

He-Ne 双折射塞曼双频激光器的等光强稳频研究

田振国¹, 张立¹, 张书练²

(1. 北京林业大学理学院, 北京 100083;

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: 在精密测量领域, He-Ne 激光器是制造激光干涉仪的首选光源, 因波长作为测量的“尺子”, 激光器的频率稳定性至关重要。介绍了双频激光器的稳频技术原理, 利用调谐腔中平行光和垂直光的等光强点作为稳频点, 以光强平衡为依据设计热伺服控制电路, 采用数字和模拟电路共同控制, 实现了 He-Ne 双折射塞曼双频激光器的频率稳定。对大频差 (7.95 MHz) 的双频激光器进行拍频测试, 单次频率稳定度达 10^{-9} 量级, 重复多次多日测量, 频率不确定度达 1.074×10^{-8} ($k=2$)。同时对频差稳定度进行测试, 频差波动范围在 8 kHz 以内, 相对偏差度为 0.001, 完全达到商用双频干涉仪的标准。

关键词: 双折射-塞曼; 双频; 等光强法; 稳频

中图分类号: TN248.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0505001

Isocandela points frequency stabilization in He-Ne Zeeman-birefringence dual-frequency lasers

Tian Zhenguo¹, Zhang Li¹, Zhang Shulian²

(1. School of Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the field of precision measurement, He-Ne lasers are the prior choice to manufacture laser interferometer, which takes the wavelength as the scale in measurement. Therefore, the frequency stability is of great significance. The theories of frequency stabilization in dual-frequency lasers was studied and the isocandela points of the parallel and vertical light were utilized as frequency stabilization points. By designing thermal servo control circuit based on light intensity balance and controlling in both analog and digital methods, the frequency stabilization in Zeeman-birefringence He-Ne dual-frequency lasers was accomplished. Beat frequency experiments were carried on a Zeeman-birefringence He-Ne laser with 7.95 MHz frequency difference, the frequency stability index can reach the level of 10^{-9} . The uncertainty in frequency was better than 1.074×10^{-8} ($k=2$) in repeated measurements. Meanwhile, the stability of the frequency difference was measured. The variation of the frequency difference was within 8 kHz and the relative deviation was 0.001, which can totally meet the demands of commercial dual-frequency laser interferometers.

Key words: Zeeman-birefringence; dual-frequency; isocandela points; frequency stabilization

收稿日期: 2015-09-07; 修订日期: 2015-10-11

基金项目: 国家重大专项(2009ZX02208-009)

作者简介: 田振国(1992-), 男, 硕士生, 主要从事激光与光电方面的研究。Email: tianzhenguo_bjfu@163.com

导师简介: 张立(1974-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电工程方面的研究。Email: zlbeil@163.com

0 引言

He-Ne 双频激光干涉仪是十分重要的精密测量仪器,被广泛用于先进制造行业和纳米技术领域作为距离测量、速度测量、振动测量、形貌测量、实时位置测控等^[1-2]。其原理是以激光波长作为“尺子”,利用光干涉的原理来测定各种物理量,因此频率的稳定性直接影响了测量的精度。He-Ne 激光器的主要的稳频方法有:兰姆凹陷稳频法、饱和吸收稳频法(反兰姆凹陷)、塞曼效应稳频法和等光强法稳频等^[3]。对于具体不同结构的激光器,有其相适合的稳频方法。如饱和吸收法需要压电陶瓷并且后续处理电路复杂而不适于小型化和集成化。兰姆凹陷稳频法,只适用于单模激光器的稳频,而在文中的研究对象是双折射塞曼双频激光器,兰姆凹陷已被消除^[4]。从双折射塞曼双频激光器的全内腔结构,以及两个纵模在横向塞曼增益线上存在等增益点的角度出发,最终选择了等光强法。

