

文章编号: 0258-7025(2009)04-0804-05

数字伺服系统实现激光器频率长期锁定

姬中华 张冉冉 马杰 董磊 赵延霆 贾锁堂

(山西大学物理电子工程学院 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 报道了一种用共焦法布里-珀罗(F-P)腔和稳定的 He-Ne 激光对受控半导体激光器进行长时间频率锁定的方法:稳定的 He-Ne 激光作为参考标准,通过信号发生器和高压放大器扫描共焦 F-P 腔,同时将 He-Ne 激光与受控激光注入 F-P 腔,得到 He-Ne 激光与受控激光的透射峰信号,将探测到的透射峰信号输入到数据采集卡中,用 LabVIEW 软件编写的程序可以确定扫描腔体时所有峰的位置,计算出 He-Ne 激光透射峰和受控激光透射峰的相对位置。与设定值比较,产生反馈电压信号使受控激光器频率稳定在设定值,将 He-Ne 激光的稳定性转移到受控激光上。利用此方法,实现了将半导体激光器(DL100)的激光频率稳定在所选择的波数为 $11716.1706 \text{ cm}^{-1}$ 的位置,一小时频率漂移小于 $\pm 2 \text{ MHz}$ 。

关键词 频率稳定;数字伺服系统;法布里-珀罗腔;参考频率标准

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093604.0804

Long-Term Frequency Stabilization with Digital Servo System

Ji Zhonghua Zhang Ranran Ma Jie Dong Lei Zhao Yanting Jia Suotang

(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,
College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China*)

Abstract A method which stabilizes the frequency of the slave laser in long time by confocal F-P cavity and stabilized He-Ne laser is reported. A frequency-stabilized He-Ne laser is employed as a reference, He-Ne laser and slave laser are injected to confocal F-P cavity which is scanned by a signal generator and a high-voltage amplifier at the same time. The transmission peak signals which are detected by photodetectors are delivered to data acquisition card. A program using LabVIEW software can determine all peak positions and calculate the relative position of transmission peak signals of He-Ne laser and the slave laser. Feedback voltage is generated to make the relative position of He-Ne laser and the slave laser equal to setting values, then the stability of He-Ne laser is translated to the slave laser. Using this method, a laser diode (DL 100) is stabilized at wavenumber of $11716.1706 \text{ cm}^{-1}$ and the frequency drift is less than $\pm 2 \text{ MHz}$ in one hour.

Key words frequency stabilization; digital servosystem; Fabry-Pérot cavity; reference frequency standard

1 引言

由于半导体激光器具有体积小、功耗低、波长覆盖范围大、且易于调谐和调制等优点,被广泛应用于光通信、光信息读写和激光光谱等领域^[1]。实验中最为关心的是其频率锁定的位置及长期稳定性。目前半导体激光器稳频的方法主要有:外腔稳频方法、原子或分子线稳频方法、法布里-珀罗(F-P)标准

具方法^[2]。锁频的思想是将激光器的频率锁定在原子或分子跃迁线上^[3~6],或 F-P 腔的透射峰上^[7~9]。前者以饱和吸收稳频为代表,饱和吸收稳频由于其简易有效,稳定性复现性好等特点得到了广泛的应用,但缺点是只能将激光稳定在原子分子固有的跃迁线上,利用移频器改变激光频率的范围也是很有限制的。利用 F-P 腔稳频,则对腔体的稳定性要求很

收稿日期: 2008-05-20; **收到修改稿日期**: 2008-06-30

基金项目: 国家 973 计划(2006CB921603)、国家自然科学基金(10574084, 60678003)、国家重大基础研究前期研究专项(2005CCA06300)和国家基础科学人才培养基金(J0730317)资助项目。

作者简介: 姬中华(1983-),男,硕士研究生,主要从事超冷原子分子光谱的研究。Email: jzh19830215@163.com

导师简介: 贾锁堂(1958-),男,教授,博士生导师,主要从事原子分子物理的研究。E-mail: tjia@sxu.edu.cn

高,通常需要使用精确的温控来获得长期稳定性。虽然也有其他的稳频方式,如外光注入方法^[10]、纵模拍频方法^[11],但都无法同时突破原子分子跃迁线稳频和 F-P 腔稳频的限制,将激光长期地稳定在激光器频率覆盖范围内的任意频率。如果实现将激光器频率长期锁定在激光频率覆盖范围内的任意频率,则是一个技术上的突破,为半导体激光器的使用扩展了空间。为了解决这样的问题,已有实验小组采取了以稳定的 He-Ne 激光为参考频率,通过扫描 F-P 腔将 He-Ne 激光的高稳定性转移到受控激光上的方法。利用这种方法,达到了将外腔半导体激光器的激光频率长期稳定在所需要的频率上,频率漂移在 2~6 MHz 内^[12,13]。

