

激光与光电子学进展

激光回馈双折射测量系统稳定性能优化

王健, 吴爱华*, 邓勇

南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019

摘要 在激光回馈原理的基础上, 搭建了一套双折射元件测量系统, 双折射元件为光学系统中使用广泛的 1/4 波片, 对其相位延迟进行了测量。为了进一步改善系统的稳定性, 对系统中的光源 He-Ne 激光器引入了温度稳频的方式, 尝试通过控制激光器谐振腔的温度来控制谐振腔腔长的改变, 使激光器长时间稳定工作在单纵模状态下, 这种稳频方式可使 He-Ne 激光器的频率稳定度达到 10^{-7} , 符合激光回馈测量的使用要求。最后, 同一系统分别采用未稳频和温度稳频两种不同的方式, 对 1/4 波片进行 10 次相位延迟量的测量, 实验结果表明, 未经稳频的系统 10 次重复测量的最大偏差为 1.29° , 标准差为 0.47° , 经过温度稳频后 10 次重复测量最大偏差为 0.83° , 标准差为 0.29° , 稳频后, 系统的稳定性得到改善。

关键词 测量; 激光回馈; 1/4 波片; 温度稳频; 偏振跳变

中图分类号 TN248.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222199

Stability Optimization of Laser Feedback Birefringence Measurement System

Wang Jian, Wu Aihua*, Deng Yong

School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, Jiangsu, China

Abstract In this paper, a set of birefringent element measurement systems is constructed based on the principle of laser feedback and measures the phase delay of the birefringent element, which is a 1/4 wave plate widely used in the optical system. The temperature frequency stabilization method was introduced into the system's He-Ne laser light source to improve further the stability of the system. The temperature of the laser cavity was controlled by changing the cavity length, thereby making the laser work steadily in the single longitudinal mode for a long time. Moreover, this frequency stabilization method attained a frequency stability of 10^{-7} for the He-Ne laser, thus meeting the laser feedback measurement requirements. The phase delay of the 1/4 wave plate was measured herein for 10 times in two different ways, unsteadiness and temperature stabilization, using the same system. The experimental results show that the maximum deviation of the 10 repeated system measurements without frequency stabilization is 1.29° and the standard deviation is 0.47° . In contrast, the maximum deviation of 10 repeated measurements reduces to 0.83° and the standard deviation to 0.29° after the temperature stabilization. Hence, it is concluded that the stability of the system greatly improves with frequency stabilization.

Key words measurement; laser feedback; 1/4 wave plate; temperature frequency stabilization; polarization jump

1 引言

1/4 波片通常由方解石、石英晶体等双折射晶体制成, 常用于光学系统中, 用来改变光的偏振态, 它可以把线偏振态的光变为椭圆偏振态, 亦可将椭圆偏振光变为线偏振光。目前, 对 1/4 波片相位延迟量的测量方法有很多, 常见的有移相法^[1]、椭圆测量法^[2]、频率

分裂法^[3-4]等, 移相法需要借助高精度的标准波片进行相位补偿。椭圆测量法受波长的限制, 只能测量一定波长范围内的相位延迟。频率分裂法是测量波片的国家标准, 使用该方法进行测量, 被测元件需要镀上相应的增透膜, 因而适合用来作为校准装置, 但无法进行在线测量。

本文基于激光回馈^[5]的原理, 搭建了一套测量 1/4

收稿日期: 2022-08-02; 修回日期: 2022-08-30; 录用日期: 2022-09-08; 网络首发日期: 2022-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(61775118)