实验所用的激光管是实验室自主研发的双折射塞曼双频激光管,输出两个不同频率且正交线偏振激光,即 π 、 σ 光。以两路光的光强作为输入,通过稳频控制系统输出 Pulse-Width Modulation(PWM)波,控制加热量,使得两光的光强强差为 0 或者维持某一恒定值,则激光频率就稳定在某一频率 ν 处,从而实现具有稳定频率输出双频 He-Ne 激光器。

文中介绍一种利用数字和模拟电路精细控制光强差恒定的热伺服系统,具有结构简单、小型化及成本低等优势。利用拍频系统和频差探测方法、对测试频率稳定度进行分析,频率稳定度及自适应性好,解决了传统热稳频激光器自适应性及重复性差等问题。

1 双折射塞曼双频激光器稳频原理

激光器的腔长变化导致激光频率变化和功率变化,对于双频激光器的腔长变化还导致输出激光频差变化。反过来,激光器功率的不稳定,频率的不稳定,频差的不稳定也都源于激光器本身腔长的不稳定。这些不稳定的出发点源于一个理论:谐振腔的(波长,频率)驻波条件^[5-6]。即激光频率和激光腔长的关系式:

$$\nu_q = \frac{c}{2nl}q \quad (1)$$

式中: q 为谐振腔内的纵模序数; n 为谐振腔内增益介质平均折射率; l 为谐振腔的几何长度; c 为光在真空中的传播速度。对公式(1)微分:

$$\Delta\nu = -qc \left(\frac{\Delta l}{2nl^2} + \frac{\Delta n}{2nl} \right) = -\nu \left(\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta n}{n} \right) \quad (2)$$

考虑频率变化的绝对量,将公式(2)化为:

$$\left| \frac{\Delta\nu}{\nu} \right| = \left| \frac{\Delta l}{l} \right| + \left| \frac{\Delta n}{n} \right| \quad (3)$$

由公式(3)可知,频率稳定度由腔长 l 的变化和折射率 n 的变化共同来决定,当激光器谐振腔腔长或增益介质折射率受外界影响发生变化时,激光器的频率将随着发生改变。文中研究的激光器是全内腔结构,对该结构而言,增益介质是 He-Ne 混合气体,在电流稳定的情况下变化不大,对频率稳定的影响很小,而由温度变化引起的腔长改变对激光频率稳定性有很大的影响。因此只需控制腔长的稳定,即可实现激光器输出频率的稳定。

激光器的腔长是时刻变化的,当腔长变化半波长时,激光频率“漂”过一个纵模间隔。按照平均的膨胀系数 $\alpha=5 \times 10^{-6}$ 、实际腔长 $l=150 \text{ mm}$ 计算,要使腔长保持在半个波长的波动范围之内,要求环境的温度变化量为:

$$\Delta T = \frac{\lambda}{2 \times \alpha \times l} \approx 0.42 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

这种环境温度变化量的要求在实际操作中是相当苛刻的,而且激光器本身是个热源,各部件之间又有很大的温度梯度。He-Ne 激光器的一个纵模间隔大约为 1.2 GHz,频率没有一个准确的确定关系,可能是在纵模间隔内一个随机的频率,这样对频率复现性有很大的影响,因此通过直接温度控制的方法是很难实现的。

在激光谐振腔内加入双折射元件后,增益线内的纵模被分裂成两个纵向模式,如图 1(a)所示。这两个被分裂的纵模被称为 o 光和 e 光。由于激光谐振腔的作用,任何腔内没有布儒斯特窗(或偏振片等)的 He-Ne 激光器,其输出的光束一定是正交偏振的^[7-8]。 o 、 e 光的光强值相加即是激光器的输出总光强,在两光光强曲线相交处,将同时输出两强度相等、偏振态正交的线偏振光。

