

基于非线性晶体及 Hänsch-Couillaud 技术的 激光-环形腔频率锁定技术研究

李志新 张永智 闫晓娟 王 乐 胡志裕 马维光 张 雷 尹王保 贾锁堂

(山西大学激光光谱实验室, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 基于 Hänsch-Couillaud(H-C)频率锁定技术,通过理论计算得到了用于实现激光到环形腔频率锁定的误差信号,并在实验上利用 1583 nm 激光与腔内含有 KTP 晶体的蝶形环形腔对激光到环形腔的频率锁定进行了实验研究,理论结果与实验结果相符。该方案与传统方法相比,大大简化了实验装置,而且操作方便灵活,可以广泛地应用到激光技术、污染气体检测等众多领域。

关键词 激光器;激光-腔频率锁定;Hänsch-Couillaud 频率锁定技术;双折射效应;蝶形环形腔;误差信号

中图分类号 TN24; O43 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0714004

Frequency Locking of a Laser to a Ring-Cavity Using a Nonlinear Crystal Based on the Hänsch-Couillaud Technique

Li Zhixin Zhang Yongzhi Yan Xiaojuan Wang Le Hu Zhiyu

Ma Weiguang Zhang Lei Yin Wangbao Jia Suotang

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

Laser Spectroscopy Laboratory of Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract The error signal used for stabilizing a laser frequency to an external bowtie-shaped ring cavity is analyzed theoretically based on the Hänsch-Couillaud frequency locking technique. In the experiment, the frequency of a 1583 nm fiber laser is locked to the longitude mode of a bowtie-shaped ring cavity with a KTP crystal inside it. The setup of this locking scheme is simple, and the technique is rather easy to operate, so it can be widely used in the laser technology, trace gas detection or other areas.

Key words laser; locking of laser frequency to cavity mode; Hänsch-Couillaud frequency locking technique; birefringent effect; bowtie-shaped ring cavity; error signal

OCIS codes 140.3425; 140.3580; 260.1440; 260.5430

1 引 言

谐振腔作为一种光学器件目前已被广泛应用到原子分子物理^[1]、激光技术^[2]、频率标准^[3]和微量气体检测^[4]等多个领域。当激光与谐振腔共振时,激光会在腔内多次往返且光场重叠,因此可以用来增加激光和腔内介质的相互作用路径、相互作用次数

或者相互作用光强;同时腔模之间具有相位关联特性,可以将腔作为载体实现多个激光器的相位关联锁定;另外通过不同的腔结构设计,可以实现行波场和驻波场,适用于不同的应用。与普通的两镜法布里-珀罗腔相比,环形腔具有无反馈干扰、腔内光场为行波场、多个腔镜可作为输入镜及腔内存在多个

收稿日期: 2010-12-31; **收到修改稿日期:** 2011-03-24

基金项目: 国家 973 计划(2006CB921603)、国家 863 计划(2009AA063006)、国家自然科学基金(10934004, 60908019, 60808009)和山西省青年科学基金(2010021003-3)资助课题。

作者简介: 李志新(1987—),男,硕士研究生,主要从事高效激光频率转换技术方面的研究。

E-mail: lzx_striving@163.com

导师简介: 马维光(1976—),男,副教授,硕士生导师,主要从事激光技术、红外微量气体探测技术等方面的研究。

E-mail: mwg@sxu.edu.cn(通信联系人)