通信作者: *wu.ah@ntu.edu.cn

波片相位延迟量的测试系统,将 1/4 波片放入系统的回馈外腔中并旋转波片,当波片的快慢轴与激光束的偏振方向相同时,会产生偏振跳变现象^[6],通过这一现象可以得出波片的相位延迟量。实验系统中需要激光器作为光源,根据最新的相关文献报道,科研人员已经研制出了许多新型激光器,包括激光二极管泵浦的瓦级主动调 Q 翠绿宝石激光器^[7]、小型全光纤耦合非平面环形腔固体激光器^[8]、光子晶体垂直腔面发射激光器^[9]等。本文实验选用 He-Ne 激光器作为光源,为了保证 He-Ne 激光器在长时间工作中的稳定性,对系统中既充当光源,又作为测量工具的 He-Ne 激光器的谐振腔进行了温度控制,即温度稳频的方式,以此来保证激光器长时间稳定地工作在单一纵模状态下。整个测量系统和稳频系统相结合,有效提高了系统在测量过程中的稳定性。

2 实验

2.1 系统结构

图 1 为温度稳频 He-Ne 激光回馈双折射测量系统示意图,整个系统涉及到的元件有光电探测器 D_1 、 D_2 , D_1 用来探测回馈端信号, D_2 用来接收偏振态信号。全内腔 He-Ne 激光器,中心波长为 632.8 nm,输出线偏振光。谐振腔由平凹腔组成,平面镜端输出功率为 1.02 mW,凹透镜端输出功率为 0.03 mW,腔长为 144 mm。为了避免引起兰姆凹陷现象^[10-11],在谐振腔内充入 Ne 同位素,He 和 Ne 的气体压强比例为 He:Ne=7:1 和 Ne²⁰:Ne²²=1:1。多级石英 1/4 波片,直径为

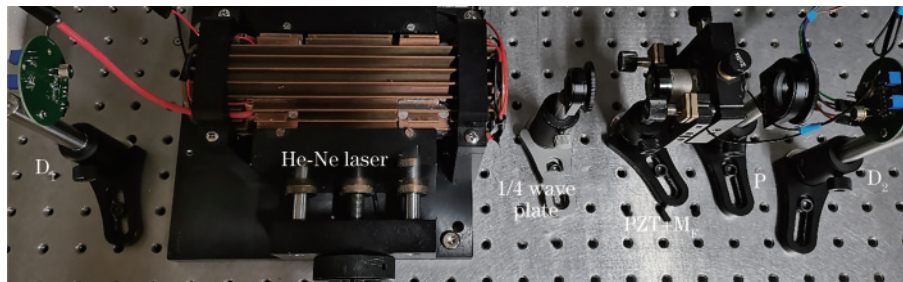


图 2 系统实物图

Fig. 2 Physical diagram of the system

在测量之前,首先需要通过稳频系统对 He-Ne 激光器进行温度稳频,通过调节外界环境温度^[13],确定 He-Ne 激光器的稳频温度,然后通过计算机控制温控器对激光器进行温度稳频,待激光器谐振腔温度稳定后,再进行测量。当回馈外腔中没有放入 1/4 波片时,回馈外腔为各向同性腔,压电陶瓷 PZT 由计算机通过数/模(D/A)转换,推动回馈镜来回伸缩,改变回馈外腔的长度,回馈镜移动半个波长,光强波动变化一个周期^[14]。将光电探测器 D_1 、 D_2 接入示波器, D_1 接收到如图 3 所示的类余弦波形,由于偏振态没有变化,光电探测器 D_2 为一条直线。在回馈外腔中放入 1/4 波片,由

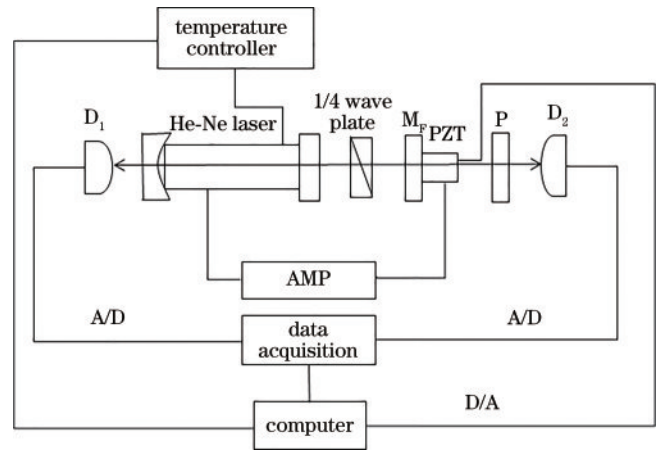


图 1 温度稳频 He-Ne 激光回馈双折射测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature stabilized frequency He-Ne laser feedback birefringence measurement system

