

一种控制环形激光器光学腔长的新方法

赵东洋^{1,2} 石顺祥¹ 李家立¹

(1 西安电子科技大学, 西安 710071)

(2 华中光电技术研究所, 武汉 430074)

摘 要 提出了一种控制环形激光器光学腔长的新方法. 该方法是利用压电陶瓷电控环形激光器毛细管内干燥空气的折射率, 实现对环形激光器光学腔长的控制. 这种控制方法对环形激光器性能影响很小, 具有响应速度快、灵敏度高、功耗低等优点, 可用于全反射棱镜式环形激光器、反射镜式环形激光器的稳频系统. 对于激光陀螺、激光计量等应用具有重要意义.

关键词 腔长控制; 环形激光器; 压电陶瓷; 稳频

中图分类号 TN965 **文献标识码** A

0 引言

在激光陀螺^[1]的实际工作中, 外界环境的变化会引起环形激光器光学腔长变化, 从而降低了环形激光器振荡频率的稳定性, 严重地影响激光陀螺的测量准确度. 因此, 高准确度的激光陀螺均要求其环形激光器采用稳频系统. 通常, 环形激光器所采用的稳频系统是使其谐振腔跟踪外界环境引起的光学腔长变化, 产生一个可控的光学腔长变化, 从而使环形激光器光学腔长在外界环境变化的情况下保持不变, 提高了环形激光器振荡频率的稳定性.

目前, 在环形激光器的稳频系统中, 主要有两种控制光学腔长的装置, 一种是利用压电元件驱动环形激光器谐振腔的反射镜, 控制谐振腔的几何长度^[2]; 另一种是通过加热丝温控光路中的介质折射率, 控制谐振腔的光学长度^[3]. 前一种装置主要用在反射镜式环形激光器的稳频系统中, 它具有结构简单、灵敏度高、响应速度较快等优点, 但由于压电元件在其伸缩过程中存在弯曲变形现象, 会严重影响环形激光器的性能和激光陀螺的测量准确度; 第二种控制装置主要用在全反射棱镜式环形激光器的稳频系统中, 它在光学腔长控制过程中, 不改变环形激光器的光路, 控制方法简单, 但却存在如下缺点: ①控制光学腔长的装置与激光器存在温度梯度, 严重地影响环形激光器的性能和激光陀螺的测量准确度; ②调整时间长、启动速度和响应速度低; ③功耗大.

本文提出了一种控制环形激光器光学腔长的新方法, 这种方法是利用压电陶瓷电控环形激光器毛细管内干燥空气的折射率, 实现对环形激光器光学腔长的控制.

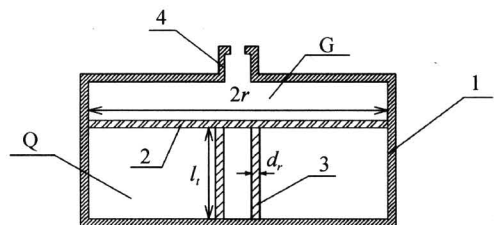
1 新方法的结构及原理

在 $0.339 \mu\text{m} \sim 1.695 \mu\text{m}$ 光谱范围内, 干燥空气折射率 n 与状态参量存在的关系为^[4]

$$n = 1 + C(\lambda) \left(\frac{P}{T} \right) \quad (1)$$

式中, $C(\lambda) = 7.748 \times (1 + 6.6063 \times 10^{-3} \times \lambda^{-2}) \times 10^{-3}$, P 为空气的压强 (Pa), T 为空气的绝对温度 (K), λ 为光波长 (μm). 可见, 通过改变干燥空气的压强 P , 可以控制干燥空气的折射率 n .