在激光管加上横向磁场后, 由于横向塞曼效应的作用^[9], 将使得原来的增益曲线分裂为三条: 一条 π 增益线, 一条 σ^+ 增益线和一条 σ^- 增益线(由于谐振腔的作用, 两束垂直于磁场方向的 σ 光总是偏振方向相同, 相位相同, 因此可以将 σ^+ 增益线和 σ^- 增益线看作是同一条 σ 增益线), 如图 1(b) 所示。在模牵引作用下, 一个模式的光将被分裂为平行于磁场方向的线偏振的 π 光和垂直于磁场方向的线偏振的 σ 光。观察横向塞曼增益线, 可以看到增益线上存在两个左右等增益点 A 、 B , 对应 π 、 σ 两光出光功率相等, 取两光强差作为反馈量来调节腔长, 使光强差维持为零时, 激光频率就稳定在等增益点 A 或 B 点对应的频率处。对左右等增益点 A 、 B 位置的识别由电路来完成。若稳频系统每次都能保持两模的光强差

为 0 或者某一恒定值, 则激光频率也就稳定在其对应的频率处, 因此频率复现性能得到很好的保障。

2 稳频系统结构设计及拍频实验

2.1 稳频系统结构设计

双折射塞曼双频激光器等光强热稳频系统结构如图 2 所示。整体结构有两部分组成: 拍频光路和稳频控制电路。其核心部件是双折射塞曼双频激光管, 为浙江大学激光所制作。腔长 160 mm, 输出功率 1 mW, 频差 7.95 MHz。管壁均匀缠绕着电热丝, 采用双绕线法能够有效的减弱工作过程中电热丝产生的涡流磁场, 使得激光管内的磁场更加稳定。预热阶段电热丝通过恒定 1 A 左右的电流, 预热时间长短由单片机控制。

利用激光管尾光来作为探测光, 尾光包含的光信息和前端输出光是一致的, 并且前端探测会造成一定的输出光损失。如图 2 所示: 用曲阜师范学院激光研究所制作的型号为 LSP-4 渥拉斯顿棱镜将尾光分离为正交线偏振的平行光 π 和垂直光 σ , 这两路光分别被光电池接收, 经过光电检测模块的求差放大, 得到差值信号 e , 系统中运用到两个闭环反馈来调节光强差的稳定。一路信号 e 先通过比例积分差分 (Proportion-Integration-Differentiation, PID) 调节后