12.7 mm。 M_F 为回馈镜,其反射率为 10%,透过率为 90%,直径为 12.7 mm,厚度为 3 mm,它将 He-Ne 激光器发出的部分光反射回激光器谐振腔^[12]中重新进行调制。PZT 为筒状压电陶瓷,直径和长度均为 20 mm,回馈镜和 PZT 粘连在一起。P 为直径 25.4 mm、消光比为 5:5 的偏振片。AMP 为多功能电箱,用来给 He-Ne 激光器、PZT 提供电源,温控器用来控制 He-Ne 激光器的谐振腔温度、数据采集卡用来采集信号,计算机主要用来控制 He-Ne 激光器的稳频以及对数据采集卡采集到的信号进行信号处理。

系统实物图如图 2 所示。

于 1/4 波片双折射元件的性质,此时的回馈外腔变为各向异性腔,激光束通过 1/4 波片后被分为寻常光(o 光)和非寻常光(e 光),然后旋转波片,当波片的快慢轴方向与激光束的偏振态方向重合时^[15],发生偏振跳变现象,此时,光电探测器 D_1 接收到的类余弦波形变为 1/4 波片偏振跳变波形,如图 4 所示。激光束通过偏振片 P,由于偏振片只允许与其偏振方向相同的光通过,所以光电探测器 D_2 由刚开始的一条直线变为高低电平相互转变的类似方波的图形。将光电探测器 D_1 、 D_2 接收到的信号,通过 A/D 转换送入数据采集卡,数据采集卡将采集到的信号送入计算机进行信号处理。

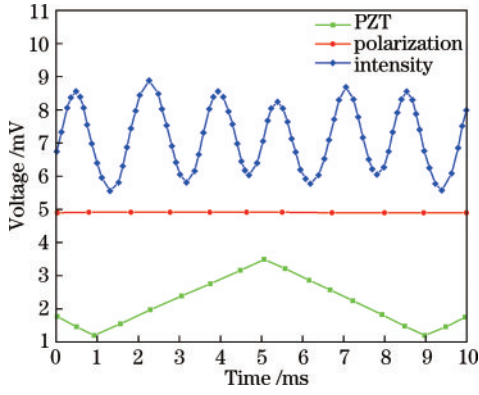


图3 各向同性腔中激光回馈波形图

Fig. 3 Laser feedback waveform in isotropic cavity

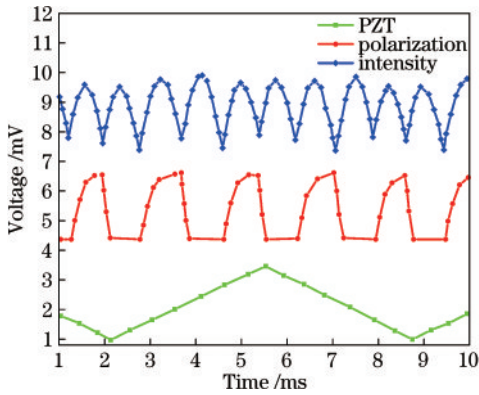


图4 1/4波片偏振跳变图

Fig. 4 Polarization jump diagram of 1/4 wave plate

2.2 1/4波片的相位延迟

图5为偏振跳变示意图,在一个偏振跳变周期内,周期为 2π ^[16],A和D是一个周期内的最低点,B点偏振跳变点,C点和B点等高。激光束在经过1/4波片后,通过回馈镜反射,部分光被反射进入He-Ne激光器谐振腔内进行重新调制,故激光束在回馈外腔中两次经过1/4波片,B、C两点之间相位延迟量为回馈外腔相位延迟 δ 的2倍,即 2δ 。相位延迟量与偏振跳变点的关系可表示为

