

基于激光回馈效应的液晶双折射特性测量

李继扬^{1,2}, 谈宜东¹, 吴季³, 张书练¹

- (1. 清华大学 精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084;
2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;
3. 福建福晶科技股份有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 准确的双折射特性测量对于液晶的实际应用具有重要意义。研究了液晶材料的工作原理, 以激光回馈效应为基础, 搭建了各向异性外腔回馈双折射测量系统, 对不同驱动电压下液晶的双折射特性进行测量。测量结果表明, 各向异性外腔回馈双折射测量系统测量精度在 0.3° 之内; 通过施加 $0\sim 24\text{V}$ 交流电压, 液晶材料双折射率在 $2.74\times 10^{-1}\sim 2.39\times 10^{-3}$ 范围内变化, 对应各向异性呈现出 $460^\circ\sim 5^\circ$ 的大范围位相延迟值。电压范围在 $0.7\sim 2\text{V}$ 时, 电压-双折射率关系表现出较好的线性度, 通过线性拟合对该范围内电压-双折射率关系进行计算, 其线性度优于 95.5% 。液晶材料可以提供稳定的位相延迟, 同一电压值下的位相延迟短期重复性优于 0.52° , 长期重复性优于 4.5° 。

关键词: 液晶材料; 双折射特性; 位相延迟; 激光回馈效应; 各向异性外腔回馈

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0306003

Birefringence measurement of liquid crystals based on laser feedback effect

Li Jiyang^{1,2}, Tan Yidong¹, Wu Ji³, Zhang Shulian¹

- (1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Castech Inc., Fuzhou 350003, China)

Abstract: The precise measurement of the birefringence in the liquid crystals has significant meaning for practical applications. The working principles of the liquid crystals were analyzed. The laser anisotropy external cavity feedback system was built based on the laser feedback effect. The anisotropy of the liquid crystals under different voltages was measured. The measurement results show that the accuracy of the laser anisotropy external cavity feedback system is within 0.3° ; By imposing different voltage from 0 to 24 V, the birefringence changes from 2.74×10^{-1} to 2.39×10^{-3} , corresponding to the large range phase retardation of 460° to 5° . With the voltage in the range of 0.7 V to 2 V, the relationship

收稿日期: 2016-07-11; 修订日期: 2016-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61475082)

作者简介: 李继扬(1990-), 男, 博士生, 主要从事激光精密测量方面的研究。Email: lijijiang@buaa.edu.cn

导师简介: 张书练(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光精密测量方面的研究。Email: zsl-dpi@mail.tsinghua.edu.cn

between the voltage and the birefringence is linear and its linearity is better than 95.5%. The liquid crystals can provide stable phase retardation, the short-term repeatability is better than 0.52° and the long-term repeatability is better than 4.5°.

Key words: liquid crystals; birefringence; phase retardation; laser feedback effect; anisotropy external cavity feedback

0 引言

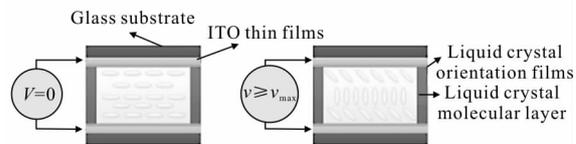
液晶是介于完全规则状态与不规则状态之间的中间态物质。作为一种新型材料,液晶材料被广泛应用于显示和光学调制领域。液晶材料具有类似于晶体的光学各向异性即双折射特性。N. Konforti 等人提出利用向列型液晶制作空间光相位调制器,通过外加电压控制位相延迟的改变^[1]。之后,液晶技术得到了快速的发展。K. Hirabayashi 等人制作了位相延迟随外加电压变化而稳定变化的液晶材料,通过调节上下基片之间电压的大小,位相延迟在 90°~630° 范围内可调^[2]。液晶材料的双折射率大小主要由液晶材料本身性质和驱动电压大小决定,因此液晶材料的双折射量具有可连续调节、调节范围广、响应时间快、无需机械转动、精度高等优点。液晶材料具有高兼容性,可用于光通信系统、偏振光学系统、激光测量系统等^[3-8]。准确测量液晶材料的电压-双折射率关系对于液晶材料的应用具有重要意义。

