

文章编号: 0258-7025(2006)03-0316-05

基于共焦法布里-珀罗腔的无调制 激光频率锁定

杨海菁, 王彦华, 张天才, 王军民*

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 将激光器锁定到合适的参考频率上,可以有效改善激光器的频率稳定性。对于共焦法布里-珀罗(CFP)腔,沿腔轴的光路与同腔轴有一小夹角的光路对应的光程不同,因此二者对应的腔共振透射峰的频率之间会发生相对频移。这一特性可用来产生以共焦法布里-珀罗腔作为频率标准稳定激光频率的类色散型鉴频曲线,而不需要对激光频率或者共焦法布里-珀罗腔长进行调制扰动,也无需采用相敏探测。实验中实现了自制的 852 nm 光栅反馈半导体激光器相对于共焦法布里-珀罗腔的无调制频率锁定,由闭环锁定后的误差信号分析,30 s 内典型的频率起伏小于 340 kHz,较相同时间段内激光器自由运转时的频率起伏(约 10 MHz)有了显著的改善。还通过调节入射到共焦法布里-珀罗腔两光束之间的夹角来改变频移量,对不同频率间隔下的类色散型鉴频曲线的斜率以及对激光器锁频后的频率稳定性作了比较。

关键词 激光技术;共焦法布里-珀罗腔;无调制稳频;光栅反馈外腔半导体激光器

中图分类号 TN 24 **文献标识码** A

Modulation-Free Frequency Stabilization of a Laser Based on a Confocal Fabry-Perot Cavity

YANG Hai-jing, WANG Yan-hua, ZHANG Tian-cai, WANG Jun-min

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Device,

Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract Locking laser to a proper reference frequency can obviously improve the laser's frequency stability. The optical path and frequencies are different for axial and paraxial beams traveling through a confocal Fabry-Perot (CFP) cavity, thus the frequency difference between them which is a dispersion-like signal can be used to stabilize the laser frequency. Thus the phase-sensitive detection via lock-in and frequency dither on the laser or cavity are no longer required. With this modulation-free stabilization method, a homemade 852 nm grating-external-cavity diode laser is stabilized to a CFP cavity frequency, whose frequency jitter is less than ± 340 kHz in 30 seconds estimated from locked error signal. The long-term frequency stability was greatly improved compared with the frequency fluctuation of about 10 MHz under free-running condition in the same time scale. Moreover, the frequency shift and the zero-crossing slope of the dispersion-like frequency-discriminating signal can be conveniently changed by adjusting the angle between the two incident beams. The laser frequency stability locking with different frequency interval is investigated.

Key words laser technique; confocal Fabry-Perot cavity; modulation free frequency stabilization; grating-feedback extended-cavity diode laser

收稿日期:2005-07-20;收到修改稿日期:2005-10-25

基金项目:国家自然科学基金(60578018,10434080,10374062)、教育部科学技术研究重点项目经费(204019)及山西省高校青年学术带头人科研经费资助课题。

作者简介:杨海菁(1979—),男,山西晋中人,量子光学与光量子器件国家重点实验室及山西大学光电研究所硕士研究生,主要从事激光技术在冷原子物理中的应用等方面的实验工作。E-mail:yhj@sxu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail:wwjjmm@sxu.edu.cn

1 引言

半导体激光器由于其具有体积小、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。特别是具有窄线宽和较高频率稳定性的半导体激光器,在高分辨率激光光谱、量子频标、中性原子的激光冷却与俘获、光学测量等领域中的应用显得尤为重要^[1,2]。所以,有必要通过一定的稳频方法实现半导体激光器频率相对于合适的参考频率标准(如法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔共振频率或特定的原子、分子吸收谱线等)进行锁定,从而抑制激光器的频率起伏,提高激光器的频率稳定度。通常的锁频方案是直接对半导体激光器进行频率调制,由相敏检波技术获得鉴频信号,经相应的电子学负反馈环路实现频率锁定。由于直接对激光器进行频率调制,引入了额外的频率噪声。为避免由此引起的负面影响,人们不断寻求各种无调制扰动稳频方法^[3~13]。对于以法布里-珀罗腔作为参考频率的情况,一般是对法布里-珀罗腔的腔长进行调制或对激光频率进行调制,然后采用相敏探测技术获得鉴频曲线^[14~16]。