本实验室正在进行的双色光缔合产生超冷分子的实验,迫切需要将半导体激光长时间地稳定在所需要的分子吸收线上,实现将半导体激光器可以稳定在一定频率范围内的任意频率上。

2 实验原理与装置

用 LabVIEW 程序编写的数字伺服系统控制程序,对半导体激光器(DL100,853 nm)进行监视和锁频,将 He-Ne 激光的高稳定性通过共焦 F-P 腔转移到半导体激光器上,实现了半导体激光器的任意频率长期的稳定。通过 LabVIEW 软件编程实现的数据采集系统记录 He-Ne 激光和半导体激光经过共焦 F-P 腔的透射峰,比较半导体激光的透射峰与频率稳定的 He-Ne 激光的透射峰的相对位置,产生一个误差信号,从而控制激光器频率的漂移,实现激光器频率的长期稳定。利用这种方法,突破了普通锁频只能稳定在原子分子吸收线的限制,也不需要高稳定性性能的 F-P 腔,实现了将激光器长期锁定在频率覆盖范围内的任意位置;并且数字伺服系统比模拟伺服系统的修正范围更大,有利于激光器的长期稳频。另外,直观的用户界面显示出光谱分析的结果,便于监视激光器的模式和稳定度。这种方案也很容易实现多台激光器的同时稳频。

图 1 为数字伺服系统的稳频实验装置,图中 PBS 为偏振分束棱镜; $\lambda/2$ 为半波片;PZT 为压电陶瓷; D_1, D_2 为光电二极管;DAQ 为数据采集卡。He-Ne 激光(SL 02/1)和半导体激光(DL100,853 nm)经偏振分束棱镜注入共焦 F-P 腔,通过共焦腔后,利用偏振分束棱镜将两束光分开,分别用探测器 D_1, D_2 (Hamamatsu S3884)探测 He-Ne 激光的信号和半导体激光的信号;数字信号发生器产生的三

角波信号通过高压放大器加在共焦 F-P 腔的压电陶瓷上,同时给数字采集卡一个触发信号;用 LabVIEW 软件编写的数字伺服程序可以显示 DAQ 采集到 He-Ne 激光和受控半导体激光的透射峰信号,并计算出 He-Ne 激光和受控激光的透射峰位置及相对位置比值,锁频时,产生反馈电压信号使两者的相对位置比值等于设定值,实现受控激光的锁频。

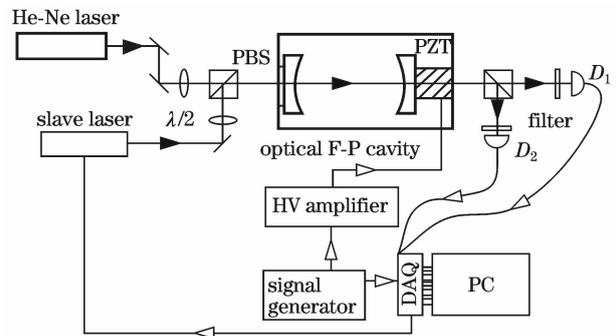


图 1 稳频实验装置(实心箭头表示光路,空心箭头表示电路连接)

Fig.1 Frequency stabilization experimental setup (the solid arrows indicate the optical paths and the hollow ones indicate the electrical connections)

使用的参考激光器是由德国 SIOS Messtechnik GmbH 公司生产的高稳定 He-Ne 激光器(型号 SL 02/1),频率稳定性指标为 $\pm 2 \times 10^{-9}/\text{min}$, $\pm 1 \times 10^{-8}/\text{h}$, $\pm 2 \times 10^{-8}/\text{d}$ 。通过外部直流电压可以控制 853 nm 半导体激光器(DL100)的频率。为减弱两束光的相互影响,在探测器前加上窄带滤光片。探测器 D_1 接收 He-Ne 激光经共焦腔后的信号,探测器 D_2 接收半导体激光经腔体后的信号。

所用的共焦 F-P 腔的两平凹镜的间隔为 10 cm,自由光谱区为 750 MHz。平凹腔镜具有较大的反射带宽:在 600~900 nm 间的反射率约为 99%。F-P 腔的腔体为热膨胀系数很低的殷钢制成,减小了热漂移引起的腔体不稳定,同时用软橡胶垫将腔体与实验平台隔离,减小外部振动对腔体的影响。数字信号发生器产生的三角波扫描信号通过高压放大器加在压电陶瓷上,用以周期性地改变腔体长度,当腔体长度 L 与光波波长 λ 满足条件: $(n\lambda/4) = L$ (n 为正整数)时,就会有透射信号产生。图 2 是典型的扫描共焦 F-P 腔时 He-Ne 激光和受控半导体激光的透射峰信号。扫描的三角波电压幅度为 0~280 V,扫描频率为 10 Hz,噪声小于 100 mV。由图 2 所示的 He-Ne 激光透射峰信号的自由光谱区