据此, 本文设计了一种图 1 的控制环形激光器光学腔长的装置. 该装置主要由圆柱形绝热容器 1, 圆形绝热弹性膜片 2, 圆筒形压电陶瓷 3 组成. 绝热弹性膜片 2 紧密地固定在绝热容器 1 上, 并将绝热容器 1 分隔为 G 、 Q 两部分; 压电陶瓷 3 的一端与绝热弹性膜片 2 连接, 另一端固定在绝热容器 1 上, 其上有可外加控制电压的正负电极; 绝热容器 1 上设有连接接咀 4, 该接咀 4 可与环形激光器相连接. 实际工作时, 在空间 G 和与之连接的环形激光器毛细管内充入干燥空气, 而 Q 空间被抽成真空. 当压电陶瓷 3 上外加控制电压时, 因压电效应使绝热弹性膜片 2 变形, 改变了空间 G 和与之连接的环形激光器毛细管内干燥空气的压强, 从而改变了干燥空气的折射率, 实现了环形激光器谐振腔的光学腔长的控制.



1.Container; 2.Membrane; 3.Piezoelectric ceramics; 4.Joint

图 1 控制环形激光器光学腔长装置的结构简图
Fig. 1 Scheme of the device of controlling the optical cavity length of ring laser

这种新型控制环形激光器光学腔长装置的工作原理分析如下:

1.1 干燥空气折射率随压强的变化关系

设空间 G 和与之连接的环形激光器毛细管内干燥空气的压强、温度、体积为 P 、 T 、 V ，由于空气压强很低，可以近似地看作是理想气体，其状态参量满足理想气体状态方程

$$P = \frac{mRT}{M} \frac{1}{V} \quad (2)$$

式中， m 为空气的质量， M 为空气的摩尔质量， R 是普适气体常量。

当气体状态变化过程视为绝热过程时，空气体积的变化 ΔV 与相应压强的变化 ΔP 关系为^[5]

$$\Delta V = -\frac{V\Delta P}{\kappa P} \quad (3)$$

式中， κ 为空气的绝热指数。根据式(1)~(3)，可得空气折射率变化 Δn 与其压强变化 ΔP 关系为

$$\Delta n = \frac{C(\lambda)mR}{\kappa MVP} \Delta P \quad (4)$$

1.2 干燥空气折射率随压电陶瓷上外加电压的变化关系

根据第一类压电方程^[6]，可得圆筒形压电陶瓷的位移 Δl_t 与所加电压 ΔU 的关系为

$$\Delta l_t = \frac{d_{31}l_t}{d_r} \Delta U \quad (5)$$

式中， l_t 为筒高， d_r 为壁厚， d_{31} 为压电系数。

假设绝热弹性膜片是半径为 r 的圆形弹性薄板，如图2，它变形后是高为 h 的球冠，则因压电陶

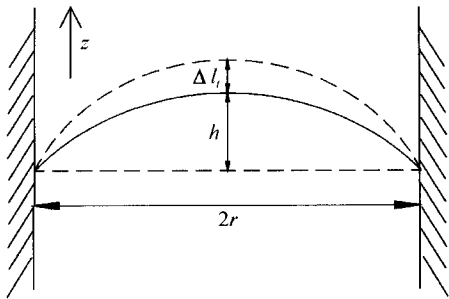


图2 绝热弹性膜片的形变

Fig. 2 Deformation of adiabatic elastic membrane

瓷沿 z 向变化 Δl_t ，引起干燥空气的体积变化为

$$\Delta V = -(\pi/2)(h^2 + r^2)\Delta l_t \quad (6)$$

考虑到实际工作中， $r \gg h$ ，因而有

$$\Delta V \approx -(\pi/2)r^2\Delta l_t \quad (7)$$

所以在忽略绝热弹性膜片对压电陶瓷的应力作用时，由式(4)、(5)、(7)，可以得到空气折射率的变化 Δn 与压电陶瓷上外加电压 ΔU 的关系为

$$\Delta n = \frac{\pi r^2 l_t PC(\lambda) d_{31}}{2VT d_r} \Delta U \quad (8)$$

1.3 控制环形激光器光学腔长装置的灵敏度

设环形激光器中通过干燥空气的光路几何长度为 l_0 ，则稳频系统对环形激光器光学腔长的补偿量 $\Delta L_{\text{补}}$ 与压电陶瓷所加电压 ΔU 的关系为