腰斑等特点,更有利于环形腔在激光器的设计、激光频率转换等领域的应用。

在众多应用中,激光到腔的频率锁定是必不可少的环节。目前,针对激光频率-腔模间频率锁定误差信号产生的方法主要有 Pound-Dever-Hall(PDH)技术^[5]、Hänsch-Couillaud(H-C)技术^[6,7]、低频调制技术^[8]、空间模干涉技术^[9]和边模偏频锁定技术^[10]等。PDH技术是对激光频率进行调制后,将腔反射信号与经过移相后的调制信号进行混频来获得误差信号,该误差信号具有高的信噪比,但需要对激光频率进行高频调制解调。低频调制技术是将腔长低频调制后,通过锁相放大器解调得到腔反射信号的一次谐波来作为误差信号,由于其对腔长进行调制且频率为千赫兹量级,使得系统抗干扰能力较差。空间模干涉技术是将光束倾斜入射,通过与腔共振的基模 TEM_{00} 模和非共振的一阶高阶模 TEM_{01} 模进行空间干涉来获得误差信号,需要对探测器进行特殊设计来实现。边模偏频锁定技术是将腔透射信号的一侧作为误差信号,该技术受激光自身强度起伏影响较大。而 H-C 频率锁定技术是通过腔内放置一偏振片,使得平行于偏振方向的光与腔共振,垂直于偏振方向的光直接反射,探测两偏振方向反射光合成后的偏振态变化来获得误差信号,不需要外加任何调制,且对探测装置无特殊要求。

基于 H-C 锁频原理,在频率锁定范围内两正交偏振态只需一路与腔共振另一路非共振即可获得误差信号。在激光频率转换过程中,通常环形腔内含有的非线性晶体可以充当偏振片的作用,当晶体对种子光存在走离效应时,就可以满足上述 H-C 误差信号产生条件,实现共振偏振激光与腔模的频率锁定;当无走离效应时,两正交偏振光通过晶体的光程不同,也可满足上述 H-C 误差信号产生的条件,实现任一偏振激光到腔模的频率锁定。这种条件下 H-C 锁频技术相比于其他频率锁定技术具有结构简单、便于操作的优点。本文拟以 KTP 晶体为例,提出一种基于 H-C 频率锁定技术实现激光频率与蝶形环形腔腔模间频率锁定的方案和装置。

2 理论分析

一束线偏振光通过 $\lambda/2$ 波片后入射到双折射晶体,光束的传播方向一般不与晶体的光轴重合。通过调节 $\lambda/2$ 波片使入射光的偏振方向与晶体的寻常光(o光)和非寻常光(e光)方向存在一定夹角,如图 1 所示,激光的偏振方向与晶体的 o 光方向成 θ 角。

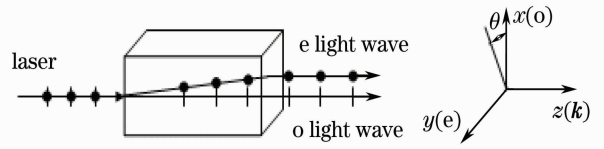


图 1 激光在晶体中的传输示意图

Fig. 1 Sketch map of the propagation of the laser in the crystal

由于双折射效应,入射光在晶体中会分解为 o 光和 e 光两部分,它们对应的晶体折射率分别为 n_o 和 n_e ,由于折射率不同,光在晶体中会发生走离,即 o 光和 e 光的传播方向及路径不再一致,因此,如果将具有走离效应的晶体放置在环形腔内,就只有一个偏振方向的光与腔共振,即当 o 光或 e 光中一束光与环形腔共振时,另一束光就会由于不与腔共振而直接反射出腔外,且从环形腔反射的光一部分来自入射腔镜直接反射的 o 光和 e 光,另一部分来自与环形腔共振的光在腔内多次往返时由入射腔镜透射出的光。为了便于描述,以 o 光与环形腔共振为例进行说明。这时环形腔的反射光就由直接反射的 o 光和 e 光及在腔内形成驻波的 o 光的透射光组成。对于 x 方向(即 o 光方向)的反射光场可以计算得

$$E_x^r = E_x^i \left\{ \sqrt{R_i} - \frac{T_i R \exp(i\delta)}{1 - R \sqrt{R_i} \exp(i\delta)} \right\} = E_x^i \left\{ \sqrt{R_i} - T_i R \frac{\cos \delta + i \sin \delta - R \sqrt{R_i}}{(1 - R \sqrt{R_i})^2 + 4R \sqrt{R_i} \left(\sin \frac{1}{2} \delta \right)^2} \right\}, \quad (1)$$