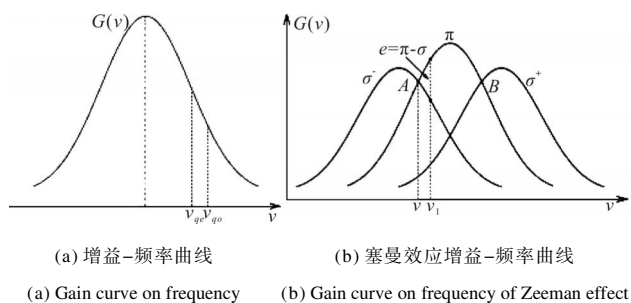


图 1 双折射塞曼双频激光器增益曲线

Fig.1 Gain curves of Zeeman-birefringence dual-frequency laser

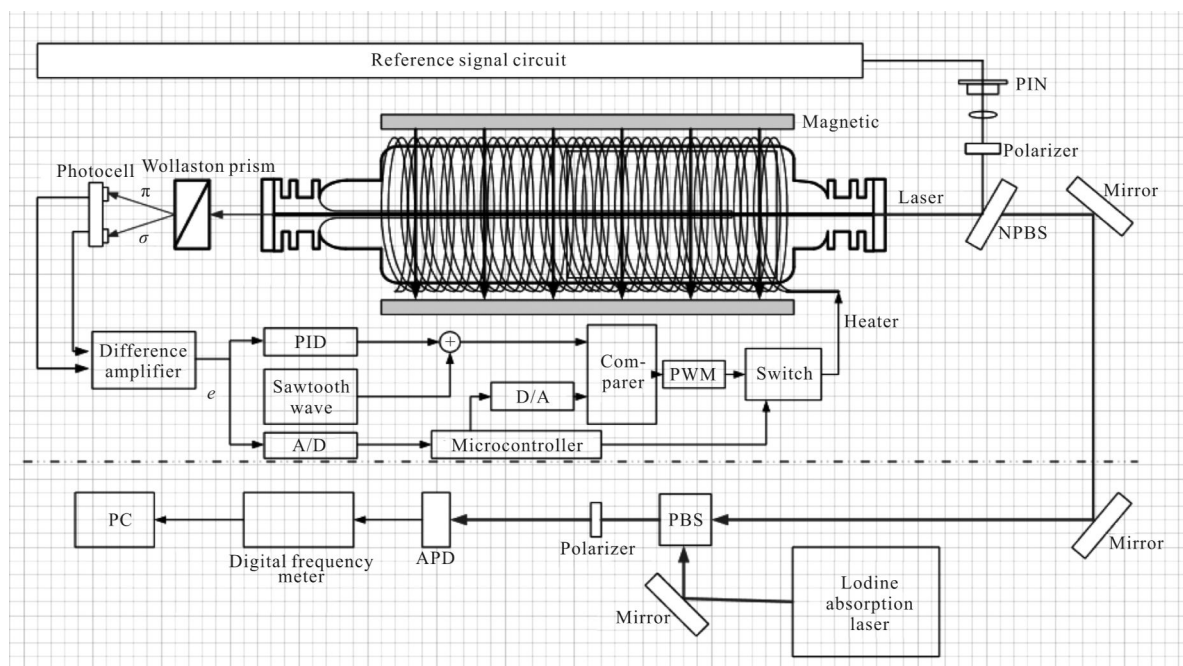


图 2 激光器稳频和拍频系统图

Fig.2 System diagram of frequency stabilization and beat frequency experiment

和稳定频率 f 的锯齿波叠加,输入比较电路的一端。另一路闭环回路用 AD 公司生产的 16 位模数转换芯片 AD7705 将差值信号 e 转换为数字信号,通过串行外设接口(Serial Peripheral Interface, SPI)传给 TI 公司的 MSP430F149 低功耗单片机,单片机进行计算后,将反馈量通过 TI 公司的数模转换芯片 TLC5615 转换为电压,并作为比较电路的参考电平。软硬件相互配合得到占空比与光强差相关的 PWM 信号,PWM 信号通过开关电路控制加热丝的加热和断开,控制激光器腔长稳定,使得差值信号 e 为 0 或者恒定,进而使激光频率稳定在等光强点对应的频率位置。

2.2 拍频实验

为了验证稳频系统的效果和稳定性,搭建了拍频系统来测试频率的稳定性,如图 2 下半部分所示。参考光源采用中国计量科学研究院制作的碘吸收激光器,其相对波长不确定度 $5 \times 10^{-10} (k=2)$,相对频率稳定度优于 1×10^{-10} ,输出光为水平线偏振光,可以作为参考光源。双频激光器输出光为两个相互垂直的线偏光,经过偏振分光棱镜 PBS 后,平行偏振光被 90° 反射,垂直光透过和碘吸收的水平线偏光拍频,当偏振片方向调节为 45° 时,两光在 45° 方向投影最大,此时拍频信号幅度最强。光电接收器为 HAMAMATSU 公司生产的型号为 C5658 的雪崩光电二极管,能将拍频信号转化为电信号,送入频谱仪记录观察。

激光器输出的双频光之间也可以拍频,拍得的信号即为频差信号,频差信号在双频干涉仪测量中起着载波的作用,也可以通过频差信号的稳定性判断稳频系统的性能。如图 2 顶端,通过旋转偏振片,

调节频差信号幅值达最大。采用新势力光电公司的 PIN 光电二极管将光信号转化为电信号,经过处理电路后通过频率计采集。

3 稳频实验结果及分析

采用图 2 的稳频方案,搭建起实验系统。激光器冷开机,单片机控制开关电路一直处于加热状态,当激光管内部温度到达设定温度时,就切换到稳频工作阶段,经过一个过渡段达到最终的频率稳定。通过连续观测,得到激光器光强调谐曲线如图 3 所示。