$$\Delta L_{\text{补}} = l_0 \Delta n = K \Delta U \quad (9)$$

式中 K 为装置的灵敏度，其表达式为

$$K = \frac{\pi r^2 l_t l_0 PC(\lambda) d_{31}}{2VT d_r} \quad (10)$$

由以上关系式可见，该控制环形激光器光学腔长的装置，通过改变压电陶瓷上的外加电压可以控制干燥空气的折射率，从而实现了对环形激光器光学腔长的控制。

设圆筒形压电陶瓷的筒高 $l_t = 10 \text{ mm}$ ，壁厚 $d_r = 0.1 \text{ mm}$ ，压电系数 $d_{31} = 5 \times 10^{-11} \text{ C/N}$ ， $r^2/V = 0.05 \text{ mm}^{-1}$ ，干燥空气的压强 $P = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，干燥空气的温度 $T = 25^\circ \text{C}$ ，环形激光器中通过干燥空气的光路几何长度为 $l_0 = 0.1 \text{ m}$ ，则根据式(10)，可以计算出 $K = 1.3 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{V}^{-1}$ 。通常，因外界环境影响(主要是温度的影响)，环形激光器光学腔长的最大变化量 $(\Delta L_{\text{外}})_{\text{max}}$ 为几至几十微米^[2]，因此，压电陶瓷上外加电压最大变化量 ΔU_{max} 为几至十几伏即可补偿环形激光器光学腔长的变化。由此可见，控制环形激光器光学腔长装置的灵敏度很高。

2 控制环形激光器光学腔长新方法的优点

由上述控制环形激光器光学腔长装置的工作原理可见，该装置具有如下优点：

1) 由于该装置不改变干燥空气的温度，所以它与环形激光器之间不存在温度梯度。

2) 由于该装置响应速度取决于压电陶瓷、绝热弹性膜片的响应速度和空气的驰豫时间，因此，该装置的调整时间短、启动速度和响应速度快。

3) 由于该装置内干燥空气压强的改变量取决于绝热弹性膜片的形变量，而与绝热弹性膜片的具体形状无关。因此当压电陶瓷发生非线性^[7]弯曲变形时，该装置仍可稳定工作，并且对环形激光器的性能没有影响。

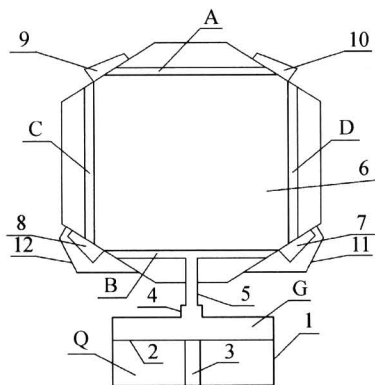
4) 该装置具有很高的灵敏度。

在实际工作中，控制光学腔长装置能产生的最大补偿量 $(\Delta L_{\text{补}})_{\text{max}}$ 应大于光学腔长的最大变化量 $(\Delta L_{\text{外}})_{\text{max}}$ ，但因压电陶瓷上的外加电压 ΔU 不可能太高，所以为补偿尽可能大的光学腔长变化，应尽量提高控制光学腔长装置的灵敏度 K 。由式(10)可知，工作中通过增大气体压强 P ，可以方便地提高光学腔长装置的灵敏度 K 。

3 环形激光器光学腔长控制装置的应用

3.1 在全反射棱镜式环形激光器中的应用

控制环形激光器光学腔长装置可用于全反射棱镜式环形激光器^[8]的稳频系统中,如图 3. 控制环形激光器光学腔长装置中的接咀 4 通过绝热管 5 与全反射棱镜式环形激光器中的毛细管 B 相连接,6 为环形激光器的腔体,7~10 为全反射棱镜,11~12 为保护罩,A、B、C、D 为环形激光器的四个毛细管. 环形激光器的毛细管 A 通过全反射棱镜 9、10 封闭,管内充入增益气体;环形激光器的毛细管 B 通过保护罩 11、12 封闭,并与空间 G 一起充入干燥空气;毛细管 C、D 内为真空.

