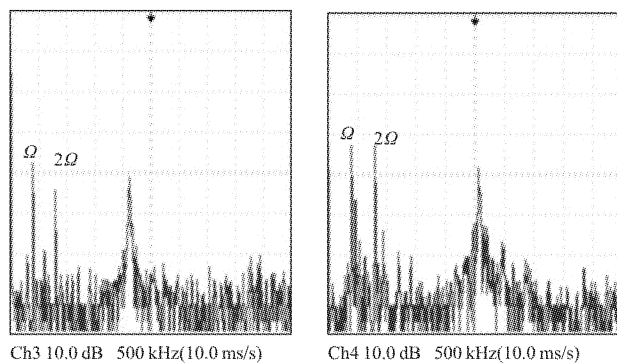
图 3 光路示意图

Fig.3 Diagram of light paths

2 滤波电路设计

系统采用外差测相方法:需要将信号输入到单端信号适配器,将正弦信号转换为方波信号;然后将方波信号输入到相位计,从而同步测量出相位变化量

$\Delta\phi$ 。图 4 是光电探测器探测到的光信号,图 4(a)作为参考信号需要分别提取 Ω 和 2Ω 标准正弦信号;对图 4(b)作同样处理,两束光信号经过滤波模块后输入到相位卡中即求出相位变化值。滤波器采用芯片为 LT1568 的带通滤波,其中滤波器的参数:中心频率分别为 400 kHz 和 800 kHz, -3 dB 带宽分别为 40 kHz 和 80 kHz。最终滤波后光信号功率谱如图 5 所示,图 5(a)是 400 kHz 的滤波信号,其光功率谱幅值达到 50 dB 以上;图 5(b)中 800 kHz 的滤波信号也需满足同样条件,功率谱幅值为 57 dB,时域幅值为 4 V。



(a) 参考光

(b) 测量光

(a) Reference beam

(b) Measurement beam

图 4 光信号功率谱

Fig.4 Power spectra of optical signals

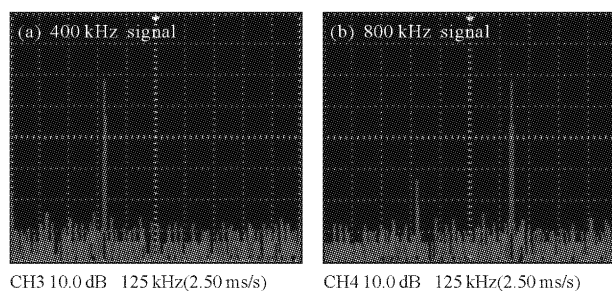


图 5 滤波信号图

Fig.5 Filter signal

3 信号处理

如表 1 所示,光路中声光移频器用到两个级次。光路一和光路三用到移频器一倍移频,这两路光程差别在于激光器内部及钽酸钷晶体到方解石晶体之间环境的变化,两者之差反应了光学器件的热蠕动及非共路部分环境的扰动。光路二和光路四用到声光移频器的二倍移频,并使激光最终分别照射到测

量物和参考物上。光路二和光路四之差反应了测量物相对于参考物之间的位移变化及系统前端非共路部分环境扰动引起的误差。因此光路二和光路四的相位差减去光路一和光路三的相位差,就能补偿所有光程扰动的测量结果。根据上述原理,系统信号的处理方式如图 6 所示。

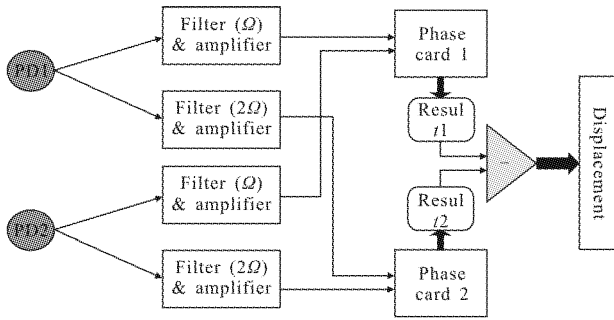


图 6 信号处理流程图

Fig.6 Flow chart of signal processing

在系统中,以其中一路光信号为例。移频光回馈到激光器引起的功率调制为:

$$\frac{\Delta I(2\Omega)}{I} = \kappa G(\nu) \cos(2\Omega t - \phi + \phi_s) \quad (1)$$

