

## 加力型频率分裂激光器的频率差热漂移

王 琦<sup>1</sup>, 钱永明<sup>1</sup>, 张书练<sup>2\*</sup>

(1. 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019;  
2. 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)

**摘 要:** 频率差可调的加力型频率分裂氦氖激光器具有广阔的应用前景, 目前鲜有关于该激光器频率差热漂移的具体报道, 但它是一个重要的应用指标, 特别是在光刻机用干涉仪中需要重点关注。采用弹性加力法对双折射-塞曼氦氖双频激光器进行频率差赋值, 详细观察了频率差在开机漂变阶段、过渡阶段及稳定阶段状态的变化过程, 给出了频率差对开机时间的曲线。实验表明稳频作用下的频率差的稳定性优于 23 kHz/h, 重复性优于 130 kHz。此外还就不同结构或材料的弹性加力元件对频率差的影响进行了对比分析, 实验表明系统温度分布的均匀性和稳定性对频率差热漂移起重要作用。

**关键词:** 弹性加力; 氦氖激光器; 频率差; 热漂移

中图分类号: TN248.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200392

## Thermal drift of frequency difference of frequency splitting laser with force-exerting

Wang Qi<sup>1</sup>, Qian Yongming<sup>1</sup>, Zhang Shulian<sup>2\*</sup>

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

**Abstract:** The force-exerting laser with tunable frequency difference has a broad application prospect, there are few reports on the thermal drift of frequency difference of this laser, but it is an important application index, especially for the interferometer of lithography machine. The frequency difference of birefringence Zeeman dual frequency laser was assigned through elastic force method, and its states of frequency difference in the drift stage, transition stage and stable stage were observed. The experiments prove that the stability of frequency difference is better than 23 kHz/h, and its repeatability is better than 130 kHz; In addition, this paper also comparatively analyzed the influences of elastic force-exerting elements with different structures or materials on frequency difference. The experiments indicate that the uniformity and stability of the temperature distribution play an important role in the frequency difference thermal drift.

**Key words:** elastic force-exerting; He-Ne laser; frequency difference; thermal drift

## 0 引言

通过在平行或垂直平面输出镜双折射基片主应力方向上施加对径力,改变平面输出镜内部应力的分布,进而修正两个正交方向上的位相延迟,加力型频率分裂氦氖激光器可使频率差具有较大的调节范围<sup>[1]</sup>。过去曾报导采用刚性加力<sup>[2]</sup>的方法获得所需的频率差,但这种方案的加力元件容易脱落,同时加力的分辨率相对较低,容易导致频率差跳变,无法实现频率差的连续稳定调节。在此基础上设计了弹性加力的方法<sup>[3]</sup>对激光器进行频率差赋值,通过优化固定与加力的方式,弹性加力激光器频率差的调节具有简单易操作、加力稳定等优点,频率差调节范围可覆盖 0~几十 MHz,这使其在双频干涉仪<sup>[4]</sup>、光学玻璃材料测量<sup>[5]</sup>等诸多应用中都具有广阔的前景。

通常所说的氦氖激光器管体温度保持稳定其实是相对而言的,温度变化总是存在,激光器频率差也会随着温度变化产生热漂移。而激光器采取稳频措

施后,管体温度波动得到改善,这时频率差热漂移的大小一定程度上可以作为判别激光器稳频效果的依据。因此在实际应用中,对于加力型激光器,除了关心它的频率差的赋值范围,还需要关注频率差的热漂移,但目前鲜有关于频率加力型氦氖激光器频率差热漂移的具体报道。

文中详细分析了弹性加力氦氖激光器频率差在不同阶段的变化特点,同时给出了反映频率差热漂移程度的两个指标的大小,补充了这方面的研究。此外,基于不同结构或材料的弹性加力元件研究了系统温度分布对频率差热漂移的影响,这对于频率差赋值技术的改进也很重要。