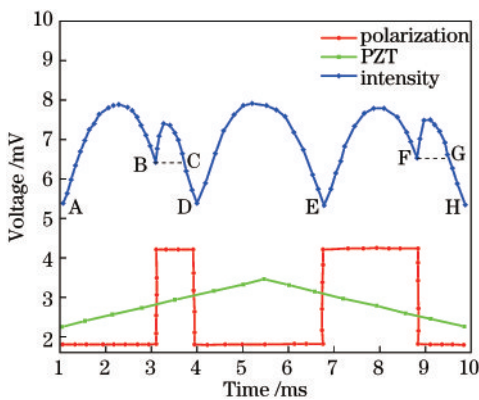


图5 偏振跳变示意图

Fig. 5 Schematic diagram of polarization jump

$$\delta = \frac{l_{BC}}{l_{AD}} \times \pi. \quad (1)$$

3 He-Ne激光器温度稳频原理及结构

3.1 理论分析

He-Ne激光器在长时间的激光回馈测量工作条件下,由于谐振腔内温度的变化,谐振腔长发生改变,从而出现频率漂移现象^[17],不同序数的纵模进入到He-Ne激光器的出光带宽内,形成振荡。而利用激光回馈原理进行双折射元件测量则要求激光器工作在单一纵模条件下,因此频率漂移现象会严重影响到激光回馈测量系统的稳定性和测量结果的准确度。为了提升激光器的稳定性,延长激光器稳定工作时间,需要对He-Ne激光器进行稳频,使其长时间稳定地工作在单纵模条件下,从而保证整个测量系统的稳定性。由激光谐振条件^[18-19]可知,激光器谐振腔长 L 和激光谐振频率 ν_q 的关系为

$$\nu_q = \frac{c}{2L} q, \quad (2)$$

式中: c 为光速; q 为纵模序数。对式(2)腔长 L 和谐振频率 ν 进行微分,省略谐振频率下标 q ,整理可得

$$\frac{d\nu}{\nu} = \left| \frac{dL}{L} \right|. \quad (3)$$

从(3)式可以知道,激光频率随着腔长的变化而改变,而腔长的变化主要与谐振腔管体温度变化有关,腔长 L 和谐振腔温度 T 的关系,可表示为

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T, \quad (4)$$

式中: ΔL 为腔长变化量; ΔT 为谐振腔温度变化量; α 为激光器谐振腔管壳的线性膨胀系数,本文实验中使用的激光器谐振腔管壳由石英玻璃制成,故取其线性膨胀系数 $\alpha = 5.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。将式(4)改写为

$$\left| \frac{\Delta\nu}{\nu} \right| = \left| \frac{\Delta L}{L} \right| = \alpha \cdot \Delta T. \quad (5)$$

He-Ne激光器的频率稳定度达到 10^{-6} ,就能够满足在激光回馈测量中的使用要求。本文通过温度稳频可以使He-Ne激光器的频率稳定度达到 10^{-7} 。为使激光器的频率稳定度达到 10^{-7} ,需要将激光器的谐振腔温度变化控制在 $0.182 \text{ } ^\circ\text{C}$ 以内。

3.2 温度稳频机械结构

He-Ne激光器温度稳频的机械结构如图6所示,主要由套筒、端盖、压盖、半导体制冷器(TEC)、He-Ne激光器等组成。为了避免外界环境的干扰,对激光器用和套筒之间用了有机硅灌封胶进行了灌装处理,同时又要保证激光器与外界保持良好的热交换能力,因此系统的套筒、端盖、压盖选用紫铜制成,其导热性优于其他金属、容易加工。TEC是稳频系统的加热器件,由温控器和上位机进行控制,用来对激光器进行升温或降温。

