

# 激光锁定 F-P 腔频率的有差锁定研究

李传亮 邓伦华 杨晓华 陈扬骏

(华东师范大学,精密光谱科学与技术国家重点实验室,上海 200062)

**摘要** 基于有差伺服调节技术,实现了外置光学谐振腔的共振频率与钛宝石激光器工作频率的锁定。该技术采用压电陶瓷作为执行元件,通过对压电陶瓷的调制,实现了对透射激光功率的调制,并由锁相放大器解调获得伺服信号,该伺服信号经过高压放大器放大后控制压电陶瓷的伸缩来调控谐振腔的腔长,从而使腔的共振频率锁定在激光频率上。当激光工作于单一频率时,谐振腔的谐振频率可以长时间地与激光频率保持锁定,锁定后腔的透射光功率相对起伏的稳定性为 2%。当激光频率扫描时,谐振腔的谐振频率可以在 2 GHz 范围内不间断地与激光频率保持锁定。

**关键词** 激光光谱学; 自动调节技术; 光学谐振腔; 腔增强光谱

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092910.2822

## External Optical Cavity Locked by Laser Frequency

Li Chuanliang Deng Lunhua Yang Xiaohua Chen Yangqin

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract** With the peak-seeking servo-controlled technology based on a residual error, an external optical cavity can keep in resonance with the frequency of Ti-sapphire laser in the experiment. The servo loop uses a piezoelectric transducer (PZT) as a modulator, which modulates the intensity of the transmitted light passing through the cavity. The servo signal is obtained from the lock-in amplifier, then it is amplified by a high voltage amplifier, which adjusts the length of the cavity according to the laser frequency. In this approach, the resonant frequency of the cavity can be locked to the laser frequency for a long time as the laser operates in a fixed frequency and the relative fluctuation of output power from the cavity is lower than 2%. When the frequency of the laser scans, the cavity is also capable to follow the variation of laser frequency automatically in an uninterrupted range of 2 GHz.

**Key words** laser spectroscopy; automatic servo-controlled technology; optical cavity; cavity enhanced spectroscopy

## 1 引 言

腔增强吸收光谱(CEAS)技术是一种能获得较高探测灵敏度的光谱测量方法。该技术是将被测样品放置到高 Q 值的谐振腔内,利用光子在腔内的较高寿命实现多光程效应,可以在有限的空间内获得很长的吸收路径,大大提高了光谱的测量灵敏度。O'Keefe<sup>[1]</sup>, Berden<sup>[2]</sup> 和 Cheung 等<sup>[3]</sup> 采用周期性扫描腔长,通过积分和平均的方法获取增强信号,而且 Cheung 等<sup>[3]</sup> 获得了  $4.8 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1}$  的灵敏度;赵

卫雄等<sup>[4,5]</sup> 采用离轴积分腔输出光谱技术,灵敏度达到  $4 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$ ; 吴升海等<sup>[6]</sup> 在 CEAS 基础上又结合了磁旋转光谱技术,在细度为 48 的谐振腔中也实现了  $4.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$  的灵敏探测。由于腔的谐振频率和激光频率不能同步锁定,CEAS 技术通常获得谱线的基线不稳定,信噪比差,容易受到外界机械振动和温度漂移的影响,并且降低了腔的原有精细度<sup>[1,7]</sup>。因此在采用连续调谐的激光进行 CEAS 的实验过程中,希望激光扫描时,谐振腔始终与激光

收稿日期: 2008-12-12; 收到修改稿日期: 2009-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(10574045)和国家科技部重大研究计划项目子课题(2006CB921604)资助课题。

作者简介: 李传亮(1983—),男,博士研究生,主要从事原子分子光谱方面的研究。E-mail: 51060602031@student.ecnu.edu.cn

导师简介: 陈扬骏(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事激光光谱测量技术和原子分子光谱学等方面的研究。

E-mail: yqchen@phy.ecnu.edu.cn(通信联系人)

频率保持共振,以便输出最大的透射光强,从而获取吸收光谱。

本文采用了一种可用于激光腔增强光谱实验的有差锁腔技术,这种锁腔技术的原理和实验过程都十分简单,采用这种技术可以使谐振腔长时间锁定在线宽为 500 kHz 激光频率上,当激光扫描时,还可以使谐振腔的共振频率跟随激光频率保持同步共振,锁定后光强的输出功率起伏较小,非常适合大范围激光扫描的腔增强吸收光谱测量。