测量双折射和位相延迟的方法很多,如旋转消光法^[9]、光弹效应法^[10]、旋转检偏法^[11]、椭偏仪法^[12]、偏振干涉法^[13]等,其中大部分测量方法是基于偏振消光和琼斯矩阵原理。为了对液晶材料的双折射率-电压关系进行精确测定,必须在系统测量误差较小的情况下进行实时性好的连续测量。传统的测量方法具有结构复杂、实时性差以及测量结果误差较大等缺点,并不满足液晶材料的测量要求。激光回馈效应又称为激光自混合干涉效应,是指激光器出射的激光,一部分被光路中的物体表面反射或者散射之后,携带外部的特定信息再次返回到激光器内部,对激光器出射的激光特性进行调制的一种物理现象^[14]。这部分重新回射到腔内的光被称为回馈光^[15]。在回馈光的作用下,激光器的光强、偏振态等输出特性均会受到调制^[16]。对于外腔具有各向异性的回馈系统,激光器出射光强变化与外腔各向异性大小相

关^[17]。文中基于激光外腔各向异性回馈特性,搭建了外腔各向异性回馈双折射测量系统,对液晶材料的电压-位相延迟特性和重复性进行了测量。测量结果对于液晶材料的实际应用具有指导作用。

1 液晶双折射的产生机理

文中研究的液晶材料采用沿面排列的向列型结构,为一般显示领域最常用的类型。向列型液晶中的液晶分子呈拉伸状,具有光学各向异性的特性。液晶分子的长轴方向与液晶表面平行,将其定义为液晶材料的慢轴,与其垂直的轴定义为快轴。慢轴方向是液晶分子的指向矢方向。当对液晶材料施加外部电场时,液晶分子的指向矢会发生变化,从而导致双折射率的变化,此即为液晶的电控双折射效应。向列型液晶材料的结构如图 1 所示。未施加外部电场时,沿面排列的液晶分子呈分层相互平行且平行于基片面排列分布;当液晶在外加电场作用下达到平衡状态时,液晶的吉布斯自由能趋向最小值。在施加外部电场时,液晶分子会趋向于垂直基片方向偏转,偏转角度由外界电场决定。



(a) 外界电压为 0 (b) 外界电压到达一定值之后
(a) Driving voltage is 0 (b) Driving voltage reaches certain value

图 1 向列型液晶材料结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of nematic liquid crystal materials

当一束波长为 λ 的线偏振光垂直入射液晶材料表面时,产生的位相延迟 δ 为:

$$\delta = \frac{2\pi d \Delta n}{\lambda} \quad (1)$$

式中: d 为液晶材料的厚度; Δn 为双折射率。如图 1(a)所示,线偏振光垂直基片面入射,当外加电压为零时,双折射率有最大值,即液晶材料具有最大的位相

延迟。当外加电压增加到一定值 V_{max} 时,如图 1(b)所示,液晶层中的液晶分子偏转到光轴垂直于基片表面的位置,此时 $n_o=n_e$,液晶分子层中双折射率 Δn 为零,但由于基片表面的强锚定作用,基片表面的液晶分子并不能偏转到与基片面垂直的位置,因此调制电压并不能让液晶材料整体的双折射率到零。由以上分析可知,当线偏振光垂直入射液晶材料时,随着外加电压逐渐增大,双折射率由最大值逐渐减小到最小值,且最小值不为零,其分别对应位相延迟的最大值和最小值。