y 方向(即 e 光方向)由于腔内 e 光的高损耗而只存在由入射腔镜直接反射的光,因此,可以表示为

$$E_y^r = E_y^i \sqrt{R_i}, \quad (2)$$

式中 $E_x^i = E^i \cos \theta$, $E_y^i = E^i \sin \theta$ 分别表示入射光场在 x 和 y 方向上的分量; R_i 和 T_i 分别表示入射腔镜的反射率和透射率(内外表面一致); R 是往返一次的振幅比率,表示激光在腔内总的行程损耗,它包括除入射腔镜外环形腔其他腔镜的透射损耗、腔内晶体对光的反射和吸收及其他的损耗; δ 是 o 光在环形腔内每行进一周所产生的相移,它由光在腔内行进一周的光程决定。由环形腔入射腔镜反射的两垂直偏振光由于存在一定的相位差合成新的偏振态。当 x 方向偏振的光(o光)在腔内共振时($\delta = 2m\pi$),即两部分反射光的相位差为 0,如果入射光是线偏振光,则合成后的反射光仍然是线偏振光。若当 x 方向的光(o光)在腔内不共振即频率左偏或者右偏时,两部分反射光会合成为左旋或右旋偏椭圆偏振

光,符合 H-C 频率锁定技术的基本要求,因此通过对反射光的偏振态检测就可获得激光频率与环形腔失谐的误差信号。

偏振检测系统由 $\lambda/4$ 波片、偏振分束器以及两个光电探测器组成,其中 $\lambda/4$ 波片的快轴方向与非

线性晶体的 o 光方向夹角为 45° ,偏振分束器的两个特征轴方向分别与非线性晶体的 o 光和 e 光方向相同。利用琼斯矩阵计算可以得到偏振分束器两偏振方向的出射光场为

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{\text{ROT}}(-\pi/4) \mathbf{J}_{\text{QWP}} \mathbf{J}_{\text{ROT}}(\pi/4) \begin{bmatrix} E_x^r \\ E_y^r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^r \\ E_y^r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} E_x^r + E_y^r - i(-E_x^r + E_y^r) \\ E_x^r + E_y^r + i(-E_x^r + E_y^r) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{J}_{\text{ROT}}(\theta)$, \mathbf{J}_{QWP} 分别为光轴旋转 θ 以及 $\lambda/4$ 波片的琼斯矩阵。 E_a, E_b 分别表示偏振分束器两个偏振方向上的光场,用两个探测器去探测这两部分光,再经过减法器后得到两部分光的光强差:

$$I_a - I_b = |E_a|^2 - |E_b|^2 = \frac{1}{4} \{ [E_x^r + E_y^r - i(-E_x^r + E_y^r)] \cdot [E_x^{r*} + E_y^{r*} + i(-E_x^{r*} + E_y^{r*})] - [E_x^r + E_y^r + i(-E_x^r + E_y^r)] \cdot [E_x^{r*} + E_y^{r*} - i(-E_x^{r*} + E_y^{r*})] \} = i(E_x^r E_y^{r*} - E_x^{r*} E_y^r), \quad (4)$$

令入射光场 $E^i = 1$,则 $E_x^i = \cos \theta, E_y^i = \sin \theta$,将 E_x^r 和 E_y^r 的表达式代入(4)式得

$$I_a - I_b = 2 \cos \theta \sin \theta \times \frac{T_i R \sqrt{R_i} \sin \delta}{(1 - R \sqrt{R_i})^2 + 4R \sqrt{R_i} \left(\sin \frac{\delta}{2} \right)^2}. \quad (5)$$

这个信号就是 H-C 频率锁定的误差信号,正比于腔对激光的色散函数。由(5)式可以看出,当入射

光的偏振方向与晶体的 o 光方向成 45° 角时,得到的信号最大。但当频率锁定到某一偏振模式 o 或 e 偏振态时,只有一半的能量进入腔内,这不适合于要求高的激光-腔耦合情况,因此通常设置 θ 为一个较小的角度。为了分析 θ 角不同时对误差信号的影响,取(5)式中 $T_i = 0.07, R = R_i = 0.93$,计算得到 θ 分别取 $\pi/36, \pi/9, \pi/4, 5\pi/12$ 时的误差信号,如图 2