## 2 实验装置

实验方框图如图 1 所示。光源采用半导体抽运的全固化激光器(Coherent Verdi™ 10)抽运连续可调谐钛宝石激光器(Coherent 899-29),其波长可以大范围调谐 700~820 nm,适合原子分子光谱测量。为防止腔镜反射使激光原路返回,造成激光工作的不稳定,在激光输出端放置法拉第旋光器(Faraday cage)作光学隔离器。谐振腔由两个曲率半径  $R = 50$  mm,反射率为 99%(850 nm)的凹面反射镜(M1 和 M2)构成法布里-珀罗(F-P)共焦谐振腔(腔长为 50 mm)。M2 腔镜固定在伸长系数为 3.4 nm/V 的压电陶瓷管(PZT,  $\phi 15$  mm  $\times$  15 mm)上。信号发生器产生的调制信号( $f_M = 3$  kHz,  $V_{PP} = 3.5$  V)加载到 PZT 上,产生对腔长的调制。通过 F-P 腔的透射光强由光电探测器探测后送入锁相放大器进行同频解调,获得具有二次微分线型的鉴频信号,鉴频信号再经过高压放大器放大后加载到 PZT 上,调节腔长,保持伺服回路的负反馈特性,从而使腔频锁定在激光频率上。光电探测器的放大倍数为 5 倍,锁相放大器的放大倍数约为 50 倍,高压放大器采用 PA241 集成模块,放大倍数为 50 倍,最高正向输出电压为 +150 V,因而系统的增益大于  $10^4$ 。

谐振腔的频率对环境的扰动非常敏感。当腔的

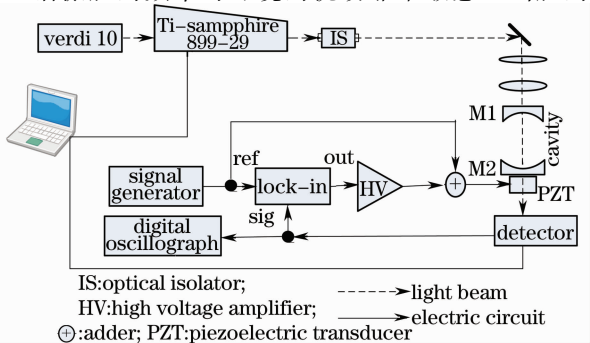


图 1 锁腔实验方案方框图

Fig. 1 Block diagram of experimental apparatus

长度变化 1 nm 时,腔频大概要改变 4 MHz,所以在实验中保持腔的稳定是非常重要的。为了减小空气流动及外界振动对谐振腔的影响,腔镜紧固在精密三维光学调整架上,镜架固定在 4 cm 厚的大理石板上,在大理石下面安装有防震垫,并将其放置在光学防震平台上,整套装置放置在有机玻璃罩里面,这样不仅可以克服机械振动、声振动和气流对谐振腔的影响,而且由于大理石的热胀系数很小,还可以有效减小温度变化对腔长的影响。采取以上这些措施后使腔的稳定性大幅度地提高,当扫描激光时可以从计算机屏上观测到稳定的腔膜信号,如图 2 所示。