和半峰全宽的比值,可以得到共焦 F-P 腔的精细度约为 70。由于腔体的热漂移,扫描腔体时不同周期内同一 He-Ne 激光透射峰所对应的电压会发生细微的变化;此外,如果压电陶瓷对扫描电压的线性响应不好,则会导致同一扫描周期内两相邻 He-Ne 激光的透射峰所对应的电压间隔有所不同,因而以同一 He-Ne 激光透射峰位置对应的电压或两相邻的 He-Ne 激光透射峰所对应的电压间隔为参考标准都是不准确的。而如果以受控半导体激光的透射峰和 He-Ne 激光透射峰的相对位置为参考,则可以不受透射峰位置和透射峰间隔变化的影响。受控激光与参考激光的关系式可以表示为^[14,15]: $\lambda_S = \lambda_M (n_S / n_M) (2N_M + \alpha) / 2N_S$, 其中, $\alpha = b/a$, b 为受控激光的透射峰到参考 He-Ne 激光某一透射峰的间隔, a 为 He-Ne 激光两透射峰的间隔(如图 2 所示), N_i , λ_i 和 n_i 分别是受控激光($i = S$)和参考激光($i = M$)的共振模式数、真空波长和折射率。选定参考频率和共振模式后,对受控激光频率影响的因素有 n_S / n_M 和 α , 在 10 Hz 的反馈速率下,忽略折射率带来的变化(在实验中,采取措施保证折射率比值基本不变,如避免室温的温差过大,用玻璃罩罩住 F-P 腔,以避免温度变化过大和空气流动带来的折射率的迅速变化),因而影响受控激光频率的因素主要是 α 的数值。如果固定 He-Ne 激光和受控半导体激光的相对位置,即固定比率 $\alpha = b/a$, 就可以消除由热漂移和压电陶瓷的非线性造成的影响,将 He-Ne 激光的高稳定性转移到受控半导体激光上。

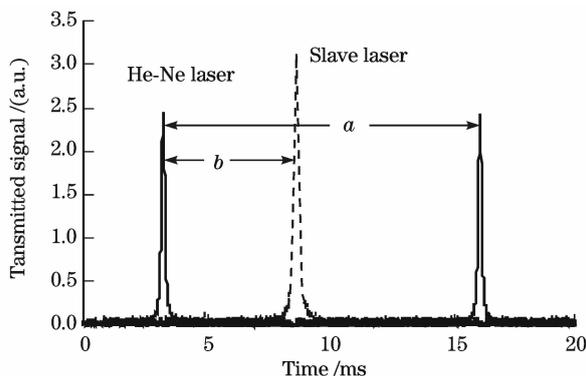


图 2 He-Ne 激光与受控半导体激光的透射峰信号(实线表示 He-Ne 激光的透射峰信号,虚线表示受控激光的透射峰信号)

Fig. 2 Transmission peak signals of He-Ne laser (solid lines) and slave diode laser (dashed line)

图 3 是数字伺服系统的程序流程图。基于 LabVIEW 软件的伺服控制程序启动后,数据采集卡(DAQ,型号 PCI-6014)的两个通道采集由光电二

极管探测到的 He-Ne 激光和受控半导体激光的光电流信号,通常的数据采样率为 10^5 dot/s,以信号发生器的触发位置为起点,将采集到的透射峰信号显示在程序页面上。每一次循环中,电脑仅记录下从 DAQ 得到的与增加电压相联系的透射峰信号,确定两条 He-Ne 激光的透射峰位置和一条受控激光的透射峰的位置。自由运转时,程序进入下一次采集数据的流程;锁频时,计算出受控激光的透射峰和第一条透射峰的间隔与 He-Ne 激光透射峰间隔的比值 α ,将此比值与设定值(0~1 之间)相比较,通过 DAQ 卡输出负反馈电压,使得这一比值稳定在设定值,实现受控激光的稳频。控制系统的响应时间取决于电源扫描频率,实验中所用的扫描频率为 10 Hz,对应的响应时间为 0.1 s。如果控制系统的响应时间太慢,难以及时地对受控激光的频率漂移进行负反馈,响应时间太快则没有必要,同时受到程序处理能力的限制(每秒采集 10^5 个点),实验中选用的扫描频率为 10 Hz,是较为理想的频率。