本文介绍采用共焦法布里-珀罗(CFP)腔作为稳定激光器频率的参考频率标准,利用不同角度的光束入射到一个共焦法布里-珀罗腔产生类色散鉴频曲线,实现852 nm外腔半导体激光器相对于共焦法布里-珀罗腔的无调制锁定的方法及典型的结果。此外还对由于不同入射光角度而产生频率间隔不同所导致鉴频曲线斜率不同、最终稳频结果的不同作了讨论。

2 原理及实验系统

2.1 原理简述

对于通用的稳频方案都需要有一个在参考频率点处的类色散鉴频信号。当线性扫描单频激光器的频率时,在法布里-珀罗腔后的透射信号具有洛伦兹型。在实验中,利用夹角很小的两束相同频率的光注入一个共焦的法布里-珀罗腔,由于两束光对于同一个腔长恒定的共焦腔有不同的光程,也就是说同一个腔对两束光的共振频率不同,从而线性扫描激光器频率时,两个透射峰中心之间会发生相对频移,从而得到如图 1(a)所示的腔透射曲线。

通过简单推导可知两个有一定间距的洛伦兹线

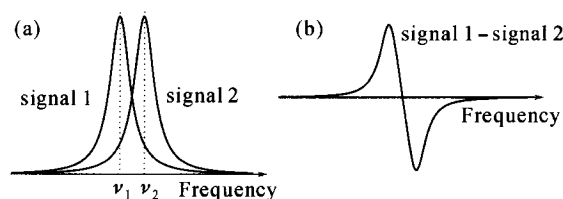


图 1 (a) 相同一台单模激光器的两束光以相同扫描频率、不同入射角度穿过同一个共焦法布里-珀罗腔得到的透射信号;(b) 两信号相减后得到的类色散曲线

Fig. 1 When two laser beams from the same frequency-scanning single-mode laser incident on a confocal Fabry-Perot cavity with slightly different angles, it will be expected that the transmission signals are shifted as in (a). After subtraction of the two signals a dispersion-like curve as in (b) is obtained

形的差是一个类色散信号。将用一对相同的光电探测器分别探测到的透射信号通过减法器相减,得到如图 1(b)所示的类色散曲线,可以用作激光器的鉴频信号。由于鉴频曲线的斜率越大,稳频环路的纠偏能力也就越强,所以鉴频曲线的斜率对于激光器的频率稳定有着非常重要的意义,因而对透射峰间距不同条件下对应的不同鉴频曲线的中心斜率作了计算。通过计算可知,当两透射峰频率间距是腔透射曲线线宽的 $\sqrt{3}/3$ 倍时,得到的鉴频曲线斜率最大。

2.2 实验系统

实验系统中使用自制的外腔光栅反馈半导体激光器作为光源。自制的激光器采用 Littrow 结构,使用 SDL-5412-G1 型激光二极管,采用衍射效率约 12% 的 1800 1/mm 的闪耀光栅作为光反馈元件,通过调节光栅使激光二极管在 852 nm(铯原子 D_2 线)处达到有效反馈。激光器可连续调谐大约 1.5 GHz,其典型工作电流为 81 mA,剩余电流起伏约为 20 μ A,控温稳定度约为 1%。

实验装置如图 2 所示,激光器输出光束经隔离比约 40 dB 的光隔离器以消除光反馈。先由分束片得到一束功率约为 3 mW 的光,再由 $\lambda/2$ 波片和偏振分光棱镜 PBS 组成可调分光系统,得到两束光,再通过 45° 全反镜,将两束光以不同的入射角度同时穿过共焦法布里-珀罗腔,利用一对对称的光电探测器分别探测到发生频移的两组透射曲线。图 3 为扫描激光器频率使之线性扫过腔长恒定的共焦法布里-珀罗腔的一个自由光谱区(FSR)所得到的透射曲线。可以通过自由光谱区的时间尺度和两透射曲