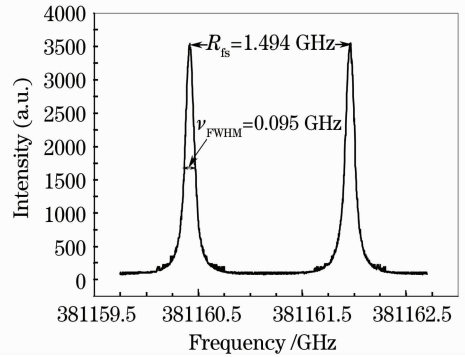


图 2 谐振腔的腔膜

Fig. 2 Mode structure of the optical cavity

## 3 控制原理

根据自动调节原理可知,采用的锁腔伺服系统属于有差调节。有差调节系统是指伺服环路锁定后,仍存在一个剩余误差。锁定后的腔长位置并不

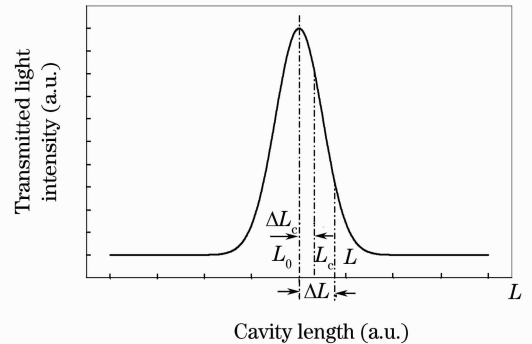


图 3 有差调节原理图。I: 透射光光强; L: 腔长;  $\Delta L = L - L_0$  为开环腔长差;  $\Delta L_c = L_c - L_0$  为闭环腔长差  
Fig. 3 Principle of servo control. I: transmitted light intensity; L: cavity length;  $\Delta L = L - L_0$ : the differential length between the cavity length and resonant position as the loop open;  $\Delta L_c = L_c - L_0$ : the differential length between the cavity length and resonant position as the loop closed

在谐振腔完全共振时对应的腔长  $L_0$  处(即  $L_0 = q\lambda/2, \lambda$  为激光波长,  $q$  为正整数), 而是在  $L_C$  处, 如图 3 所示, 正是这个剩余误差提供了闭环后的自动伺服控制信号。假设开环时的腔长为  $L$ , 锁定闭环后的腔长为  $L_C$ , 令  $\Delta L = L - L_0$  以及  $\Delta L_C = L_C - L_0$  分别表示开环和闭环时腔长偏离谐振位置的距离。这样锁相放大器输出的误差信号经过高压放大后加载到 PZT 上, 引起腔的长度变化为

$$L - L_C = A \times A_H \times K_{PZT} \times K_L \times \Delta L_C, \quad (1)$$

其中  $A$  为探测器和锁相放大器的有效放大倍数,  $A_H$  为高压放大器的放大倍数,  $K_{PZT}$  为 PZT 的伸长系数, 单位  $\text{nm/V}$ ,  $K_L$  为鉴频信号的斜率, 单位为  $\text{V/nm}$ 。令  $M = A \cdot A_H \cdot K_L \cdot K_{PZT}$ , 表示为伺服环路的增益系数, 并将  $\Delta L = L - L_0, \Delta L_C = L_C - L_0$  代入(1)式可得

$$\frac{\Delta L_C}{\Delta L} = \frac{1}{1+M}, \quad (2)$$

(2)式反映了闭环腔长差与开环腔长差的比值, 实验中增益系数大于  $10^4$ , 因此伺服环路方程可近似表示为

$$\frac{\Delta L_C}{\Delta L} \approx \frac{1}{M}. \quad (3)$$

以上说明环路增益系数越大, 剩余误差越小, 锁定后腔长位置越靠近共振峰中心值, 但是增益系数过大会容易引起系统震荡。

## 4 实验结果与讨论

谐振腔调节的好坏将影响腔内激发的模式, 当入射激光只激发谐振腔的基模时, 激光透过谐振腔的功率最大。因此在实验中要把腔模调到  $\text{TEM}_{00}$  基模上, 并抑制掉其他的高阶模式, 这样可以使腔增强效率提高<sup>[8]</sup>。为使激光模式与谐振腔的模式尽量匹配, 实验中用两块凸透镜, 运用 ABCD 系数计算变换高斯光束, 使激光与腔的横模匹配。

鉴频信号中心斜率大小和信噪比会直接影响腔的锁定精度, 腔调制频率的大小和调制幅度的选取对鉴频信号斜率影响很大。实验中选取的调制信号幅度为 3.5 V, 相当于对腔长调制 12 nm, 折合成腔的频率调制幅度为 47 MHz, 与透射峰半峰全宽的一半相当, 这样既不会使透射峰展宽, 也可以得到中心斜率较大的鉴频信号<sup>[9]</sup>。加载在 PZT 上的调制频率为 3 kHz, 这是因为由外界环境引起的腔的抖动频率较高、变化时间较快, 因此调制频率取高些有利于对腔的伺服控制, 但调制频率不能超出 PZT 的