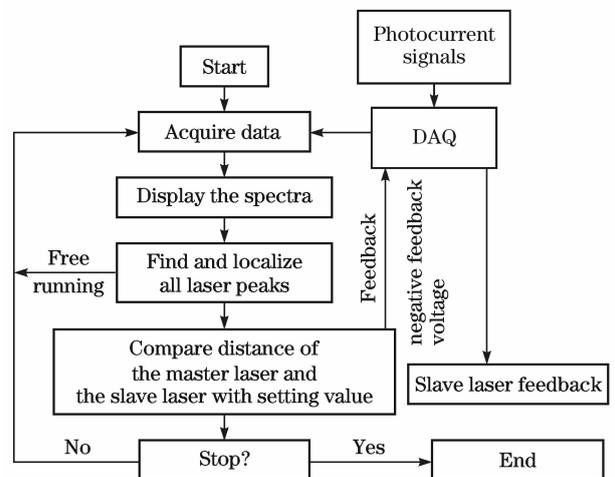


图 3 数字伺服系统的程序流程图

Fig. 3 Flow chart of digital servo system

3 实验结果与分析处理

图 4 是 853 nm 受控半导体激光器 DL100 在一个小时内锁频前后的对比图。在实验中用波长计(型号 WS7/268,由同一 He-Ne 激光器校准)显示受控激光的波长,锁频时,在待稳位置处设定对应的比率 α 。比率的范围在 0~1,对应的频率变化范围为 0~750 MHz,可以根据需要随时调整比率 α 的数值,伺服系统输出负反馈电压信号,并随时显示实际比率值与设定数值的差值,根据比率值与频率变化的对应关系,可将比率变换的数值转化为频率漂移

的数值。为了研究双色光缔合形成超冷铯分子,将半导体激光器锁频在 $11716.1706 \text{ cm}^{-1}$ 位置,对应于 Cs 分子激发态 $0_g^-(6P_{3/2})$ 振动能级 $v=55$ 。在一个小时内,激光器自由运转的频率漂移量约为 420 MHz,锁频后的频率漂移量小于 $\pm 2 \text{ MHz}$ 。这样的稳定度足以满足双色光缔合形成超冷铯分子的实验中对半导体激光器的要求。

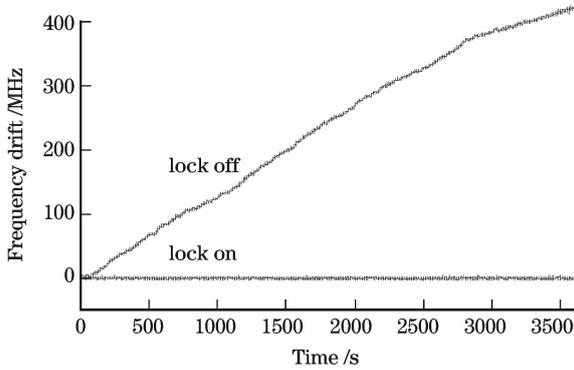


图4 受控激光器稳频前后频率漂移信号对比

Fig. 4 Comparison between the slave laser frequency drift when it's locked off and locked on

图5是用安伦方差的方法描述853 nm半导体激光器自由运转状态和锁频状态下频率稳定性的结果^[5]。表征受控激光器自由运转状态和锁频状态下频率稳定性所用的安伦方差是由2 h内的受控激光频率在两种状态下的误差信号变化,即对应于受控激光频率变化,根据安伦方差的定义计算得到的。安伦方差^[16]定义为 $\sigma^2(\tau) = \langle (\overline{y_{i+1}} - \overline{y_i})^2 \rangle / 2$, $\overline{y_i}$ 是在积分时间为 τ 时第 i 段激光频率的平均值^[17,18]。1/f 噪声、白噪声及漂移三者的综合作用^[17]使得安伦方差在锁频状态下形成了凹陷。锁频状态下,安伦方差在积分时间为66 s处达到最小值,数值为 9.5×10^{-11} 。这种方法很容易实现对多个受控激光器同时进行稳频控制,只需要将待稳激光通过共焦 F-P 腔的透射峰信号接入 DAQ 卡进行相同的处理即可。

4 结 论

利用稳定的 He-Ne 激光器和共焦 F-P 腔,通过 LabVIEW 程序实现的数字伺服系统可以使受控半导体激光器长期频率锁定,将 He-Ne 激光的高稳定性通过共焦 F-P 腔转移到了受控半导体激光器上,展示了一小时内将半导体激光器的频率漂移稳定在 $\pm 2 \text{ MHz}$ 的结果,足以满足双色光缔合形成超冷铯分子在实验中对半导体激光器的要求。直观的用户