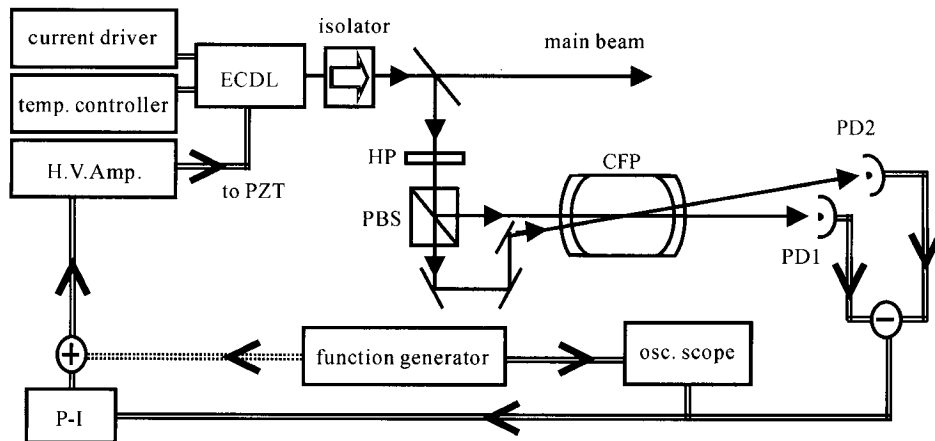


图2 实验装置(带箭头的实线表示光路,带箭头的双线表示电路连接)

ECDL: 外腔半导体激光器; HP: $\lambda/2$ 波片; PBS: 偏振分光棱镜; CFP: 共焦法布里-珀罗腔; PDs: 光电探测器; P-I: 比例积分放大器

Fig. 2 Experimental arrangement

(the solid lines with arrows indicate the optical path and the double lines with arrows for electrical connections)

ECDL: external-cavity diode laser; HP: half-wave plate; PBS: polarization-beam-splitter cube;

CFP: confocal Fabry-Perot cavity; PDs: photodiodes; P-I: proportion and integration amplifier

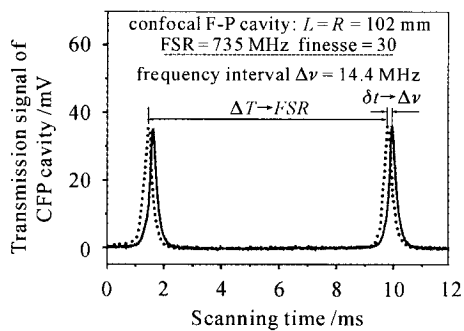


图3 典型的共焦法布里-珀罗腔的透射曲线
两曲线分别对应于两角度不同的激光束的透射曲线

Fig. 3 Typical transmission signal of the CFP cavity

The solid curve and the dot curve are for two laser beams with slightly different incident angles

线峰-峰值之间的时间尺度来校准两透射曲线之间的频率间隔。

激光器锁定过程中法布里-珀罗腔腔长的稳定性直接影响激光频率的稳定度。为了减小温度对腔长的影响,提高稳频精度,设计的法布里-珀罗腔腔体采用热膨胀系数小的殷钢加工制造,两凹谐振腔镜之间的距离 $L \approx 102$ mm,腔镜的曲率半径 $R = 102$ mm,一面腔镜与压电陶瓷(PZT)粘合,用于腔长扫描,腔的自由光谱区为 $FSR = 735$ MHz。整个腔体在放置于一个由绝热材料构成的密封罩内,以减小温度和空气对流对腔稳定性的影响,腔的精细度 F 大约为 30,腔线宽 $\Delta\nu_{\text{cavity}}$ 约为 24.5 MHz。