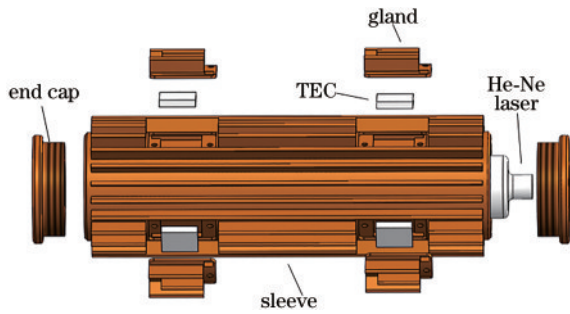


图 6 He-Ne 激光器温控系统机械结构图

Fig. 6 Mechanical structure of He-Ne laser temperature control system

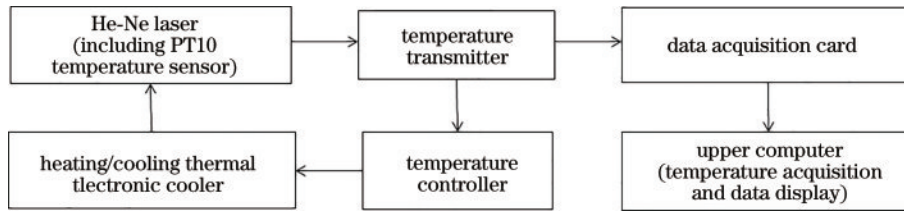


图 7 He-Ne 激光器温控系统流程图

Fig. 7 Flow chart of He-Ne laser temperature control system

4 实验结果及分析

为了对比温度稳频前后系统测量的稳定性,将 1/4 波片分别在未稳频和温度稳频条件下进行 10 次重复测量,稳频测量实验时,环境温度为 19.4 °C,将 He-Ne 激光器的稳频调节温度设置为 45 °C,稳频温度与环境温度温差为 25.6 °C,系统的稳频效果最佳^[23]。

图 8 为 He-Ne 激光器谐振腔温度变化曲线。

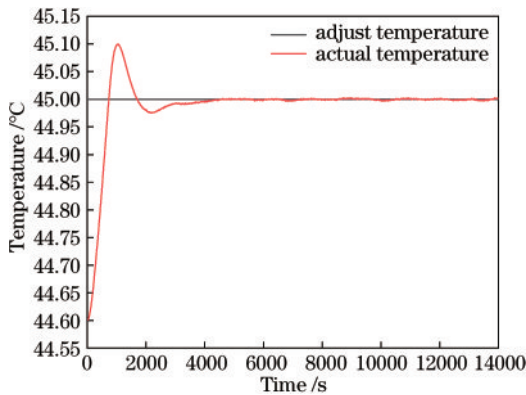


图 8 He-Ne 激光器谐振腔温度变化图

Fig. 8 Temperature change diagram of He-Ne laser resonator

由图 8 可知,He-Ne 激光器的稳频温度为 45 °C,经过约 50 min,He-Ne 激光器达到稳频温度,之后,在 3 h 内,He-Ne 激光器谐振腔温度变化不超过 0.025 °C,满足上述理论分析条件。稳频后,对 1/4 波片的相位延迟进行测量,为了验证温度稳频的系统测量的稳定性,对 1/4 波片进行了多次重复测量,并且与没有进行温度稳频的系统的测量结果进行了对比。测量结果如表 1 所示。

对 He-Ne 激光器谐振腔内的温度进行精准控制 是保证激光器稳定工作的关键。图 7 为稳频系统流程图,首先利用温度传感器 PT100^[20-22] 将 He-Ne 激光器的温度所对应的电阻信号传送给温度变送器,然后经温度变送器对其进行信号处理,将输出电压信号和温控器控制的 He-Ne 激光器谐振腔温度所对应的电压信号进行比较,从而控制 TEC 进行升温或降温操作。同时,温度变送器输出的电压信号也被送至数据采集卡,最后由上位机进行温度采集和记录数据。通过这种方式来确保 He-Ne 激光器谐振腔内温度的相对稳定。