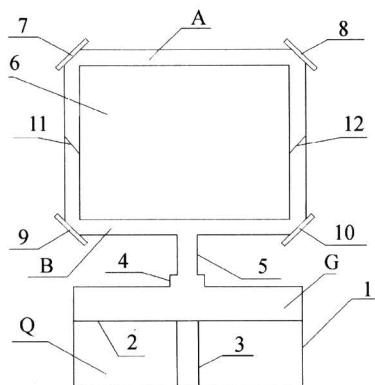


1.Container; 2.Membrane; 3.Piezoelectric ceramics; 4.Joint; 5.Pipe; 6.Cavity; 7-10. Prism; 11,12.Cap

图 3 用于控制全反射棱镜式环形激光器腔长
Fig. 3 Sketch map of ring laser with total reflecting prisms for controlling the optical cavity length of ring laser

3.2 在反射棱镜式环形激光器中的应用

将控制环形激光器光学腔长的装置用于反射镜式环形激光器的稳频系统中,如图 4. 控制环形激光器光学腔长的装置中的接咀 4 通过绝热管 5 与反射镜式环形激光器中的毛细管 B 相连接. 6 为反射镜



1.Container; 2.Membrane; 3.Piezoelectric ceramics; 4.Foint; 5.Pipe; 6.Carity; 7-10.Reflecting mirror; 11,12.Brewster window

图 4 用于控制反射镜式环形激光器腔长
Fig. 4 Sketch map of ring laser with reflecting mirror for controlling the optical cavity length of ring laser

式环形激光器的腔体,7~10 为反射镜,11、12 为布儒斯特窗片,该窗片将环形激光器的毛细管光路分隔为 A、B 两部分,毛细管 A 区内充入增益气体,B 区和空间 G 内充入干燥空气.

3.3 稳频工作过程

控制环形激光器光学腔长装置与稳频伺服电路组成了稳频系统,如图 5. 其稳频过程除控制光学腔长的工作过程外,与通常的激光器稳频系统^[9]相同. 当环形激光器振荡频率为标准频率 ν_0 时,输出光强被 $2f$ 频率调制,相应的光电检测信号不能通过选频放大器;当外界环境引起环形激光器的光学腔长变化外 $\Delta L_{外}$ 时,振荡频率 ν 偏离标准频率 ν_0 ,输出光强被 f 频率调制,相应的光电检测信号可以通过选频放大器,但其相位因振荡频率 ν 大于 ν_0 或小于 ν_0 不同,而与振荡器的参考信号反相或同相. 将这个误差信号和振荡器的参考信号送到相敏检波器进行比较,相应于环形激光器振荡频率为 ν_0 和 ν 的情况,相敏检波器输出的伺服电压分别为零和正、负电压. 该电压经直流放大后,加到压电陶瓷上,控制绝热弹性膜片的形变、控制环形激光器毛细管内干燥空气的压强和折射率,从而控制环形激光器光学腔长变化,使环形激光器振荡频率保持为 ν_0 或由 ν 趋向 ν_0 变化. 环形激光器振荡频率 ν 越靠近 ν_0 ,误差信号越小,直到误差信号变为零. 此时,光学腔长变化 $\Delta L_{补} \approx -\Delta L_{外}$,环形激光器的振荡频率被锁定在 ν_0 处,实现了环形激光器的频率稳定.