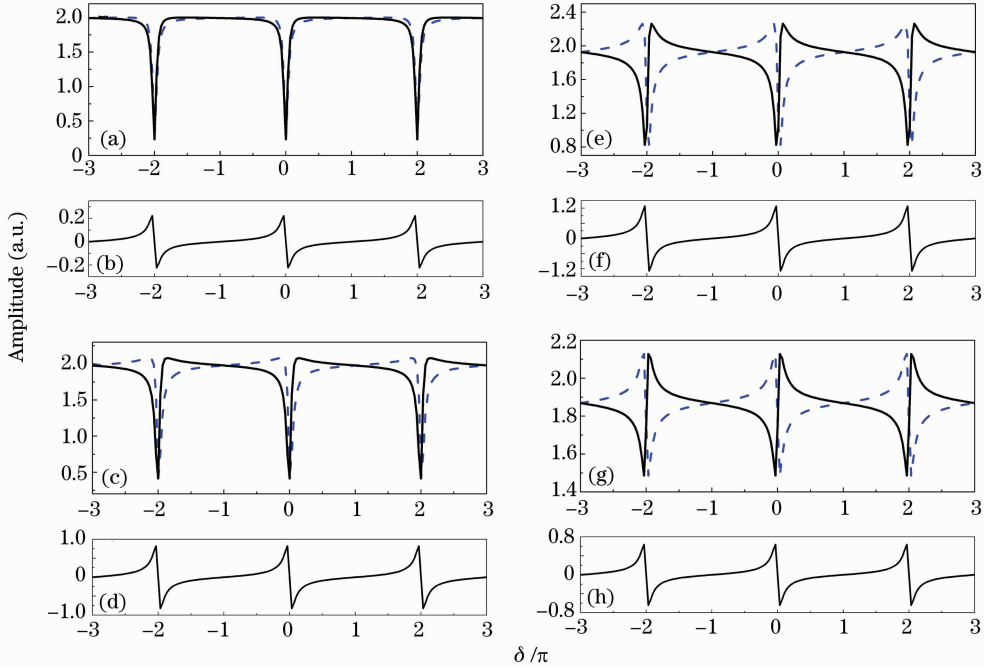


图 2 通过理论计算模拟得到的两个探测器对应的信号以及误差信号。(a),(b) $\theta = \pi/36$; (c),(d) $\theta = \pi/9$; (e),(f) $\theta = \pi/4$; (g),(h) $\theta = 5\pi/12$

Fig. 2 Simulated signals detected by PDI and PD2 and the error signal through theoretical analysis. (a), (b) $\theta = \pi/36$; (c), (d) $\theta = \pi/9$; (e), (f) $\theta = \pi/4$; (g), (h) $\theta = 5\pi/12$

所示。在图中所示的每一个周期内,误差信号的零点处代表了o光与环形腔共振。图2(a),(c)和(e),(g)为两个探测器对应信号的模拟结果,实线表示垂直偏振光强,虚线表示水平偏振光强,可见当 θ 角不同时,其形状发了明显的变化。不同 θ 角时对应的误差信号如图2(b),(d)和(f),(h)所示,可以看出误差信号的线型没有发生变化,仅仅是幅度改变了,说明入射偏振光的角度几乎不影响误差信号的线型。对于e光共振的情况也可得到类似于图2的信号。