表 1 稳频前后 1/4 波片相位延迟

Table 1 Phase delay of 1/4 wave plate before and after frequency stabilization

Number of test	Phase delay of 1/4 wave plate after frequency stabilization / (°)	Phase delay of 1/4 wave plate before frequency stabilization / (°)
1	89.13	89.24
2	89.40	89.71
3	89.28	89.26
4	89.48	89.77
5	88.79	88.51
6	88.65	88.48
7	89.32	89.24
8	89.22	89.26
9	88.71	88.57
10	89.14	88.87
Average value	89.11	89.09
Standard deviation	0.29	0.47

测量结果表明:测量之前没有稳频的系统对波片进行 10 次重复测量,最大测量偏差为 1.29°,标准差为 0.47°;经过温度稳频的系统,10 次重复测量最大偏差为 0.83°,标准差为 0.29°,标准差降低了 38%。温度稳频后系统测量的稳定程度得到了有效提高。

5 结 论

通过对 He-Ne 激光器进行温度稳频,He-Ne 激光器的谐振腔温度变化不超过 0.025 °C,达到了 He-Ne 激光器在激光回馈测量当中的使用要求,有效提升了系统的稳定性,延长了系统的工作时间,为系统进行实时测量提供了可能。然后,对 1/4 波片进行了相位延

迟的测量,测量结果表明其重复测量的最大偏差为 0.83° , 标准差为 0.29° , 比未稳频的系统更加稳定。激光回馈双折射测量系统和激光器温度稳频系统相结合,为激光回馈双折射测量系统朝着仪器化方向发展提供了可能。