## 1 实验系统

图 1 为弹性加力激光器频率差漂移的测试装置,它由激光器系统、频率差数据采集系统以及稳频系统组成。

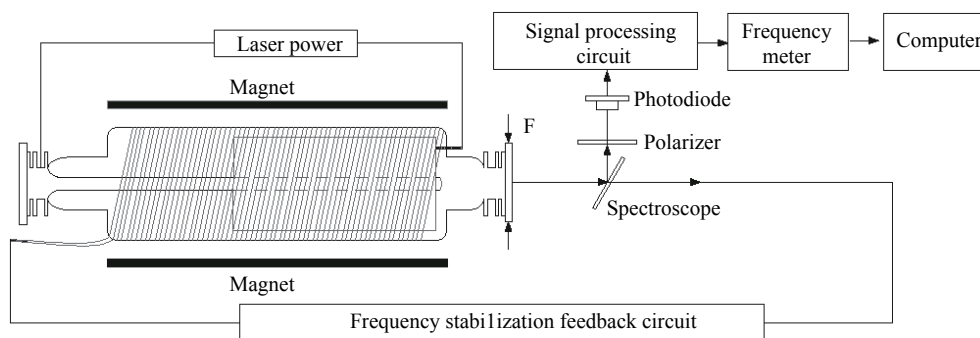


图 1 弹性加力激光器频率差测试装置

Fig.1 Frequency difference test device of elastic force-exerting laser

选用谐振腔长为 135 cm,功率为 1 mW,出光波长为 0.6328 μm 的双折射-塞曼氦氖双频激光器<sup>[6]</sup>作为实验测试的光源,当其平面输出镜内存在应力时,各向同性的腔镜相当于一个双折射元件,当激光穿过腔镜,沿腔内两个主应力方向偏振的光的折射率就有了微小的偏差,折射率之差如公式 (1) 所示:

$$\Delta n = n_x - n_y = (c_x - c_y)(\sigma_x^F - \sigma_y^F) \quad (1)$$

式中:  $n_x$  和  $n_y$  为激光通过应力各向异性介质沿沿两个主轴方向偏振的折射率;  $c_x$ 、 $c_y$  分别是沿两个主轴方向材料的光学系数;  $\sigma_x^F$ 、 $\sigma_y^F$  分别是两个方向上的应力大小。由此带来的频差值可由公式 (2) 表示:

$$\Delta\nu = \frac{\nu}{L}(c_x - c_y) \frac{8P}{\pi D} h = \frac{\nu}{L} \frac{8\lambda}{\pi D} \frac{F}{f_0} \quad (2)$$

式中:  $\Delta\nu$  为频差大小;  $P$  为施加在单位宽度上的外力;  $D$  为输出平面镜的直径;  $h$  为施加外力的宽度;  $F$  为施加外力的大小;  $f_0 = \lambda / (c_x - c_y)$  为材料条纹值。

调节腔镜应力分布即可以实现频率差的赋值。激光器管体外加有横向磁场,这样做的目的是分离 o 光和 e 光的增益原子,减小频率的模竞争<sup>[7]</sup>。

实现加力功能的弹性加力元件由使用磷青铜材料的薄片经线切割工艺制得,包含底座 B、加力片 SFE 和悬臂 CL 三部分(如图 2 所示):底座 B 按照激光器管尺寸被折弯贴合在管壁上,实现了元件加力与