3 实验装置及结果

实验上拟实现 1583 nm 激光频率到蝶形环形腔腔模频率之间的锁定,实验装置如图3所示,其中

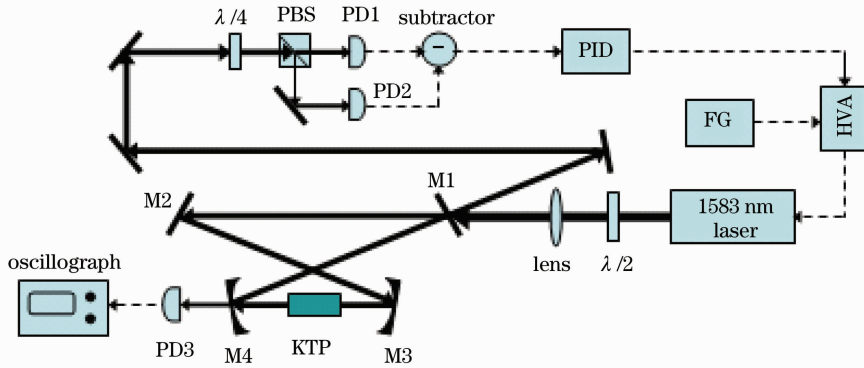


图3 将 1583 nm 激光频率锁定到环形腔腔模的实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for frequency locking of the 1583 nm laser to a ring cavity mode

在进行频率锁定时,首先利用 FG 和 HVA 对激光的频率进行扫描,FG 产生的扫描信号频率为 10 Hz,幅度为 2 V。从光纤激光器出射的激光经过 $\lambda/2$ 波片和匹配透镜后入射到环形腔中,调节 $\lambda/2$ 波片的角度,使激光的偏振方向与晶体内部 o 光方向成不同的角度 θ ,利用偏振检测系统对腔镜 M1 的反射光进行偏振检测。图4为实验中在不同 θ 角情况下对应于图2的各个信号,其中图4(a),(c),(e)和(g)分别为 θ 接近 $\pi/36, \pi/9, \pi/4, 5\pi/12$ 这4个角度时偏振检测系统中两探测器探测到的信号;图4(b),(d),(f)和(h)分别对应两探测器相减后得到的误差信号。可以发现在纵模中间出现了一些高阶模,主要是由于激光到腔的耦合过程中出现了高阶模,比较图2与图4可以看出实验结果与理论模拟基本一致,两探测器信号形状稍有不同主要是由于高阶模以及没有耦合到腔内的各个模式的反射光对偏振态形成了干扰。从图中可以发现,当转动 $\lambda/2$ 波片来改变激光偏振方向与晶体 o 光方向的夹角 θ

实线为光传播路径。光纤激光器购置于丹麦 Koheras 公司,型号为 Boostik C15 PztS PM,线宽小于 50 kHz,最大输出功率为 500 mW, $M^2=1$ 。蝶形环形腔是由两个平面镜 M1, M2 以及两个曲率半径为 50 mm 的凹面镜 M3, M4 组成,入射腔镜 M1 对 1583 nm 激光的反射率为 97%,其余腔镜对 1583 nm 激光的反射率均大于 99.99%。腔内的非线性晶体为 KTP 晶体,晶体表面镀有 1583 nm 增透膜,晶体尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 8 mm。函数发生器(FG)是 NF 公司的 WF1973 型产品,示波器是 Tektronix 公司的 TDS 2024B 型产品。电子伺服系统主要由美国 Stanford(SRS)生产的型号为 SIM960 的 PID 控制器和型号为 SVR 200-3 的高压放大器(HVA)组成。

时,误差信号的幅度随着角度的变化而变化,在 $\theta=45^\circ$ 时误差信号达到最大,大于或者小于 45° 误差信号都会减小,但是在不同 θ 值下得到误差信号的形状基本不变,符合理论预期。当 θ 值偏大时,有悖于对某一偏振方向光高效利用的频率锁定要求,因此实验中在保证得到较好误差信号的同时 θ 应尽量取较小的值。同时转动 $\lambda/4$ 波片与偏振分束棱镜特征轴之间的角度来观察误差信号的变化,发现只有在夹角为 45° 时,得到的误差信号是标准的类色散信号。

实验中为了实现激光的高效利用,利用 $\theta=\pi/36$ 时获得的误差信号对激光频率进行锁定。首先将获得的误差信号输入比例-积分-微分(PID)锁频模块,对 PID 进行适当的参数设定,优化误差信号;然后将误差信号通过 HVA 反馈到激光器的电压控制端口进行频率锁定。实验中设置 PID 的比例增益为 10 倍,积分带宽 1.25 kHz。锁定后的结果如图5所示,当激光频率锁定到某一个腔纵模时,腔的透射谱线变成了一条通过透射峰峰顶的直线。