式中: $G(\nu)$ 为增益项,表示回馈光的增益系数; κ 为外腔的电场反射系数; Ω 为移频器的差频频率; ϕ_s 为固定的附加相位,和 $\omega\tau$ 无关; $\phi = \omega\tau$,为反映外腔腔长信息的光回馈相位。

光功率调制信号通过同步解调或者差分计数等外差方法可以解调出相位变化量,其具体相位变化如下式所示:

$$\Delta L = \frac{c}{2n\omega} \Delta\phi \quad (2)$$

式中: c 为真空中光速; n 为空气折射率; $\Delta\phi$ 为相位变化值; ΔL 即反应光路位移变化信息。

在远程测量时,参考光路和测量光路空程一致,如图 3 中光路 2 和光路 3,使用参考光路补偿测量光路的远距离空程,测量光路减去参考光路相位即得到系统最终的测量位移值为:

$$L = \Delta L_{\text{测}} - \Delta L_{\text{参}} \quad (3)$$

4 实验结果分析

4.1 静止零漂测试

实验系统中激光器波长为 1 064 nm,声光移频器

的衍射效率 $\geq 60\%$,移频频率 400 kHz;偏振分光镜距离激光器 500 mm,测量目标和参考物距离偏振分光镜 100 mm,测量时间 20 min,其结构如图 7 所示。

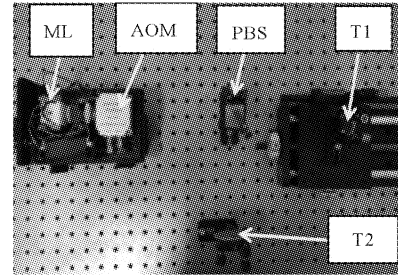


图 7 系统实物图

Fig.7 Physical map of system

为了能更好反应远距离零漂带来的影响,测试了一路激光的零漂值,如图 8 所示,在长时间工作下零漂达到 500 nm,并有继续向下漂的趋势。

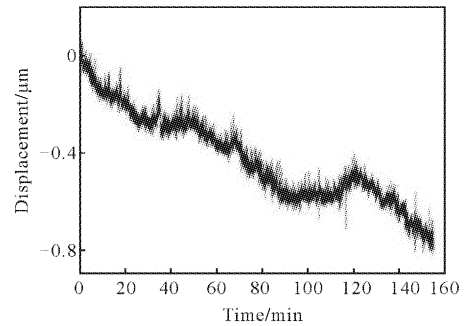


图 8 零漂值

Fig.8 Zero drift value

系统静止零漂的测试结果如图 9 所示。

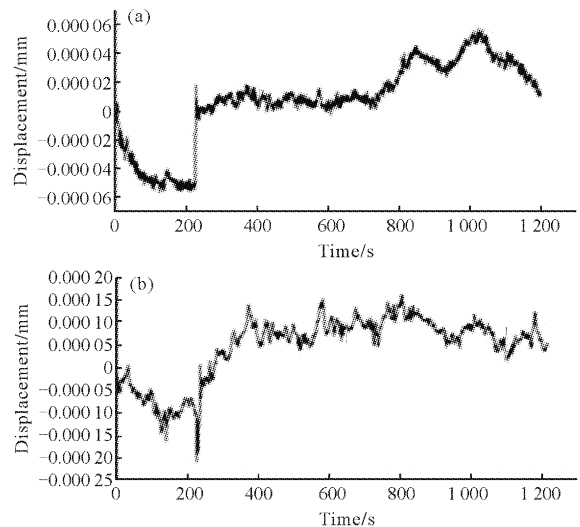


图 9 静止零漂值

Fig.9 Zero drift under static conditions

从图 9(a)可以看到,系统在 20 min 测试时间内,相位卡 1 测试的最大零漂值为 90 nm (-50~40 nm),它反映了光路一和光路三在回馈镜前非共路部分光程的影响。图 9(b)为相位卡 2 的零漂位移值,它反映参考目标和测量目标静止漂移数值,其最大零漂值为 180 nm(-20~160 nm),并且长时间工作后零漂最后趋势稳定。最后相位卡 1 和相位卡 2 作差即可得到补偿后最终结果,如图 10 所示,系统的最大零漂值为 130 nm(-30~100 nm)。这种处理方法会把远程零漂值再减小了将近三分之一,从而提高了仪器的稳定性。