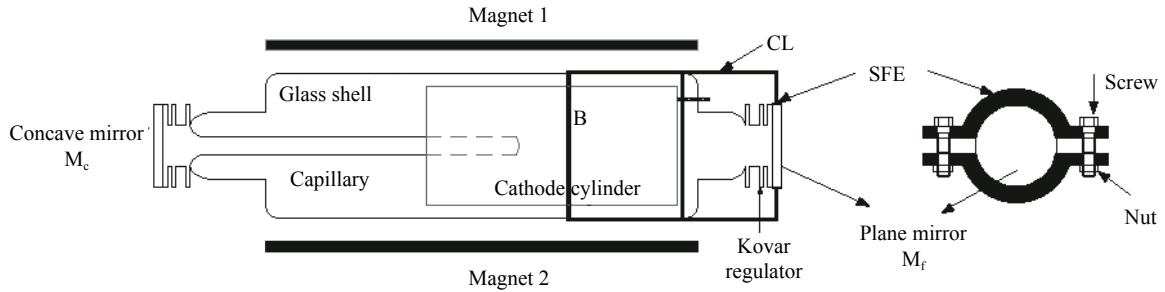


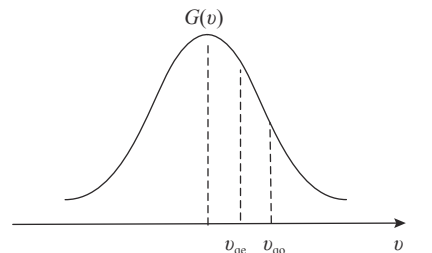
图 2 弹性加力的双折射-塞曼氦氖双频激光器

Fig.2 Birefringence-Zeeman He-Ne dual-frequency laser with elastic force

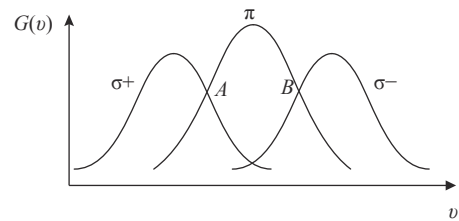
固定的分离,互不干扰;加力片 SFE 为上下两个半圆环,由两对螺母和螺钉连接,通过调节螺钉的松紧程度可以改变施加在平面镜上基片上的外力,进而修正激光器的频率差;悬臂 CL 用于连接底座 B 和加力片 SFE。实验测试时,采用营口高新电源研究所制造的 GL-04 型激光电源对激光器供电,其正常工作电流为 4 mA,电压是 4 V。调节磁条间距,使纵模分裂频率  $\sigma$ 、 $\pi$  光的塞曼增益曲线交于斜率最大处。为了减小空气扰动和机械振动对实验测试的影响,激光器需要使用灌胶工艺封装,同时也能使管体温度更稳定。

激光器输出光经分光镜分为两路,透射光用于激光器稳频。基于所用激光器为全内腔结构且横向塞曼增益线存在等增益点(如图 3 所示的 A 点和 B 点),选择了一种结构简单、成本较低的等光强热稳频法<sup>[8]</sup>,其中  $\pi$  和  $\sigma$  曲线分别是正交偏振模式  $\sigma$  光和  $\pi$  光的增益曲线,等增益点位置两模式的光强度相等。