当然也可以对环形腔的腔长进行扫描,然后将获得的误差信号经过 PID 控制器后反馈到环形腔[腔镜上含有压电换能器(PZT)],这样就能够将环形腔的

腔模锁定到激光的工作频率上。与 PDH 技术相比,该技术结构简单,操作灵活,可以更广泛的应用到包括激光频率转换的各个领域中。

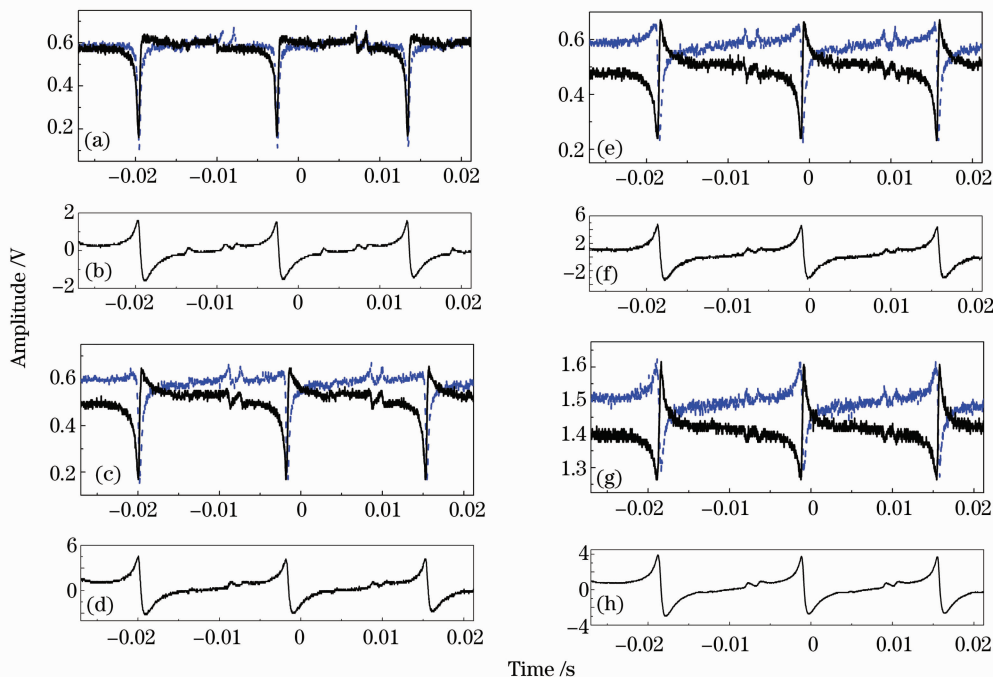


图 4 在不同 θ 值时实验获得的偏振检测信号以及误差信号。(a),(b) $\theta=\pi/36$; (c),(d) $\theta=\pi/9$; (e),(f) $\theta=\pi/4$; (g),(h) $\theta=5\pi/12$

Fig. 4 Detected polarization signals and the error signal in the experiment for different values of θ . (a), (b) $\theta=\pi/36$; (c), (d) $\theta=\pi/9$; (e), (f) $\theta=\pi/4$; (g), (h) $\theta=5\pi/12$

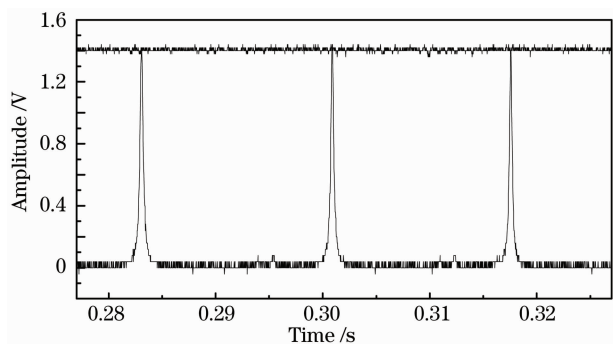


图 5 频率锁定前后的腔透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum of the cavity before and after frequency locking