2 激光外腔各向异性回馈系统

以激光回馈原理为基础,搭建的各向异性外腔回馈系统装置图如图 2 所示。

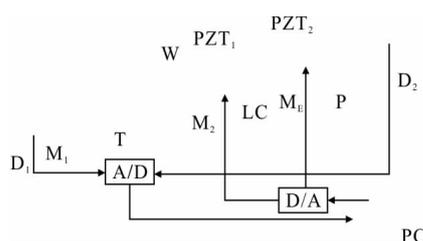


图 2 激光回馈系统装置图

Fig.2 Schematic diagram of laser feedback system

系统中采用出射光波长为 632.8 nm 的半外腔 He-Ne 激光器,充气比为 He:Ne=9:1 以及 Ne²⁰:Ne²²=1:1。M₁和M₂是激光谐振腔镜,反射系数 r_1 及 r_2 分别为 0.999 及 0.994,反射率记为 R_1 和 R_2 。M₁、M₂ 与增透窗片 WP 构成腔长为 130 mm 的半外腔激光器。M_E 为回馈镜,反射系数 r_E 为 0.316,反射率记为 R_E 。M_E 和 M₂ 构成回馈腔长为 150 mm 的回馈外腔,PZT₁ 与 PZT₂ 为 PI 公司生产的压电陶瓷。计算机输出信号经 D/A 转换后放大为压电陶瓷的驱动电压,对 PZT₁ 施加三角波信号,改变 M_E 的位置用于改变回馈腔长,调制光强信号;对 PZT₂ 施加直流电压,改变 M₁ 的位置以保证激光的出光频率位于增益曲线的中心频率处。P 为偏振片(其偏振方向与激光器初始线偏振光的方向垂直),与探测器 D₂ 一起探测激光器的偏振态信号,探测器 D₁ 用于采集激光输出的光强信号,信号经放大、A/D 转换后输入计算机 PC 进行处理计算。LC 为 Thorlabs 公司生产的全波液晶相位延迟器,通光孔径为 10 mm,镀有 350~700 nm 波

段增透膜。

当三角波信号驱动压电陶瓷 PZT₁ 时,PZT₁ 将带动回馈镜 M_E 做线性往复运动,导致外腔长发生变化。随着外腔长的线性变化,激光输出光强将会呈现类似余弦性的变化趋势,且回馈外腔长度每变化 $\lambda/2$,激光强度波动一个周期。当激光外腔中加入液晶材料时,由于液晶材料的双折射作用,外腔在物理上具有两个腔长,相对应激光器的两个本征偏振态,其等效反射率不同,两偏振态的损耗不同,随着回馈镜的调制,使得两个偏振态交替起振,呈现出偏振跳变现象。采集偏振跳变的波形图如图 3 所示。

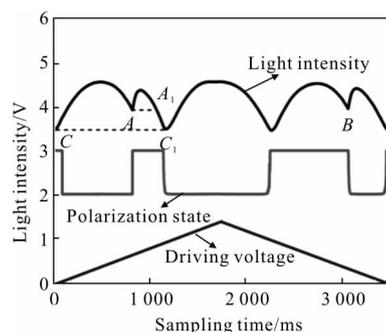


图 3 偏振跳变波形

Fig.3 Polarization flipping waveform

从图 3 中可以看到,在三角波信号上升区间中的 A 点,激光光强信号发生了跳变,相应的偏振态信号也从 o 光方向变换到 e 光方向;同样,在三角波信号下降区间的 B 点,激光光强也发生了变化,偏振态信号从 e 光方向变到 o 光方向。在三角波电压的一个调制周期内, o 偏振态与 e 偏振态会交替出现,其所占周期比与液晶材料的双折射有关。

为了分析激光回馈偏振跳变现象,利用三腔镜模型进行分析。三腔镜模型采用计算等效折射率的方式对激光回馈效应中的物理现象进行解释^[18]。激光器出射光强 E 可以表示为:

$$E = R_1^{1/2} R_2^{1/2} E_0 e^{i2KL} e^{2gL} + (1-R_2) R_E^{1/2} R_1^{1/2} E_0 e^{i2K(L+1)} e^{2gL} = R_1^{1/2} e^{i2KL} e^{2gL} E_0 (R_2^{1/2} + (1-R_2) R_E^{1/2} e^{i2Kl}) \quad (2)$$

式中: L 为激光器的腔长; l 为回馈外腔的长度; E_0 为激光器本身初始的出射光强; R_1 , R_2 和 R_E 为腔镜 M₁, M₂ 和 M_E 的反射率; k 为真空下的波矢数; g 为激光器的增益系数。假设三腔镜等效为二腔镜时,激光器的输出腔镜的等效折射率为 R_{eff} , 其可以表