图 4 为稳频系统的控制回路。两分裂频率的光强信号由光电池接收并转换成电信号,再经过光电检测模块的滤波和求差放大处理得到差分信号  $e$ 。其中



(a) 增益-频率曲线  
(a) Gain-frequency curve



(b) 横向塞曼增益-频率曲线  
(b) Transverse Zeeman gain-frequency curve

图 3 双折射-塞曼双频激光器增益曲线

Fig.3 Gain curve of birefringence Zeeman dual-frequency laser

一路信号  $e$  先通过 PID 调节,再和稳定频率的三角波叠加后输入比较电路的一端。另一路差值信号  $e$  经

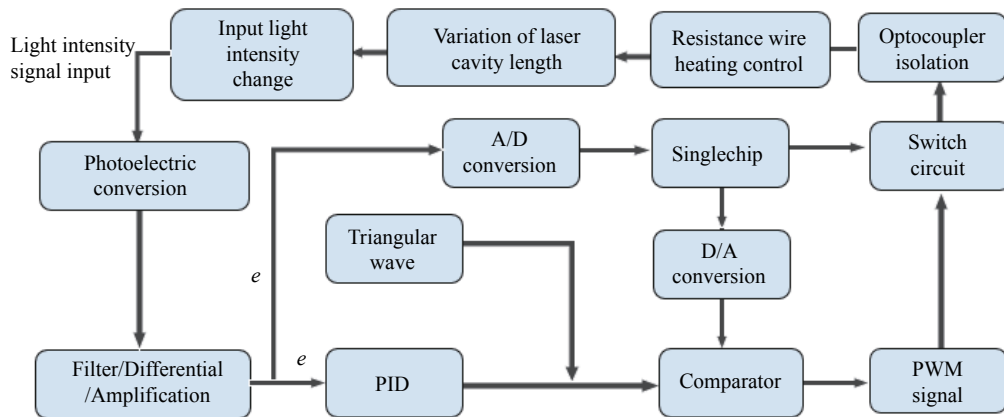


图 4 稳频系统控制回路

Fig.4 Control loop of frequency stabilization system

过模数转换芯片变为数字信号,通过串行外设接口传递给单片机,单片机计算后,将反馈量通过数模转换芯片转换成电压,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,进而实现腔长的调节。当差值信号  $e$  为 0 或者恒定,也即两正交偏振模式的光强相等时,激光分裂频率稳定在等光强点对应的频率位置。

稳频系统通过伺服控制改善谐振腔长的漂移,进而减小腔长调谐时频率差的变化。采用热稳频的方法能将激光器温度变化控制在 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,减小热胀冷缩对人工应力的影响,提高了频率差的稳定性。

由分光镜反射的一路光用于频率差数据采集。反射光先经过 632 nm 的偏振片滤光,再由 PIN 光电二极管将光信号转化为电信号,电信号经过信号处理电路由频率计采集数据,并通过电脑上的上位机程序记录频率差。

## 2 频率差热漂移

### 2.1 频率差热漂移特点

频率差的稳定性可以反映热漂移程度的大小。图 5 示出了弹性加力双折射-塞曼氦氖双频激光器 4 h 内的频率差曲线。从激光器开启并投入稳频后,频率差依次会经历三个阶段:开机漂变阶段、过渡阶段和稳定阶段。

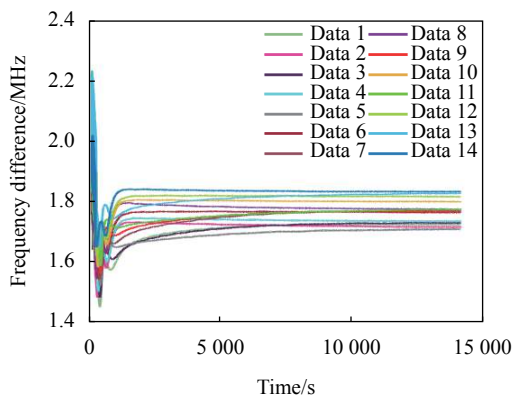


图 5 加力型频率分裂激光器频率差漂移曲线

Fig.5 Frequency difference drift curve of force-exerting frequency splitting laser

处于开机漂变阶段时,激光器被不断加热,直至升温到设定的温度。激光器因温度升高,腔长增加,

激光纵模(频率)逐一扫过增益曲线(即不停地“换模”),光强剧烈变化,频率差也剧烈波动。目前,采用短半球腔楔角输出镜和半内置谐振腔的氦氖激光器,可以使开机预热时间从 30 min 降低到 10 min。

进入过渡阶段,流过激光器加热丝的电流不再是恒定值,而是在稳频系统的作用下,两激光模式在塞曼增益曲线内分别移向等增益点  $A$  或  $B$  (具体位置可由电路识别)各自对应的频率,频率差也呈阶跃式变化,且波动范围越来越小。过渡阶段的时长约为 15 min,在图 5 所示的 14 组实验数据中,频率差在该阶段的最大漂移量为 150 kHz。

处于稳定阶段时,稳频系统将光强差保持在 0 点或某一恒定值,激光器管体温度波动很小,谐振腔比较稳定,此时两激光模式就维持在等增益点各自对应的频率或其邻近频率处。在图 5 所示的 14 组实验数据中,频率差从进入稳定阶段到观察结束的 3.5 h 内的最大漂移量不超过 100 kHz,且当激光器开启时间足够长时,频率差变化量的平均值优于 23 kHz/h。