在实现了 1583 nm 激光的工作频率到蝶形环形腔的频率锁定后,对频率锁定的相对稳定性进行了检测。图 6 为实现频率锁定后 PID 反馈的误差信号在 450 s 内随时间的变化及频谱特性情况。从图 6(a)中可见,频率锁定后的误差信号在 0~1.5 V 之间浮动变化,由图 6(b)可见当频率大于 0.1 Hz 时,噪声幅度明显降低且趋于稳定,但是在 0.4 Hz 附近出现一个共振频率,这主要来自气浮平台振动

引起的环形腔腔长的变化,而低于 0.1 Hz 的噪声主要来自腔内空气扰动等。这些现象说明环形腔腔模频率受外界环境的影响较大,可以采用高稳定镜架、有机玻璃罩等措施来减小外界环境对腔长或者腔内空气折射率的影响。

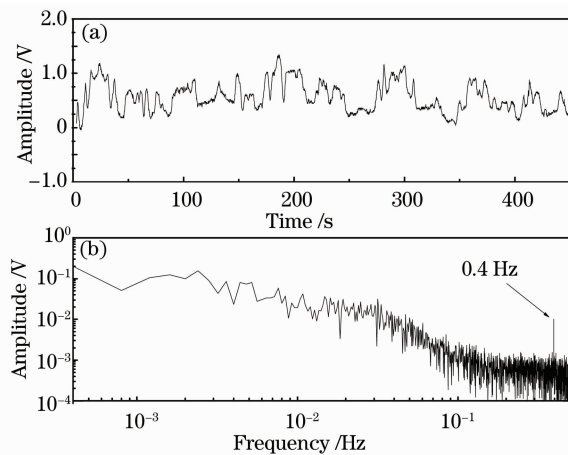


图 6 频率锁定后误差信号的变化(a)及频谱特性(b)
Fig. 6 (a) Variation and (b) spectrum of error signal after frequency locking

4 结 论

基于 H-C 频率锁定技术,提出了利用非线性晶体实现激光频率与蝶形环形腔模间频率锁定的方案,从实验上实现了 1583 nm 激光工作频率与环形腔腔模之间的频率锁定,并得到了理想的效果。该方案与现有的激光-腔频率锁定技术如 PDH 技术相比,实验装置简单,操作方便灵活,有很好的应用前景,尤其是可以应用于基于 I 类相位匹配的非线性频率转换过程。

参 考 文 献

- 1 J. Ye, D. W. Vernooy, H. J. Kimble. Trapping of single atoms in cavity QED[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(24): 4987~4990
- 2 Yan Zhong, Xiuwei Fan, Haitao Huang *et al.*. An efficient intracavity-pumped KTP optical parametric oscillator at 1572 nm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 646~649
- 3 F. Adler, M. J. Thorpe, K. C. Cossel *et al.*. Cavity-enhanced direct frequency comb spectroscopy technology and applications

- [J]. *Ann. Rev. Anal. Chem.*, 2010, **3**: 175~205
- 4 A. Foltynowicz, F. M. Schmidt, W. Ma *et al.*. Noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectroscopy: current status and future potential[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **92**(3): 313~326
- 5 Eric D. Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. *Am. J. Phys.*, 2001, **69**(1): 79~87
- 6 T. W. Hansch, B. Couillaud. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity[J]. *Opt. Commun.*, 1980, **35**(3): 441~444
- 7 J. M. Boon-Engering, W. E. van der Veer, E. A. J. M. Bent *et al.*. Stabilization of an optical cavity containing a birefringent element[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **140**(4-6): 285~288
- 8 Ayan Banerjee, Dipankar Das, Umakant D. Rapol *et al.*. Frequency locking of tunable diode lasers to a stabilized ring-cavity resonator[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(12): 2528~2531
- 9 D. A. Shaddock, M. B. Gray, D. E. McClelland. Frequency locking a laser to an optical cavity by use of spatial mode interference[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1499~1501
- 10 R. L. Barger, M. S. Sorem, J. L. Hall. Frequency stabilization of a cw dye laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**(11): 573~575