达为:

$$R_{\text{eff}} = (R_2^{1/2} + (1-R_2)R_E^{1/2} e^{i2KL})^2 = R_2 + 2R_2^{1/2} (1-R_2)(1-R_E)^{1/2} \cos(2KL) + (1-R_2)^4 R_E \quad (3)$$

由于 $R_2 \approx 1$, 忽略高阶项, 则有:

$$R_{\text{eff}} = R_2 + 2R_2^{1/2} (1-R_2)(1-R_E)^{1/2} \cos(2KL) \quad (4)$$

那么, 激光器出射光强 E 可以表示为:

$$E = R_1^{1/2} e^{i2KL} e^{2gL} E_0 E_{\text{eff}} = R_1^{1/2} e^{i2KL} e^{2gL} E_0 R_2 + 2R_1^{1/2} e^{i2KL} e^{2gL} E_0 R_2^{1/2} (1-R_2)(1-R_E)^{1/2} \cos(2KL) \quad (5)$$

从公式(5)中可知, 当腔内没有加入双折射元件时, 在回馈光的作用下, 激光器出射光强受到回馈效应呈现余弦性的周期变化。当加入位相延迟大小为 δ 的双折射元件时, 激光器两个偏振分量的等效折射率为:

$$R_{\text{eff}}^o = R_2 + 2R_2^{1/2} (1-R_2)(1-R_E)^{1/2} \cos(2KL)$$

$$R_{\text{eff}}^e = R_2 + 2R_2^{1/2} (1-R_2)(1-R_E)^{1/2} \cos(2KL + 2\delta) \quad (6)$$

随着激光器回馈外腔长度的变化, 两个偏振分量的等效折射率发生变化, 当其中一个分量的等效折射率高于另一个分量时, 其激光损耗降低, 在腔内优先起振, 随着两个偏振分量等效折射率的不断变化, 激光器的出射激光光强曲线中发生偏振跳变现象。其计算公式可以表示为:

$$\delta = \frac{l_{AA_1}}{l_{CC_1}} \times 180^\circ \quad (7)$$

为验证激光外腔各向异性回馈系统测量双折射元件的精度, 利用一套标准波片进行校准, 校准结果如表 1 所示。

表1 标准波片校准结果(单位: (°))

Tab.1 Results of standard wave plates (Unit:(°))

Number	1	2	3	4	5
Ellipsometer	69.48	83.81	97.19	128.97	138.19
Laser feedback system	69.59	83.60	97.37	128.85	138.47
Measurement deviation	0.11	-0.21	0.18	-0.12	0.28

从校准结果中可知, 各向异性外腔回馈双折射测量系统测量精度在 0.3° 之内, 可以满足液晶材料双折射的精确测量。

3 液晶材料双折射测量结果及分析

在室温为 19°C 进行测试, 为避免液晶层的电荷分离和累积, 采用频率为 2000 Hz 的方波对液晶材料进行驱动。对液晶材料的电压-双折射率曲线进行测量, 得到的结果如图 4 所示。

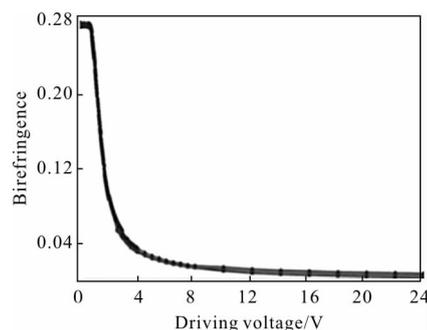


图 4 液晶材料在不同电压下相位延迟测量结果

Fig.4 Phase retardation under different voltages of liquid crystals

从图 4 中曲线可以看出, 液晶材料存在阈值电压(约 0.7 V)。当外部电压小于阈值电压时, 液晶材料的双折射率保持最大值不变, 对应产生最大的位相延迟。外部电压超过阈值电压之后, 随着电压逐渐升高到 2 V , 液晶材料的双折射率迅速下降并随电压变化呈现较好的线性关系, 对该段曲线进行线性拟合, 拟合的结果如图 5 所示。