频率差的重复性是另一个反映其热漂移程度的重要指标。记录了 14 组同一激光器进入稳定阶段后每 30 min 的频率差数据,比较了同一时刻频率差的接近程度,分析结果如图 6 所示:激光器频率差随着管体温度逐渐稳定,它的分布状态由相对分散过渡到趋于集中,分布范围由 [1.6556 MHz, 1.8594 MHz] 缩小并稳定到 [1.7062 MHz, 1.8318 MHz] 左右。以第 7 组数据为例,频率差区间 [1.7062 MHz, 1.7284 MHz] 占了所有数据的 25%,而方框内的区间 [1.7284 MHz, 1.7994 MHz] 占了所有数据的一半,区间 [1.7994 MHz,

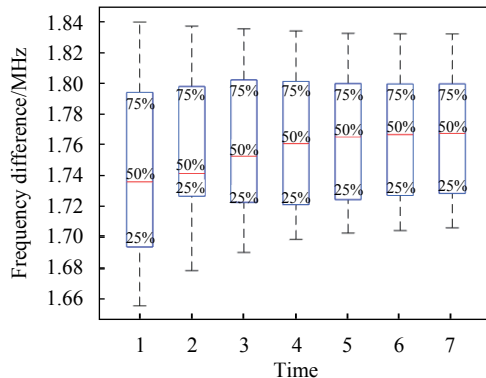


图 6 14 组频率差数据在稳频阶段 7 个时刻处的分布图

Fig.6 Distribution map of 14 sets of frequency difference data at 7 moments in the frequency stabilization stage

1.8318 MHz] 占了其余的 25%, 由于当前时刻频率差的漂移量非常小, 取整个区间上下限差值表征频率差的重复性水平, 实验数据表明加力型频率分裂激光器频率差的重复性优于 130 kHz。

由上述分析可知, 频率差的稳定性和重复性具有相同的变化趋势: 随着腔长调谐地进行, 它们的幅值波动都变得越来越小, 特别在激光器开启 2 h 左右以后, 频率差的热漂移就维持在一个稳定范围。图 7 示出同一加力型激光器未加稳频系统时的频率差曲线, 开启 30 min 后, 其频率差热漂移仍然是无规则的波动, 热漂移量高达 650 kHz/h, 而对应含稳频系统的频率差参数仅为 23 kHz/h, 可看出稳频系统对频率差热漂移的影响很大, 因此也可将频率差热漂移量作为评判稳频效果的依据。

图 8 所示为干涉仪的稳频曲线。一般用在高档机

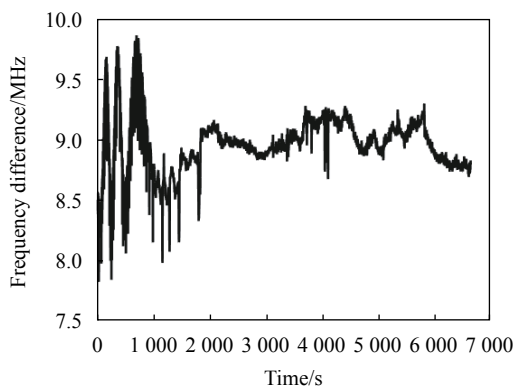


图 7 未加稳频系统的加力型激光器频率差漂移曲线

Fig.7 Frequency difference drift curve of force-exerting laser without frequency stabilization system