3 实验结果及讨论

首先测量了激光器在自由运转情况下典型的频率起伏。激光器自由运转时,共焦法布里-珀罗腔通过高压放大器来对腔长进行三角波扫描,使其可以扫描出一个腔的自由光谱区,而在一段时间内透射峰位置的变化代表了激光器频率的起伏。通过数字存储示波器来监视 30 s 内激光器通过腔的透射峰的位置变化,利用自由光谱区的时间尺度和透射峰位置变化的时间尺度来校核激光器频率的起伏。对于我们自制的外腔光栅反馈半导体激光器,在 30 s 内的典型频率起伏大约为 10 MHz。

通过调节两束光的入射角度,可以得到不同间隔的透射曲线,进而得到斜率不同的鉴频曲线。图 4 所示为在不同频率间隔下得到不同斜率的鉴频曲线在过零点附近的斜率。如图 4 所示,在频率间隔 $\Delta\nu$ 为 14.4 MHz 时所得到的鉴频曲线斜率最大,与理论计算吻合。

将误差信号经过比例积分电路通过加法器负反馈至激光器光栅外腔压电陶瓷端口,实现频率锁定。在实验中要实现负反馈,需要判断鉴频曲线的相位,同时还需要仔细调节比例积分放大器的积分时间常量、比例增益及积分增益等参量(典型的时间常量约为 1 ms,激光器光栅外腔压电陶瓷调制端口的带宽约为 1 kHz)。图 5 为闭环锁定后,30 s 内记录到的典型误差信号,典型的剩余频率起伏约为 ± 340 kHz,较相同时间段内激光器自由运转时的频率起伏

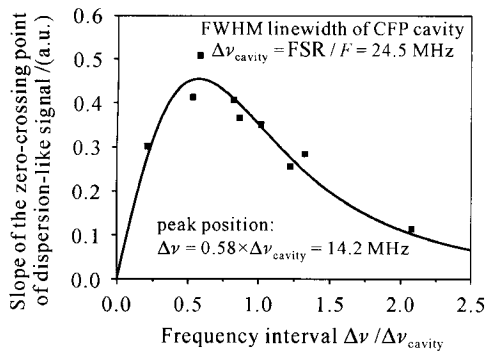


图 4 对于不同峰-峰值频率间隔下对应的类色散曲线在过零点的斜率
黑方块表示实验中测到的过零点斜率,实线则是通过洛伦兹线型计算得到

Fig. 4 Slope of the zero-crossing point of dispersion-like signal versus frequency interval $\Delta\nu$ of the two resonant peaks
The solid squares are experimental data, and the solid curve is prediction by the Lorentz model

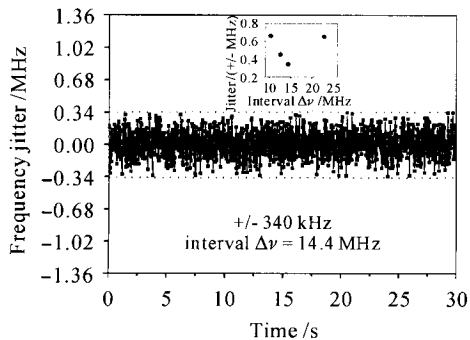


图 5 激光器无调制稳频后的典型频率起伏
小图为对于不同频率间隔稳频后的典型剩余频率起伏

Fig. 5 Typical frequency jitter signal after modulation-free frequency locking

Corresponding to different interval of the two peaks the typical frequency jitters after locking are shown in the inset

10 MHz有了显著的改善。记录时间受所用的数字存储示波器的限制,实际上激光器可在闭环锁定状态下稳定运转数小时而不失锁。

通过改变入射到共焦法布里-珀罗腔上激光束之间的夹角,可在两透射峰间距 $\Delta\nu$ 分别为 10.3 MHz, 12.6 MHz, 14.4 MHz, 22.8 MHz 的条件下对激光器进行稳频,其相应的稳频结果如图 5 内嵌的小图所示。由此可以做出简单推断,在一定范围内,类色散鉴频曲线的中心斜率越大,得到的稳频结果就越好。

