

DOI: 10.7652/xjtuxb201610019

采用 F-P 光学腔的外腔半导体激光器 锁相稳频方法

步明繁, 刘志刚, 张为波, 张萌, 洪军

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对外腔半导体激光器出射光频不稳定的问题,提出了一种将 Fabry-Perot(F-P)光学腔与锁相放大器相结合的稳频方法,将激光器出射光频稳定在 F-P 光学腔的平均腔长相对应的谐振频率上。信号发生器驱动 F-P 光学腔的腔长按照正弦规律变化,光电探测器将透过 F-P 光学腔的光信号转化为电信号,锁相放大器将这一电信号与信号发生器的驱动信号进行混频经低通滤波后得到光学腔谐振信号相位误差。利用这一相位误差信号,通过 PID 控制器对激光器内腔电流和外腔 PZT 驱动电压两种不同的反馈方式进行反馈控制,实现稳定的输出光频。理论推导出光学腔谐振信号相位误差与激光器波长变化关系,选用 F-P 光学腔透射峰值时间间隔 τ 的标准偏差作为评价频率稳定度指标。通过实验验证,选用外腔 PZT 驱动电压的反馈方式,能将外腔半导体激光器的光频稳定性提高约 80%,该方法具有简单高效的特点,并且可以实现较长时间的频率稳定,也能够适用于不同波长的激光器稳频。

关键词: 稳频; Fabry-Perot 光学腔; 锁相; Littman 结构

中图分类号: TB96 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)10-0125-07

Method of Phase Locking Frequency Stabilization for Diode Lasers by F-P Optical Cavity

BU Mingfan, LIU Zhigang, ZHANG Weibo, ZHANG Meng, HONG Jun

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the issue of the frequency instability of emergent light from diode lasers in Littman configuration, a stabilization method combined F-P cavity with phase-locked amplifier is proposed. The laser frequency is stabilized to the resonance frequency corresponding to the average cavity length of a F-P cavity. A function generator is used to drive the F-P cavity according to the sinusoidal signal, and a photoelectric detector is used to transform optical signals passing through F-P optical cavity into electrical signals. The electrical signals frequency mix with drive signals from function generator and then pass through low pass filter in the phase-locked amplifier to get optical cavity resonance signal phase error. The signal is given back to laser by PID controller to stable optical frequency through the feedback selection of internal current and external cavity PZT driving voltage. We theoretically deduce the correlation between optical cavity resonance signal phase error and the laser wavelength, and then choose the standard deviation of the F-P optical cavity transmission peak time interval value τ as a frequency stability

收稿日期: 2016-04-27。 作者简介: 步明繁(1992—),男,硕士生;刘志刚(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375376)。

网络出版时间: 2016-07-14 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160714.1640.010.html>

evaluation index. Experiments show that the stability of external cavity semiconductor laser frequency is improved by 80% via feedback selection of external cavity PZT driving voltage. This method is simple and efficient to be applied to different wavelengths and longtime laser frequency stabilization.

Keywords: frequency stabilization; F-P optical cavity; phase locking; Littman configuration

外腔半导体激光器具有转换效率高、线宽窄、体积小、经济性好等特点,广泛应用于精密干涉测量、激光陀螺、大气和环境监测、光通信等领域。光频稳定性是激光器的一个重要的性能指标,半导体激光器的光频对电流、温度、振动等因素极其敏感,如何提高半导体激光器的光频稳定性一直是外腔激光器研究的热点之一^[1-2]。

目前常用的有饱和吸收光谱技术、Pound-Drever-Hall(PDH)稳频技术以及 F-P 光学腔扫描稳频技术。饱和吸收光谱技术^[3]是将激光器频率锁到吸收室气体的原子吸收中心频率上,应用多普勒效应,让传播方向相反而路径基本重合的探测光和参考光入射于充有气体的吸收室。当调谐光频 $\omega \neq \omega_0$ (吸收室原子吸收中心频率)时,光束被原子群吸收;当 $\omega = \omega_0$ 时,在探测光强和频率的相关曲线上,于 ω_0 处出现尖峰效应。该技术优点是复现性和频率稳定度较高,但由于输出波长受制于吸收介质,谱线覆盖率和输出功率较低。

PDH 技术^[4-5]利用 F-P 光学腔共振频率作为参考标准,把激光器频率锁定在光学谐振腔的谐振频率上。该方法将激光经电光调制器进行相位调制,利用光外差光谱检测技术和 F-P 光学腔的谐振特性,获得可以鉴频的色散型谱线以及激光频率与 F-P 光学腔共振频率的误差信号,通过反馈改变激光器的腔长从而改变光频率,将光频锁定在光学腔谐振频率上。虽然 PDH 法具有很高的稳定性和较窄的共振谱线宽度,但是进行相位调制需要电光调制器(EOM)及射频信号源,导致成本提高,且由于电光调制剩余幅度的存在,会引起锁定后频率的漂移,增加了实验系统复杂程度,难以普及应用。