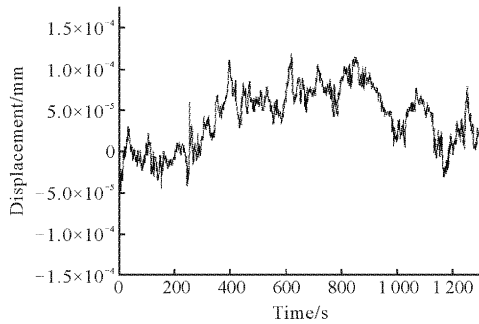


图 10 最终结果
Fig.10 Final result

4.2 比对实验

将正交偏振激光回馈干涉仪和镭测双频激光干涉仪(LH2000)进行测量比对。目标每移动 10 mm 采集一次次数,共移动 160 mm,激光器距目标物距离为 500 mm,实验方案如图 11 所示。利用最小二乘法对采集到的 16 组数据进行线性拟合,得到曲线拟合如图 12 所示,线性拟合方程为:

$$Y=0.99985X-3.1125 \times 10^{-4} \quad (4)$$

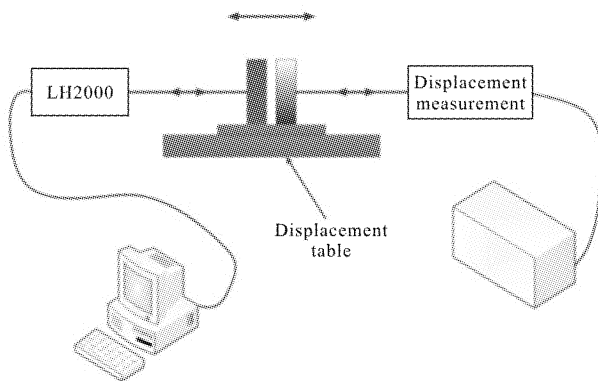


图 11 比对实验
Fig.11 Comparison experiments

将最小二乘法拟合后结果中的预测值与原始测量值进行比对即可得到各点的线性偏差,其公式表示为:

$$Y_i = \frac{\Delta y_{\max}}{|y_{\max} - y_{\min}|} \times 100\% \quad (5)$$

式中: Δy_{\max} 为残差最大值; y_{\max} 和 y_{\min} 分别为 Y_i 的最大值和最小值。从拟合的结果计算得到,正交偏振激光回馈干涉仪工作距离为 160 mm 时,线性度线性度为 0.35×10^{-6} 。

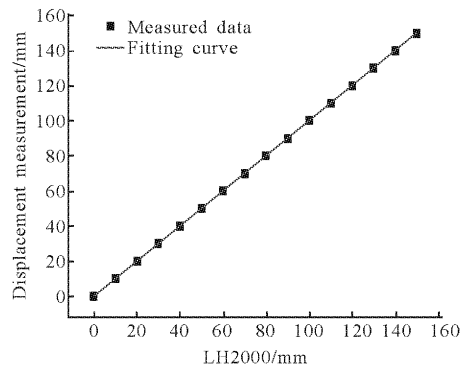


图 12 数据拟合结果
Fig.12 Results of data fitting

4.3 误差分析

从图 11 测试结果中看出正交偏振激光回馈干涉仪和双频激光器呈线性关系,但随着运动距离的增大,测试误差也不断增大,下面对激光回馈干涉仪误差进行分析。

(1) 波长漂移带来的误差

根据波长计测得微片激光器输出波长值,波长误差引起的位移漂移值为:

$$\Delta_1 \approx 10^{-6} \Delta L \quad (6)$$

式中: ΔL 为移动距离。

(2) 环境变化带来的误差

环境的变化会直接影响空气折射率的变化,根据 Ellen 公式,空气折射率 Δn 的表达式为:

$$\Delta n = (-93\delta t + 0.27\delta p - 0.04\delta f) \times \Delta L \quad (7)$$