第一阶段是预热阶段,激光器腔长很快伸长半个波长,对应频率扫过一个纵模间隔,依次经过横向塞曼增益线的左右两个等增益点,反应在图 3(a)中,即是 π 、 σ 光强曲线交替变化,且出现左右两个等光强点 A、B。比较图 3(a)和图 3(b),可以看出随着温度的升高,激光器腔长逐渐趋于“热饱和”状态,变化周期 T 的值会越来越大,但是等光强点 A、B 始终交替存在。随着温度的升高,双频光对磁场的响应也会相应变化,使得 π 、 σ 光强曲线发生偏移,直接导致等光强点发生微移,从图中可以看出图 3(b)中 A1 点相对与 3(a)中 A 点位置发生了向下的偏移,这也是导致激光器频率漂移的一个主要因素。为了提高稳频的效率,通过调节使等光强点的位置大致在 π 、 σ 光强曲线最大斜率交汇处。当激光器温度达到设置温度时,切入到第二阶段:稳频阶段见图 3(b), π 、 σ 光强曲线经过短暂的震荡后,趋于稳定状态,两条曲线慢慢趋于重合。

图 3(c)记录了激光器从刚开机时激光光强的不稳定状态到长时间稳定的整个过程,该过程伴随了激光器频率的稳定。结合前面的分析,可清晰地看

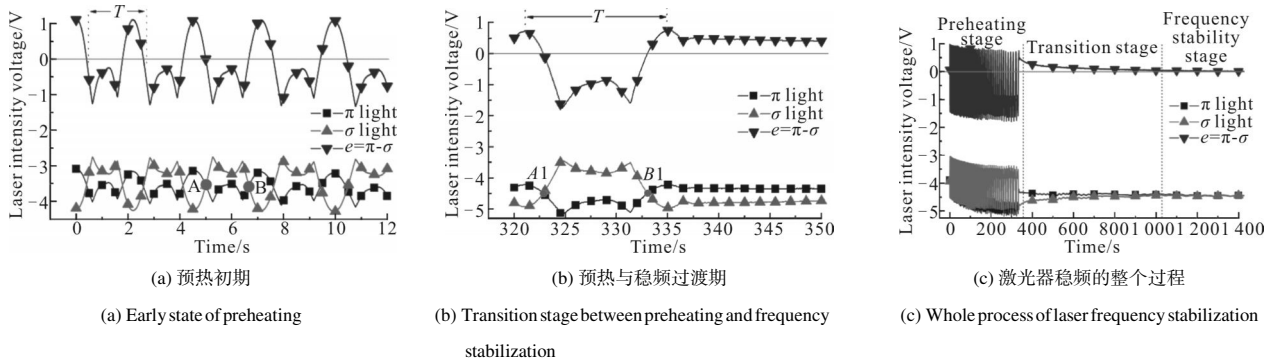


图 3 激光器光强调谐曲线

Fig.3 Light intensity tuning curves

出,预热结束后,经过一个过渡期后,整个系统的温度达到平衡,光强稳定在左等光强点附近。此后的长时间内,π、σ 两光强曲线基本重合且平行前进,光强差值维持在零的附近,峰-峰值变化在 20 mV 以内。

为了精确测量本稳频激光器的频率稳定度,文中用图 1 所示的拍频实验系统来测量频率的稳定度。重复开机预热充分后,拍得 5 次拍频数据,拍频时间均大于 5 h。一些细节数据如表 1 所示。具体数据的分布如图 4 所示。由于拍频的环境是在普通的实验室环境,温度变化不稳定及不规则振动等因素,导致激光器最终稳定时光强差 e 不严格为 0,而是在 0 值的附近。从图 4 可以看出,每组数据的分布不规律,以 $e=17\text{ mV}$ 为例,拍频区间 $[173.1, 173.5]$ 占了所有数据的 25%,而小方块代表平均值左右的 $[173.5, 175.2]$ 区间只占了所有数据的一半,其余的 25%数据分布在与最大值相差 0.4 MHz 以内。比较 5 次的拍频数据可以发现:拍频的值随着光强差的减小而减小,并且光强差越接近于 0 时,频率的漂移区