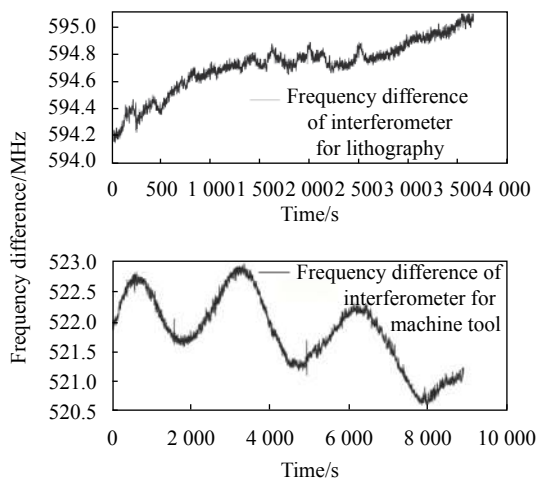


图 8 干涉仪的频差稳定性

Fig.8 Stabilization of frequency difference of the interferometer

床上的干涉仪对频差偏差度 (频差稳定阶段的极差值与平均值的比值) 的要求在 4% 以内, 对应的频差稳定性在 25 kHz/h 以内。而光刻机用干涉仪对频差要求更高, 频差稳定性需达到 5 kHz/h。

## 2.2 系统温度对频率差的影响

对于弹性加力的激光器, 实际上系统温度对频率差的影响不仅仅发生在腔长调谐过程, 其本身温度分布不均时也容易使频率差发生热漂移, 具体表现在以下方面: 维持激光器谐振腔长稳定的方法是通过稳频系统控制缠绕在激光器管体电阻丝的加热和断开, 而管体和输出镜存在一个热传导的过程, 这会造成加力元件发生热胀冷缩进而使外力发生改变。图 9 为使用两个温度探测器同步测得的激光器管体和输出镜温度变化的曲线, 温度变化曲线与频率差特性曲线基本吻合。但在预热阶段和过渡阶段, 输出镜的温度始终低于管体温度。进入稳定阶段, 两者才逐渐趋于一致; 激光器水平放置时, 管体上部和下部的温度也略有差异, 同样会对谐振腔产生影响; 激光器平面输出镜温度发生变化时, 基片的折射率也会改变。

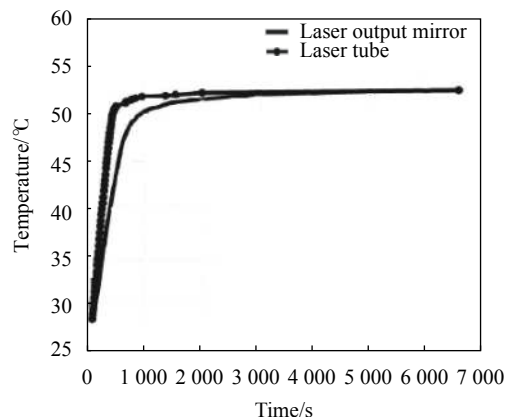


图 9 激光器管体与输出镜温度变化曲线

Fig.9 Temperature curve of laser tube and output mirror

测试了只含加力片结构的弹性加力双折射-塞曼双频激光器的频率差, 实验结果为: 激光器多次开机频率差的重复性为 190 kHz; 过渡阶段频的 15 min 内, 频率差总漂移量为 290 kHz; 稳定阶段频率的 3.5 h 内频率差总漂移量为 215 kHz。当激光器开启时间足够长, 频率差变化量平均值为 53 kHz/h。显然, 与完整结构的弹性加力方案相比, 只含加力片结构的弹性加力激光器频率差的热漂移更大, 这是因为完整结构的

加力元件连接了激光管与平面输出镜,热传导更加迅速有效。此外,悬臂呈工字形,其截面的长宽比很大,限制了加力片在径向方向上的热胀冷缩,一定程度上起到缓冲作用。

此外,加力元件对频率差的热漂移的影响不仅在于结构设计方面,它的热膨胀系数也是一个影响因素。在温度升高时,由于输出镜和加力元件的热膨胀系数不同(输出镜材料为 K4 玻璃,热膨胀系数为  $4.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ),加力元件对输出镜的挤压力也在发生变化,从而影响频率差。曾有文献<sup>[9]</sup>报导过使用 316L 不锈钢材料(热膨胀系数为  $19 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )的弹性加力元件对双折射-塞曼双频激光器进行频率差赋值,与使用磷青铜(热膨胀系数为  $18 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )作为弹性加力元件材料的方案相比,两者频率差特性比较接近,但前者开机 4 h 后频率漂移量的平均值高达 100 kHz/h。这说明加力元件材料的热膨胀系数对频率差热漂移有重大影响,加力元件材料和输出镜材料的热膨胀系数越接近,频率差的热漂移越小。