在对激光器进行稳频后,激光器的频率起伏依然有 ± 340 kHz,可能是由于自制恒流源的剩余电

流噪声引起的。此外,由于压电陶瓷响应带宽的限制,一定程度上也影响了激光器的稳频效果。

4 结 论

该方案相对简单易行,避免了常规锁频技术中由于对激光器光源直接进行频率调制所引入的额外噪声,也无需使用昂贵的锁相放大器进行同步相敏检波。如果将纠偏信号中的低频部分反馈入光栅外腔压电陶瓷端口的同时进一步将高频部分反馈入电流调制端口,可提高环路响应能力,更好地改善激光器的频率稳定性。

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 R. W. Fox, C. S. Weimer, L. Hollberg *et al.*. The diode laser as a spectroscopic tool [J]. *Spectrochimica Acta Rev.*, 1993, **15**(5):291~299
- 3 Takeshi Ikegami, Shin-ichi Ohshima, Motoichi Ohtsu. Frequency stabilization of laser diodes to the Cs- D_2 line with the Zeeman modulation method [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1989, **28**(10):L1839~L1841
- 4 A. A. Madej, L. Marmet, J. E. Bernard. Rb atomic absorption line reference for single Sr⁺ laser cooling systems [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**(2):229~234
- 5 C. I. Sukenik, H. C. Busch, M. Shiddiq. Modulation-free laser frequency stabilization and detuning [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**(2):133~137
- 6 E. D. van Ooijen, G. Katgert, P. van der Straten. Laser frequency stabilization using Doppler-free bichromatic spectroscopy [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(1):57~59
- 7 Yan Shubin, Wang Yanhua, Liu Tao *et al.*. Modulation-free laser frequency locking by AOM shifted cesium sub-Doppler spectra [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10):1335~1338
闫树斌,王彦华,刘涛等.声光偏频亚多普勒光谱无调制激光频率锁定[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10):1335~1338
- 8 Kristan L. Corwing, Zheng-Tian Lu, Carter F. Hand *et al.*. Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(15):3295~3298
- 9 N. Beverini, E. Maccioni, P. Marsili *et al.*. Frequency stabilization of a diode laser on the Cs D_2 resonance line by the Zeeman effect in a vapor cell [J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **73**(2):133~138
- 10 G. Wasik, W. Gawlik, J. Zachorowski *et al.*. Laser frequency stabilization by Doppler-free magnetic dichroism [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**(6):613~619
- 11 T. Petelski, M. Fattori, G. Lamporesi *et al.*. Doppler-free spectroscopy using magnetically induced dichroism of atomic vapor; a new scheme for laser frequency locking [J]. *Eur. Phys. J. D*, 2003, **22**(3):279~283
- 12 Junmin Wang, Shubin Yan, Yanhua Wang *et al.*. Modulation-free frequency stabilization of a grating-external-cavity diode laser by magnetically induced sub-Doppler dichroism in cesium vapor cell [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(3):1168~1171
- 13 Liu Tao, Lei Hongxiang, Yan Shubin *et al.*. Third-harmonic locking of a diode laser to cesium saturation absorption D_2 line

- without frequency dither [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10):1181~1186
刘 涛,雷宏香,闫树斌 等. 激光二极管相对于铯饱和和吸收 D_2 线的无调制扰动三次谐波锁频[J]. 光学学报, 2002, **22**(10):1181~1186
- 14 T. W. Hansch, B. Couillaud. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity [J]. *Opt. Commun.*, 1980, **35**(3):441~444
- 15 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**(1):97~105
- 16 Li Jian, Wu Ling'an. Phase modulation locked optical resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(12):1641~1645
李 健,吴令安. 相位调制锁定光学谐振腔[J]. 光学学报, 1995, **15**(12):1641~1645