间越小,即频率的稳定性越好。综合 5 组数据可以看出,5 次拍频中拍频最大值为 182.5 MHz,最小值为 172.4 MHz,相差 10.1 M,该稳频系统能把频率漂移控制在 10.1 M 以内。由贝塞耳公式^[10]计算出系统拓展不确定度($k=2$):

$$s=\Delta\nu/\nu=2\times 2.545\ 899\times 10^6/4.74\times 10^{14}=1.074\times 10^{-8}\quad (5)$$

将拍频数据计算成阿伦方差,得到图 5,可以看出,差值比较大 $e=53\text{ mV}$ 的黑色曲线明显高于其他曲线,其频率稳定性相比其他曲线要差。仔细观察阿伦方差的曲线,可以发现 5 组数据具有大致同样的趋势:都是在 8 s 附近达到最小值,然后持续增加,但是最大值也是在 1.2×10^{-9} 。到达 10 000 s 后都有明显的下降,说明该系统的长期稳定性有很好的保障。

He-Ne 双频激光干涉仪在精密测量中,频差作为测量的载波,直接决定了测量的速度。频差的变化也可反应出频率的稳定程度,直接将图 1 中的频差信号接入频率计可以得到具体的频差。分别观察 2 h 加稳频和未加稳频的频差大小,得到数据如图 6 所示。可以看出加稳频系统对频差影响很大,未加稳频时频差波动范围大约为 250 kHz,加入稳频后频差波动范围减小至 8 kHz 以内,相对偏差度达到 0.001,

表 1 激光器稳频后与碘吸收的拍频值

Tab.1 Beat frequency value of frequency stabilized laser and Iodine laser

No.	e/mV	Ave/MHz	Max/MHz	Min/MHz
1	53	180.1	182.5	177.6
2	12	173.6	174.6	172.4
3	43	177.0	179.2	174.7
4	17	174.4	175.6	173.1
5	38	176.5	178.6	174.3