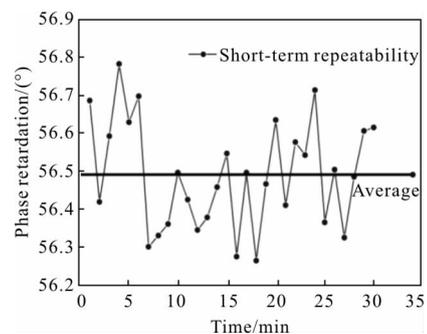


图 5 液晶材料电压与双折射特性线性拟合的结果

Fig.5 Linear fitting result of the relationship between birefringence and voltage

通过线性拟合可知, 在此范围内的电压-双折射率曲线线性度优于 95.5% , 此时液晶材料的驱动电压低, 调节线性度高; 电压升高到 2 V 之后, 双折射率随电压升高缓慢减小直到一个接近于 0 的最小值, 曲线趋于平缓, 对应最小的位相延迟。实验结果与理论分析一致。根据图 4 中的曲线, 通过施加 $0\sim$

24 V 交流电压,随着外界电压的改变,双折射率在 $2.74 \times 10^{-1} \sim 2.39 \times 10^{-3}$ 范围内变化,位相延迟呈现出 $460^\circ \sim 5^\circ$ 的大范围变化。三条曲线重合性较好,说明液晶材料工作较为稳定,长期性能良好。

当实际应用液晶材料时,其位相延迟的短期重复性对应用具有很大的影响。为了确定液晶材料是否可以在短期内提供稳定的位相延迟,对外部电压为 3.8 V 时液晶材料 30 min 内的短期重复性进行了测试。测试结果如图 6 所示。

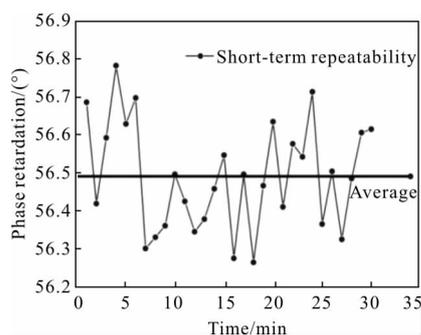


图 6 液晶材料双折射特性短期重复性测量结果

Fig.6 Short-term repeatability of birefringence in liquid crystals

由图 6 可知在短期(30 min)内液晶材料双折射特性重复性良好,最大误差不超过 0.52° ,方差为 0.02。为了研究不同外界环境条件下液晶材料的短期重复性,在外部电压为 3.8 V 时对其进行了五组不同外界环境温度下的测量,其测试数据的均值与方差如表 2 所示。

表 2 不同环境下液晶材料位相延迟短期重复性测量结果(单位: $^\circ$)

Tab.2 Short-time repeatability of phase retardation in liquid crystals under different environments(Uint: $^\circ$)

Mean value	60.91	57.11	56.51	56.74	58.25
Mean square deviation	0.002 2	0.036 4	0.062 2	0.048 6	0.031 5

由表 2 可以看出液晶材料双折射特性短期重复性很好,但是不同环境下其位相延迟的值发生了微小的变化,长期稳定性优于 4.5° 。这说明,由液晶材料本身重复性引起的误差可以满足精准的要求,但由于其随着外部环境变化产生的位相延迟偏移,需要对其进行校准才可以减小误差。