频率响应范围。

图 4 是对 PZT 加载调制信号后, 通过激光扫描得到的腔模及锁相解调信号。图中激光频率的扫描速度为 16.7 MHz/s (由 CR899-29 钛宝石激光系统的 Auto-scan 控制)。因此, 扫描一个自由光谱区 ( $R_{fs} \approx 1.5 \text{ GHz}$ ) 的时间为 90 s。经过锁相放大器 (100 ms 积分时间, 500 mV 灵敏度) 解调后, 可以得到线型为一次微分线型的鉴频信号, 信噪比为 171 ( $1\sigma$ )。

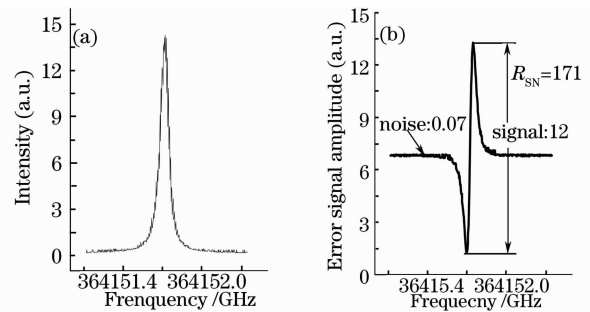


图 4 调制信号(a)和误差信号(b)

Fig. 4 Modulated signal (a) and Error signal (b)

当激光工作于单一频率时, 谐振腔长度可以数小时锁定在激光频率上, 保持经过腔后的激光透射功率最大并十分稳定。图 5 为数字示波器记录的 10 min 内的透射光信号功率起伏情况, 功率起伏的相对稳定度为 2% ( $1\sigma$ )。激光自身的功率起伏相对稳定度经测量为 1%。因此锁定后的透射光的功率起伏主要来源于激光器的功率起伏, 其余来自探测器的电子噪声, 以及外界环境的干扰。

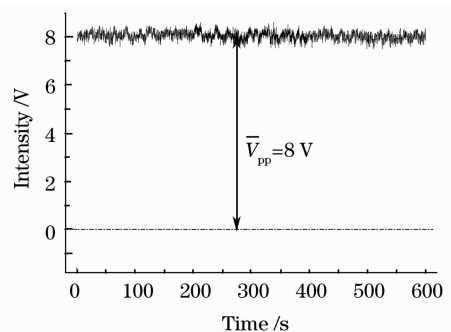


图 5 示波器记录的谐振腔的透射功率

Fig. 5 Output power of the optical cavity shown on the oscilloscope

当激光频率扫描时, 扫描速度为 16.7 MHz/s, 伺服环路通过改变加载在 PZT 上的电压来改变腔长, 保持谐振腔始终与激光的频率共振。图 6 为采样示波器记录的锁定后的透射光强信号以及高压放大器加载到 PZT 上的电压信号与扫描时间的关系。当激光扫描时, 加载在 PZT 上的电压线性增长, 说明腔长连续改变, 保持与激光共振和透射光强的稳

定。由于加载在 PZT 上的电压不能无限增加, PZT 也不能无限制地伸长, 因此, 在激光频率扫描时谐振腔共振频率不能一直跟随激光频率锁定, 锁定范围取决于放大器的电压输出范围。我们采用的高压放大器输出最大电压可达 150 V 左右, 相当于可以连续扫频 2 GHz。

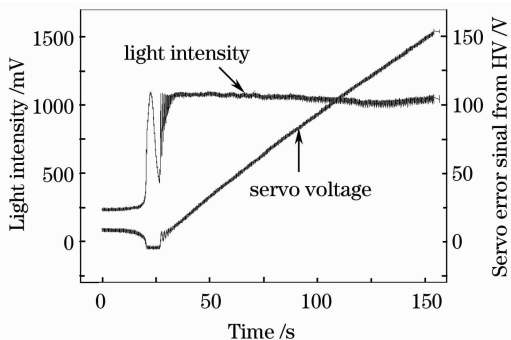


图 6 透射峰信号和高压放大器的输出信号

Fig. 6 Output power of the optical cavity and the error signal from the HV

图 7 所示为 CR 899-29 激光器连续扫描时由激光器控制系统直接采集的通过腔的透射光强信号。从图中可以看出谐振腔可以在 2 GHz 扫描范围内与激光保持共振, 锁定后透射光功率起伏相对稳定性为 1.3% ( $1\sigma$ )。若激光扫描频率超出 2 GHz 的范围, 则加在 PZT 上的电压已达到 150 V 的最大输出电压, 此时锁定系统将会脱锁。但是当激光继续扫描, 由于系统的自动伺服作用, 谐振腔的谐振频率在短暂脱锁后会再次与激光频率重新锁上, 中断的频率范围小于 120 MHz。因此, 随激光频率扫描, 腔频可以一直跟随激光频率共振, 每扫描 2 GHz 左右的范围, 脱锁