注:e 表示稳频后光强差的平均值;Ave 为拍频数据的平均值;Max 表示拍频数据的最大值;Min 表示拍频数据的最小值。

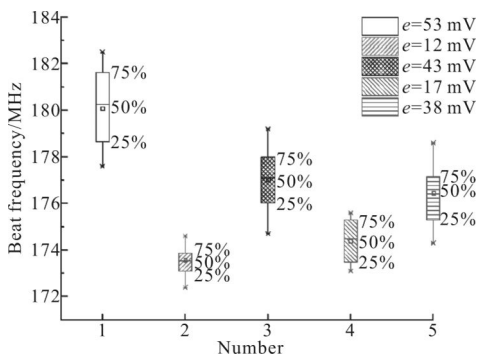


图 4 5 次拍频数据分布图

Fig.4 Data distribution map of five times beat frequency experiments

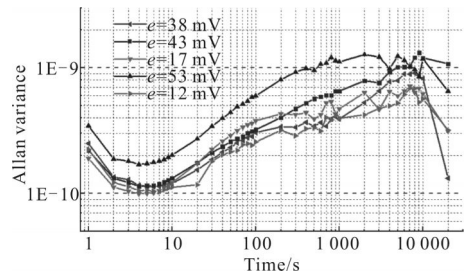


图 5 稳频后激光器的阿伦方差曲线

Fig.5 Allen variance curve of frequency stabilized laser

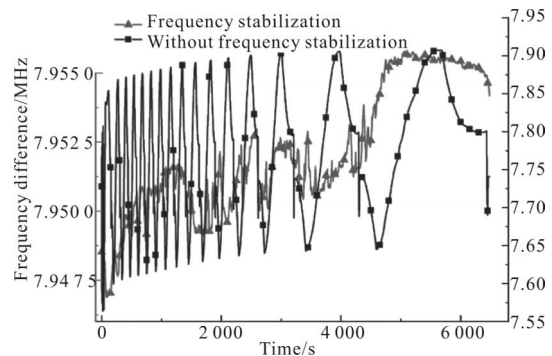


图 6 激光器的频差曲线

Fig.6 Frequency difference curve of laser

和市场上其他的纵向塞曼双频激光器相比频差高出 5 M,且频差波动优于其的 15 kHz。从整体的曲线看出频差随着时间的变化在缓慢增加,这是由于激光管内双折射塞曼元件随着温度的增加也在微弱的变化,导致两光之间的光程差发生改变,从而频差也相应变化。

4 结束语

文中基于“等光强法”,结合数字和模拟电路共同控制,实现了双折射塞曼双频激光器的频率稳定,并建立了拍频、频差稳定性测试系统,该系统具有重复性高、自适应强和抗干扰能力强等特点。和未加控制相比,加入稳频控制系统后,激光器的频率稳定度有明显的提高,在长期工作中,频率重复性能控制在 10 MHz 以内,单次频率稳定度优于 10^{-9} ,频率不确定度达到 10^{-8} ,达到商用标准,这为中频差的双折射塞曼双频干涉仪制作起到了关键性的作用,该系统制作的双频干涉仪已用于国家重大专项“光刻机用双工件台样机研制”中。

参考文献:

- [1] Wright O B. Stabilized dual-wavelength fiber-optic interferometer for vibration measurement [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(1): 56-58.
- [2] Chen Q, Lin D, Wu J, et al. Straightness/coaxiality measurement system with transverse Zeeman dual-frequency laser[J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(10): 2030.
- [3] Qian Jin, Liu Zhongyou, Zhang Xiaoping, et al. Lamb-dip stabilized He-Ne laser system at 612 nm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 192-195. (in Chinese)
钱进, 刘忠有, 张小平, 等. 612 nm He-Ne 兰姆凹陷稳频激光系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 192-195.
- [4] Ren Libing, Ding Yingchun, Zhou Lufei, et al. Mid-frequency difference He-Ne ZB laser with elastic force-exerting and its frequency stabilization[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 814-817. (in Chinese)
任利兵, 丁迎春, 周鲁飞, 等. 弹性加力中频差 He-Ne 塞曼-双折射塞曼双频激光器及稳频[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 814-817.
- [5] Liang Jing, Long Xingwu. Stability analysis of beat frequency in double-longitudinal-mode He-Ne laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1301-1304. (in Chinese)
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.
- [6] Xiao Yan, Zhang Shulian. Full-inner-cavity birefringence dual-frequency He-Ne laser with fixed frequency-difference by angle-block and frequency-stabilization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(6): 509-512. (in Chinese)
肖岩, 张书练. 全内腔角块定频差双折射双频 He-Ne 激光器及其稳频研究[J]. 中国激光, 2001, 28(6): 509-512.
- [7] 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)
朱守深, 刘维新, 张书练. 全内腔 He-Ne 激光器开机光强调谐曲线及激光器性能[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1106-1110.
- [8] Liu W, Holzapfel W, Zhu J, et al. Differential variation of laser longitudinal mode spacing induced by small intra-cavity phase anisotropies[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(8): 1602-1606.
- [9] 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, 2005.
- [10] Zhuang Zhenghui, Wu Xianqiu, Chen Hao. Discussions of the Bessel formula's derivation and its physical significance [J]. *Physical Experiment of College*, 2010, 23(4): 80-82. (in Chinese)
庄正辉, 吴先球, 陈浩. 贝塞尔公式的推导及其物理意义探讨[J]. 大学物理实验, 2010, 23(4): 80-82.