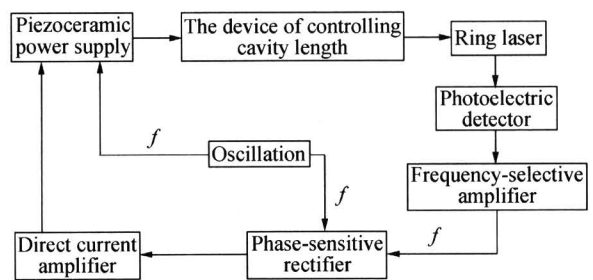


图 5 控制环形激光器光学腔长装置的稳频原理
Fig. 5 Frame diagram of frequency stabilization theory for controlling the optical cavity length of ring laser

4 结论

本文提出了一种新型控制环形激光器光学腔长的方法,这种方法利用压电陶瓷电控环形激光器毛细管内干燥空气的折射率,实现对环形激光器光学腔长的控制. 该方法具有对环形激光器性能影响小、响应速度快、灵敏度高、功耗低、结构简单等优点,在高准确度全反射棱镜式激光陀螺、反射镜式激光陀螺中的环形激光器的稳频系统中,具有重要的应用前景. 此外,该方法也可以应用在直腔激光器稳频系统中.

参考文献

- 1 姚合宝,韩宗虎,陈林峰,等. 抖动偏频激光陀螺速率阈值特性研究. 光子学报,2001,**30**(9):1085~1087
Yao H B, Han Z H, Chen L F, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(9):1085~1087
- 2 杨培根,龚智炳. 光电惯性技术. 北京:兵器工业出版社, 1999. 80~82
Yang P G, Gong Z B. *Optoelectronic Inertial Technology*. Beijing: Weapon Industry Press, 1999. 80~82
- 3 马有年,袁晓东. 激光陀螺(LG)的稳频装置. 中国惯性技术学报,1994,**2**(4):50~52
Ma Y N, Yuan X D. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 1994, **2**(4): 50~52
- 4 王之江,陈杏蒲,陆汉民,等. 光学技术手册. 北京:机械工业出版社,1987. 683
Wang Z J, Chen X P, Lu H M, *et al.* *Optics Technology Handbook*. Beijing: Machine Industry Press, 1987. 683
- 5 詹宗勉. 工程热力学和传热学. 大连:大连海事大学出版社,1995. 56
Zhan Z M. *Engineering Thermodynamics and Introduction Calorifics*. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1995. 56
- 6 华南工学院,天津大学. 压电陶瓷. 北京:国防工业出版社,1979. 23~26
Huanan Industrial Institute, Tianjun University. *Piezoelectric Ceramics*. Beijing: National Defence Industry Press, 1979. 23~26
- 7 章海军,张冬仙. 原子力显微镜的压电陶瓷非线性及图象畸变的校正. 光子学报,2002,**31**(10):1252~1253
Zhang H J, Zhang D X. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10):1252~1253
- 8 赵东洋,石顺祥,蒋军彪,等. 全反射棱镜式环形激光器耦合输出的理论分析. 光子学报,2005,**34**(5):652~655
Zhao D Y, Shi S X, Jiang J B, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5):652~655
- 9 蓝信钜. 激光技术. 北京:科学出版社,2000. 194~203
La X J. *Laser Technology*. Beijing: Science Press, 2000. 194~203

A New Method for Controlling Optical Length of Ring Laser

Zhao Dongyang^{1,2}, Shi Shunxiang¹, Li Jiali¹

¹ Xidian Univ., Xi'an 710071

² Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan 430074

Received date: 2005-06-28

Abstract A method for controlling the optical cavity length of ring laser is presented. The control of optical cavity length of ring laser is realized by controlling the refractive index of dry air in capillary of ring laser by using of piezoelectric ceramics. The method has few influences on performance of ring laser. It has advantages of high speed of response, high sensitivity, and low power consumption. It can be applied to frequency stabilizing systems of ring laser with reflector and ring laser with total reflection prism. This method has important purposes in laser gyro and laser measure.

Keywords Cavity-length-controlling; Ring laser; Piezoelectric ceramics; Frequency stabilization



Zhao Dongyang was born in 1979. He studied in Xidian University in 2002~2005, and majored in physical electronics. He mainly engaged in the research of laser gyro. And now he is working in Huazhong Institute of Electro-Optics.