4 结 论

液晶材料具有驱动电压低、响应时间快、无需机械调整等优点。文中搭建了激光外腔各向异性回馈系统,实现了液晶材料的双折射特性的精密测量,实验结果表明,通过施加 0~24 V 交流电压,随着外界电压的改变,液晶材料的双折射率在 $2.74 \times 10^{-1} \sim 2.39 \times 10^{-3}$ 范围内变化,对应提供 $460^\circ \sim 5^\circ$ 连续可调、稳定性良好的位相延迟,同一电压值下的位相延迟短期重复性优于 0.52° ,长期重复性优于 4.5° ,表明液晶材料的相位延迟值对于外界环境的变化比较敏感。对于液晶材料的实际应用具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Konforti N, Wu S T, Marom E. Phase-only modulation with twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators [J]. *Optics Letters*, 1988, 13(3): 251-253.
- [2] Hirabayashi K. Electrically controllable liquid-crystal rotatable wave plate with variable phase retardation [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(17): 3552-3559.
- [3] Ding Haibing, Pang Wenning, Liu Yibao, et al. Photon polarization modulation with liquid crystal variable retarder [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(9): 1397-1399. (in Chinese)
丁海兵, 庞文宁, 刘义保, 等. 液晶相位可变延迟器对光偏振态的调制[J]. *光子学报*, 2006, 35(9):1397-1399.
- [4] Zhang Ying, Zhao Huijie, Zhou Pengwei, et al. Photoelectric characteristics of liquid crystal variable retarder [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2009, 28(3): 17-20. (in Chinese)
张颖, 赵慧洁, 周鹏威, 等. 液晶相位可变延迟器的光电特性研究[J]. *国外电子测量技术*, 2009, 28(3): 17-20.
- [5] Wang Wei, Li Guohua, Xue Dong. A study of voltage-dependent electric-control birefringence of liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(7): 970-972. (in Chinese)
王伟, 李国华, 薛东. 液晶电控双折射率与电压关系的研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(7): 970-972.
- [6] Zhang Hongxin, Zhang Jian, Wu Liying, et al. Wavefront correction using liquid crystal spatial light modulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1062-1065. (in Chinese)
张洪鑫, 张健, 吴丽莹, 等. 液晶空间光调制器用于波前校正的研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 1062-1065.

- [7] Tong Qing, Rong Xing, Zhang Xinyu, et al. Large-area arrayed liquid crystal device for measuring and regulating polarization state of incident light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 474-478. (in Chinese)
佟庆, 荣幸, 张新宇, 等. 用于测量和调控入射光偏振态的大面积阵列液晶器件 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 474-478.
- [8] Pei Yanbo, Yao Fengfeng, Sun Xiudong. Light controlled permanent gratings in nematic liquid crystals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 261-264. (in Chinese)
裴延波, 姚凤凤, 孙秀冬. 向列液晶中的光控永久光栅 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 261-264.
- [9] 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)
张志勇, 邓元勇, 王东光, 等. 几种波片位相延迟测量方法的比较 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1678-1685.
- [10] Hu Jianming, Zeng Aijun, Wang Xiangchao. New method for measuring retardation of quarter-wave plate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(5): 659-662. (in Chinese)
胡建明, 曾爱军, 王向朝. 精确测量 1/4 波片相位延迟量的新方法 [J]. 中国激光, 2006, 33(5): 659-662.
- [11] Wang Lan, Li Guohua, Kong Chao, et al. Phase retardation measurement with two $\lambda/4$ wave plates [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6): 663-664. (in Chinese)
王兰, 李国华, 孔超, 等. 波片位相延迟测量的双 $\lambda/4$ 波片法 [J]. 激光技术, 2007, 31(6): 663-664.
- [12] 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.
- [13] Xiao Haosu, Zhang Yunqiang, Fan Zhigang, et al. Precision analysis of polarization interference method for measuring stress birefringence of crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 271-276. (in Chinese)
肖昊苏, 张运强, 范志刚, 等. 偏振干涉法测量晶体应力双折射精度分析 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 271-276.
- [14] Zhang Shulian. Principle of Orthogonally Polarized Laser [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
张书练. 正交偏振激光原理 [M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2005.
- [15] Zhang S, Holzapfel W. Orthogonal Polarization in Lasers: Physical Phenomena and Engineering Applications [M]. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [16] Tan Yidong, Zhang Song, Zhang Shulian, et al. Response of microchip solid-state laser to external frequency-shifted feedback and its applications [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(10): 2912.
- [17] Fei Ligang, Zhang Shulian, Wan Xinjun. Influence of optical feedback from birefringence external cavity on intensity tuning and polarization of laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, 21(10): 1944.
- [18] King P G R, Steward G J. Metrology with an optical maser [J]. *New Sci*, 1963, 17: 180-182.