参 考 文 献

- [1] 严明, 高志山. 移相法测量波片的相位延迟量[J]. 光子·激光, 2005, 16(2): 183-187.
Yan M, Gao Z S. Phase shifting method for measuring the phase retardation of wave plates[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2005, 16(2): 183-187.
- [2] 赵培, 吴福全, 郝殿中, 等. $1/4$ 波片延迟量的相位调制椭圆偏测量法[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 379-382.
Zhao P, Wu F Q, Hao D Z, et al. Measurement of the delay of the quarter-wave plate by phase-modulated ellipsometry[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 379-382.
- [3] Yang S, Zhang S L. The frequency split phenomenon in a He-Ne laser with a rotational quartz plate in its cavity [J]. Optics Communications, 1988, 68(1): 55-57.
- [4] Liu W X, Liu M, Zhang S L. Method for the measurement of phase retardation of any wave plate with high precision[J]. Applied Optics, 2008, 47(30): 5562-5569.
- [5] Fei L G, Zhang S L, Li Y, et al. Polarization control in a He-Ne laser using birefringence feedback[J]. Optics Express, 2005, 13(8): 3117-3122.
- [6] 牛海莎, 祝连庆, 刘宁. 基于傅里叶变换相位提取法的激光回馈应力测量系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1954-1959.
Niu H S, Zhu L Q, Liu N. Laser feedback stress measurement system based on Fourier transform phase extraction method[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 1954-1959.
- [7] 王景冲, 关晨, 刘兆军, 等. 激光二极管泵浦的瓦级主动调Q翠绿宝石激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(13): 1301001.
Wang J C, Guan C, Liu Z J, et al. LD pumped watt-level actively Q-switched alexandrite laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(13): 1301001.
- [8] 孙广伟, 辛国锋, 朱韧, 等. 小型全光纤耦合非平面环形腔固体激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(13): 1301002.
Sun G W, Xin G F, Zhu R, et al. Compact all fiber coupled nonplanar ring oscillator solid-state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(13): 1301002.
- [9] 潘智鹏, 李伟, 戚宇轩, 等. 光子晶体垂直腔面发射激光器的设计分析[J]. 光学学报, 2022, 42(14): 1414002.
Pan Z P, Li W, Qi Y X, et al. Design and analysis of photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1414002.
- [10] Seta K T, Iwasaki S. Frequency stabilization of a He-Ne laser using a thin film heater coated on the laser tube[J]. Optics Communications, 1985, 55(5): 367-369.
- [11] Moses E I, Tang C L. High-sensitivity laser wavelength-modulation spectroscopy[J]. Optics Letters, 1977, 1(4): 115-117.
- [12] 曾明, 丁金星. 外腔式 He-Ne 激光器的偏振特性[J]. 激光技术, 1992, 16(1): 21-29.
Zeng M, Ding J X. Polarization characteristics of external cavity He-Ne lasers[J]. Laser Technology, 1992, 16(1): 21-29.
- [13] Diao X F, Tan J B, Hu P C, et al. Frequency stabilization of an internal mirror He-Ne laser with a high frequency reproducibility[J]. Applied Optics, 2013, 52(3): 456-460.
- [14] 邓勇, 宋健军, 汪晨旭, 等. 激光回馈双折射测量系统稳频技术研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1217007.
Deng Y, Song J J, Wang C X, et al. Research on frequency stabilization of laser feedback birefringence measurement system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1217007.
- [15] 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): 583, 663-664.
Wang L, Li G H, Kong C, et al. Phase retardation measurement with two $\lambda/4$ wave plates[J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 583, 663-664.
- [16] 刘名, 张书练, 刘维新. 激光回馈波片位相延迟测量的误差源及消除方法[J]. 应用光学, 2008, 29(6): 961-966.
Liu M, Zhang S L, Liu W X. Error source and its elimination in phase retardation measurement of wave plate based on laser feedback[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(6): 961-966.
- [17] 张书练. 正交偏振激光原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Zhang S L. Principle of orthogonal polarization laser[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [18] 梁晶, 龙兴武. 双纵模 He-Ne 激光器的拍频稳定度分析[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1301-1304.
Liang J, Long X W. Stability analysis of beat frequency in double-longitudinal-mode He-Ne laser[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1301-1304.
- [19] 任利兵, 丁迎春, 周鲁飞, 等. 弹性加力中频差 He-Ne 塞曼-双折射双频激光器及稳频[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 814-817, 825.
Ren L B, Ding Y C, Zhou L F, et al. Mid-frequency difference He-Ne Z-B laser with elastic force-exerting and its frequency stabilization[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 814-817, 825.
- [20] 薛军, 令维军. 基于快速半导体可饱和吸收镜的高功率锁模皮秒掺钛蓝宝石激光器[J]. 激光杂志, 2017, 38(7): 10-12.
Xue J, Ling W J. High power mode-locked picosecond Ti: sapphire laser based on fast SESAM[J]. Laser Journal, 2017, 38(7): 10-12.
- [21] 任晓丹. 基于 LabVIEW 的 Pt1000 自动测试与配对系统设计[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(7): 102-104.
Ren X D. Design of automatic test and pair system for Pt1000 based on LabVIEW[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(7): 102-104.
- [22] 何巍. 基于虚拟仪器的温度测量系统[J]. 山西电子技术, 2011(4): 8-9.
He W. Temperature measurement system based on virtual instrument[J]. Shanxi Electronic Technology, 2011(4): 8-9.
- [23] 缪鑫, 王琦, 邓勇, 等. 基于温度闭环反馈的 He-Ne 激光器热稳频系统[J]. 激光技术, 2022, 46(6): 755-759.
Miao X, Wang Q, Deng Y, et al. Thermal frequency stabilization system of He-Ne laser based on temperature closed-loop feedback[J]. Laser Technology, 2022, 46(6): 755-759.