式中: δt , δp , δf 分别为温度、气压、湿度的测量误差。三者取值 0.1°C , 10 Pa , 10 Pa , 则有误差值为:

$$\Delta_2 \approx 10^{-7} \Delta L \quad (8)$$

最终合成误差为:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\Delta_i)^2} = 10^{-6} \Delta L \quad (9)$$

将数据代入公式(9)得到系统测量误差估值为 $0.16\ \mu\text{m}$ 。

5 结 论

文中提出了一种提高远距离测量位移稳定性的方案,构建了仪器系统,包括正交偏振激光器的设计装配。该系统可以补偿由于光路中环境扰动以及光学器件热蠕动带来的测量误差,零漂的最大值为 $130\ \text{nm}$,与双频干涉仪进行比对,线性度优于 1.64×10^{-6} ,并对测量误差进行分析,得到误差估值为 $0.16\ \mu\text{m}$ 。这种偏振及频率复用的激光回馈干涉仪结构简单、光路串扰小、稳定性好,在工业上具有非常好的应用前景。

参考文献:

- [1] Zhang Shulian. Laser feedback technology and development [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44 (11): 65–71. (in Chinese)
张书练. 激光回馈技术及发展 [J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(11): 65–71.
- [2] Ren C, Zhang S. Diode-pumped dual-frequency microchip Nd:YAG laser with tunable frequency difference [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(15): 155107.
- [3] Silvano Donati. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements [J]. *Laser Photonics Rev*, 2012, 3(6): 393–417.
- [4] Wan Xinjun, Duo Li, Zhang Shulian. Quasi-common-path laser feedback interferometry based on frequency shifting and multiplexing[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(4): 367–369.
- [5] Fei L, Zhang S. The discovery of nanometer fringes in laser self-mixing interference [J]. *Optics Communications*, 2007, 273(1): 226–230.
- [6] Zhu Kaiyi, Guo Bo, Lu Yueyue, et al. Single-spot two-dimensional displacement measurement based on self-mixing interferometry[J]. *Optica*, 2017, 4(7): 729–735.
- [7] 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.
- [8] Kazutaka Abe, Kenju Otsuka, Jing-Yuan Ko. Self-mixing laser Doppler vibrometry with high optical sensitivity: application to real-time sound reproduction [J]. *New Journal of Physics*, 2003, 5: 8.1–8.9.
- [9] Zhang Shulian. Theory of Orthogonal Polarized Laser [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 99–209. (in Chinese)
张书练. 正交偏振激光原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 99–209.
- [10] Zhang Shulian, Holzapfel W. Orthogonal Polarization in Lasers: Physical Phenomena and Engineering Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 145–382. (in Chinese)
- [11] Tan Yidong, Zhang Shulian, Zhang Song, et al. Response of microchip solid-state laser to external frequency-shifted feedback and its applications[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2912.
- [12] Kenju Otsuka, Kazutaka Abe, Jing-Yuan Ko. Real-time nanometer-vibration measurement with a self-mixing microchip solid-state laser [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(15): 1339–1341.
- [13] Zhang Shaohui, Zhang Shulian, Tan Yidong, et al. Common-path heterodyne self-mixing interferometry with polarization and frequency multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4827–4830.
- [14] Zhang Shaohui, Zhang Shulian, Sun Liqun, et al. Spectrum broadening in optical frequency-shifted feedback Nd:YVO₄ microchip laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1593–1596.
- [15] 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.
- [16] Li Jiyang, Niu Yanxiong, Chen Sanbin, et al. Laser diode side-pumped Nd:YVO₄ microchip laser with film-etched microcavity mirrors [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, 34(10): 1787–1792.