### 3 结 论

弹性加力激光器频率差热漂移与其本身温度变化特性基本一致,在稳频系统的作用下,目前弹性加力激光器频率差的稳定性可达 23 kHz/h,重复性水平可达 130 kHz,适应各种复杂的应用要求。由于系统温度对激光器频率差热漂移的影响是多方面的,它的分布和稳定性很大程度上决定了频率差热漂移的大小,优化加力元件的结构设计与选择更适配的材料是提高弹性加力激光器频率差性能的重要途径。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Shulian. Principle of Orthogonal Polarization Laser[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)  
张书练. 正交偏振原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] Li Yan, Zhang Shulian, Han Yanmei. Novel photoelastic birefringent dual-frequency lasers [J]. *Journal of Optoelectronics*, 2001, 12(3): 59-61. (in Chinese)
- [3] Ren Libing, Ding Yingchun, Zhou Lufei, 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): 67-70. (in Chinese)  
任利兵, 丁迎春, 周鲁飞, 等. 弹性加力中频差 He-Ne 塞曼-双折射双频激光器及稳频[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 67-70.
- [4] Suo Rui, Fan Zhijun, Li Yan, et al. Dual-frequency laser interferometer present state and development [J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(4): 251-253. (in Chinese)  
所睿, 范志军, 李岩, 等. 双频激光干涉仪技术现状与发展[J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 251-253.
- [5] Niu Haisha, Zhu liangqiang, Song Jianjun. Large range stress measurement system based on large frequency difference laser self-mixing interference [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(7): 074109.
- [6] Li Yan, Zhang Shulian, Han Yanmei. Dual-frequency He-Ne lasers of 3~40 MHz frequency difference [J]. *High Technology Letters*, 2001(3): 41-44. (in Chinese)  
李岩, 张书练, 韩艳梅. 频差 3—40 MHz 的 HeNe 双频激光器[J]. 高技术通讯, 2001(3): 41-44.
- [7] Li Yan, Fu Jie, Han Yanmei. Intensity tuning characteristics of a frequency splitting He-Ne laser [J]. *Laser & Infrared*, 2000, 30(1): 30-32. (in Chinese)  
李岩, 傅杰, 韩艳梅. 频率分裂 He-Ne 激光器功率调谐特性[J]. 激光与红外, 2000, 30(1): 30-32.
- [8] Tian Zhenguo, Zhang Li, Zhang Shulian. Isocandela points frequency stabilization in He-Ne Zeeman-birefringence dual-frequency lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0505001. (in Chinese)  
田振国, 张立, 张书练. He-Ne 双折射塞曼双频激光器的等光强稳频研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0505001.
- [9] Zhou Lufei. Research on realization of orthogonally polarization and high resolution displacement measurement based on optical feedback in He-Ne lasers[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009: 25-35. (in Chinese)  
周鲁飞. 氦氖激光器正交偏振光产生及高分辨率回馈位移测量研究[D]. 北京: 清华大学, 2009: 25-35.



**第一作者简介：**王琦 (1995-), 本科就读于浙江科技学院机械设计制造及自动化专业, 硕士就读于江苏南通大学, 研究生期间于清华大学精密测量国家重点实验室研究学习, 主要从事激光器相关及精密仪器的相关研究。Email: wq2334095063@163.com



**通讯作者简介：**张书练 (1945-), 男, 教授, 博士生导师。研究方向为激光器及精密测量仪器, 为中国光学学会会员、OSA 会员、SPIE 高级会员。主持了 30 余项科学研究项目, 其中有 3 项重大和重点项目, 10 余项国家攻关, 国家自然科学基金, 北京市重点项目。曾获国家科技发明二等奖 (2007); 中国电子学会电子信息科学技术二等奖 (2006); 国家教科委进步 (甲类) 一等奖 (1994); 国家科技进步二等奖 (1985) 等。Email: zsldpi@mail.tsinghua.edu.cn