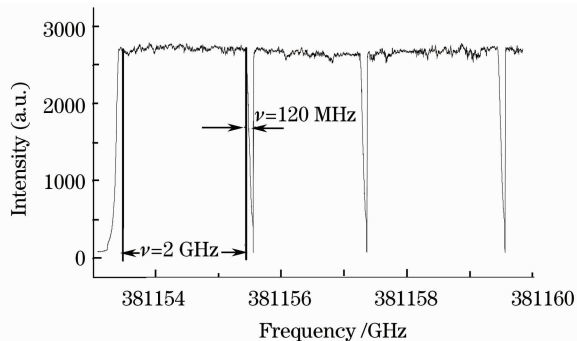


图 7 激光频率扫描时谐振腔透射信号的功率

Fig. 7 Output power of the optical cavity shown above when laser frequency scans

120 MHz 又重新锁上, 因而这样的锁腔系统可用于腔增强激光光谱的实验测量。要进一步增长不间断扫描锁定范围, 可以采用伸长系数更大的 PZT, 或者进一步提高高压放大器的高压输出范围。

## 5 结 论

本文介绍了采用有差伺服调节技术将外置谐振腔和激光频率的同步锁定。腔的谐振频率可以自动跟随激光频率的扫描连续变化, 保持输出光强最大并且稳定。这种技术可用于腔增强吸收光谱以提高增强因子和光谱测量灵敏度, 以及用于其它光电检测系统。实验中如果采用更高反射率的腔镜则可以提高系统的锁定精度和灵敏度, 并且使系统的增强效果更加明显。

## 参 考 文 献

- 1 A. O'Keefe. Integrated cavity output analysis of ultra-weak absorption [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1998, **293**(5-6): 331~336
- 2 G. Berden, R. Peeters, G. Meijer. Cavity-enhanced absorption spectroscopy of the 1.5 mm band system of jet-cooled ammonia [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1999, **307**(3-4): 131~138
- 3 A. S. -C. Cheung, Tongmei Ma, Hongbing Chen. High-resolution cavity enhanced absorption spectroscopy using an optical cavity with ultra-high reflectivity mirrors [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2002, **353**(3-4): 275~280
- 4 Zhao Weixiong, Gao Xiaoming, Zhang Weijun *et al.*. High-sensitivity off-axis integrated cavity output spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1260~1264  
赵卫雄, 高晓明, 张为俊等. 高灵敏度离轴积分腔输出光谱技术 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1260~1264
- 5 Zhao Weixiong, Gao Xiaoming. Wavelength modulated off-axis integrated cavity output spectroscopy in the near infrared [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **86**: 353~359
- 6 Wu Shenghai, Yang Ming, Chen Yangqin *et al.*. Magnetic rotation cavity enhanced spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 265~269  
吴升海, 杨 铭, 陈扬旻等. 磁旋转腔增强光谱技术 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 265~269
- 7 Pei Shixin, Gao Xiaoming. Study of cavity enhanced absorption spectroscopy based on a swept diode laser [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2004, **2**: 30~33  
裴世鑫, 高晓明. 基于扫描激光的腔增强吸收光谱研究 [J]. *光学与光电技术*, 2004, **2**: 30~33
- 8 A. O'Keefe, J. J. Scherer, J. B. Paul. Cw integrated cavity output spectroscopy [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1999, **307**(5-6): 343~349
- 9 Liu Yuyan, Li Fengting. Effert of modnlation on magnetic resonance lines [J]. *Chinese J. Magnetic Resonance*, 1990, **7**: 374~381  
刘煜炎, 李奉廷. 调制对磁共振谱的线宽、线性及幅值得影响 [J]. *波谱学杂志*, 1990, **7**: 374~381