界面显示出光谱分析的结果,可以监视在一段时间内激光器的模式和稳定度。这种方案也很容易实现多台激光器的同时稳频。

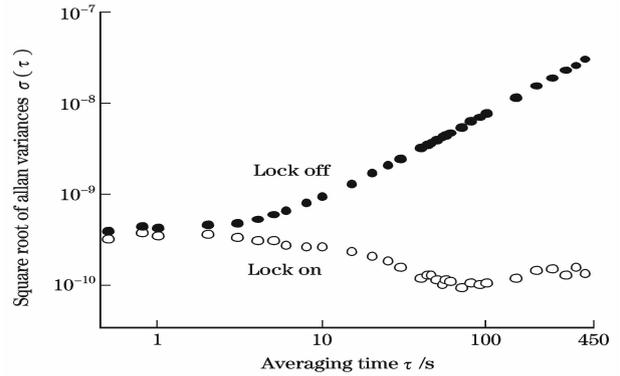


图5 853 nm 半导体激光自由运转与锁频状态下频率的安伦方差

Fig. 5 Square roots of Allan variances in frequencies of the free running 853 nm-diode laser and the stabilized one

参 考 文 献

- 1 Carl E. Wieman, Leo Hollberg. Using diode lasers for atomic physics [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **62**(1):1~19
- 2 Chen Yixiang, Xue Dajian, Cheng Botao *et al.*. Development of the stabilization of laser diode[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(1):18~21
陈翼翔, 薛大键, 程波涛等. 半导体激光器稳频技术的发展动态[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(1):18~21
- 3 J. L. Hall, L. Hollberg, T. Baer *et al.*. Optical heterodyne saturation spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **39**(9): 680~682
- 4 Craig J. Sansonetti. Precise measurements of hyperfine components in the spectrum of molecular iodine[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(8):1913~1920
- 5 Ma Jie, Wang Lirong, Zhao Yanting *et al.*. Absolute frequency stabilization of a diode laser to cesium atom-molecular hyperfine transitions via modulating molecules[J]. *App. Phys. Lett.*, 2007, **91**:161101-1~161101-3
- 6 Zhao Jianming, Yin Wangbao, Zhao Yanting *et al.*. Frequency locking of a semiconductor laser via radio-frequency modulation spectrum[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):935~938
赵建明, 尹王保, 赵延霆等. 采用射频频率调制光谱实现半导体激光器稳频[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8):935~938
- 7 Ch. Salomon, D. Hils, J. L. Hall. Laser stabilization at the millihertz level[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**:1576~1587
- 8 B. G. Lindsay, K. A. Smith, F. B. Dunning. Control of long-term output frequency drift in commercial dye lasers[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(6):1656~1657
- 9 Yang Haijing, Wang Yanhua, Zhang Tiancai *et al.*. Modulation-free frequency stabilization of a laser based on a confocal Fabry-Perot cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):316~320
杨海菁, 王彦华, 张天才等. 基于共焦法布里-珀罗腔的无调制激光频率锁定[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3):316~320
- 10 Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu *et al.*. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):50~54
张欣, 陈伟, 刘宇等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及

- 其稳定性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):50~54
- 11 Wang Lixia, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi *et al.*. Laser frequency stabilization based on control of intermode beat note[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1198~1202
- 王丽霞, 蒋燕义, 毕志毅等. 基于纵模拍频控制的激光稳频技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1198~1202
- 12 W. Z. Zhao, J. E. Simsarian, L. A. Orozco *et al.*. A computer-based digital feedback control of frequency drift of multiple lasers[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, **69**(11):3737~3740
- 13 A. Rossi, V. Biancalana, B. Mai. *et al.*. Long-term drift laser frequency stabilization using purely optical reference[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **73**(7):2544~2548
- 14 A. Yariv. *Quantum Electronics* [M]. New York: Wiley, 1989. 136
- 15 Kensuke Matsubara, Satoshi Uetake, Hiroyuki Ito *et al.*. Precise frequency-drift measurement of extended-cavity diode laser stabilized with scanning transfer cavity[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**(1A):229~230
- 16 David W. Allan. Statistics of atomic frequency standards[J]. *Proc. IEEE*, 1966, **52**(2):221~230
- 17 <http://www.allanstime.com/AllanVariance/>
- 18 Tetsuhiko Ikegami, Shoichi Sudo, Yoshihisa Sakai. *Frequency Stabilization of Semiconductor Laser Diodes* [M]. Boston • London: Artech House, 1995. 60~69