F-P 光学腔扫描稳频法^[6]是将半导体激光器光频通过 F-P 光学腔锁到稳定性更高的 He-Ne 稳频激光器光频上,该方法将激光器和参考激光器的出射光入射到按正弦规律变化的 F-P 腔中,提取透射波峰时间差作为稳频误差信号。该方法能够实现多个半导体激光器同时稳频,但抗干扰能力差,光频跳变会导致失锁,而且要获得较为准确的透射波峰时刻需要较高的采样率^[7],提高了稳频系统的成本。

本文结合 F-P 光学腔与锁相放大器的特点^[8-9],提出了一种新的激光器稳频方法,并以此方法为基础进行 Littman 型外腔半导体激光器光频的反馈控制试验,实现了激光器频率的稳定。该方法将激光器的光频锁定在 F-P 腔的平均腔长上,适用于宽光谱的激光器频率稳定,对 F-P 光学腔的扫描频率要求较低,能够实现激光器长时间的频率稳定。

1 F-P 光学腔锁相稳频原理

1.1 稳频原理

F-P 光学腔锁相稳频技术是以 F-P 光学腔的平均腔长作为参考,将激光器的光频锁定在 F-P 光学腔的平均腔长对应的谐振频率上。稳频 F-P 光学腔的腔长在 PZT 的驱动下按照正弦规律发生变化,原理如图 1 所示。

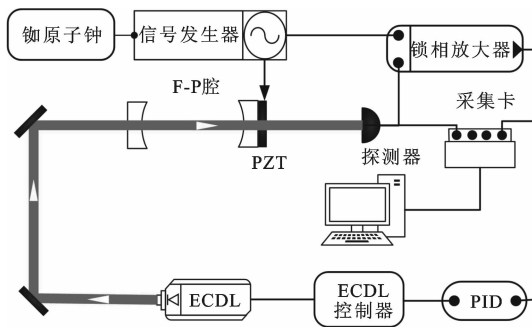


图1 F-P 光学腔锁相稳频方法原理图

F-P 光学腔^[10]是利用平行平板的多光速干涉原理制成的精密光学仪器,由两个相互平行、平行度达到 λ 级别的平面玻璃组成,内表面镀有高反射膜。本文采用内表面是球面并处于共焦位置的共焦光学腔,根据多光束干涉原理,F-P 腔透射光强为

$$I_t = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(8\pi nL_x/\lambda)} I_0 \quad (1)$$

式中: R 为 F-P 光学腔内腔反射镜的反射率; L_x 为腔长; n 为空气折射率; I_0 为入射光强。同时设

$$G(L_x) = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(8\pi nL_x/\lambda)} \quad (2)$$

PZT 是以正弦信号驱动 F-P 光学腔的一面腔镜,F-P 光学腔腔长 L_x 可写成下面的形式

$$L_x = L_0 + k\sin(2\pi ft) \quad (3)$$

式中: L_0 为平均腔长; f 为 F-P 光学腔扫描频率; k 为比例系数。对 I_t 在 I_0 处进行泰勒展开,得

$$I_t = G(L_0)I_0 + G'(L_0)k\sin(2\pi ft)I_0 + \frac{1}{2}G''(L_0)k^2\sin^2(2\pi ft)I_0 + O(k^3\sin^3(2\pi ft)) \quad (4)$$

从式(4)可以看出,激光器透射光强中的频率成分分为 PZT 驱动频率的整数倍。激光器的透射光强信号与 PZT 的驱动信号在锁相放大器中进行混频,输出信号为两者相位差的函数,得到的信号记作光学腔谐振信号相位误差 δ 。在反馈系统中,用这一误差信号补偿光频波动^[11],表达式如下

$$\delta = H[G(L_0)I_0\sin(2\pi ft) + G'(L_0)k\sin^2(2\pi ft)I_0 + \frac{1}{2}G''(L_0)k^2\sin^3(2\pi ft)I_0 + O(k^3\sin^4(2\pi ft))] \quad (5)$$

式中: H 为鉴相器放大系数。 δ 经低通滤波滤去高频分量,得到

$$\delta = \frac{1}{2}HG'(L_0)kI_0 + O(k^3) \quad (6)$$

联立式(2)~式(6),可得

$$\delta = -\frac{8\pi nH(1-R)^2R\sin(8\pi nL_0/\lambda)kI_0}{\lambda[1+R^2-2R\cos(8\pi nL_0/\lambda)]^2} \quad (7)$$

在式(7)中,只有半导体激光器的波长 λ 是变量,如果激光器稳定,光学腔谐振信号相位误差 δ 为常数。在后续控制环节中,只需保证 δ 为常数就能使激光器的频率锁定到 F-P 光学腔平均腔长对应的谐振频率上。

1.2 稳频控制

以 Littman 型外腔半导体激光器为研究对象, Littman 型外腔半导体激光器^[12] 结构如图 2 所示。激光二极管内腔是带有增益的 F-P 谐振腔, R_1 和 R_2 是激光器内腔后端面和前端面的反射系数,激光二极管后端面与反射镜构成激光器的外腔,光栅固定,反射镜座可以随压电陶瓷伸长调整一个微小的角度, φ 为入射光与光栅法线的夹角, θ 为一级衍射光与光栅法线的夹角, L 为转轴点与衍射点之间的距离。

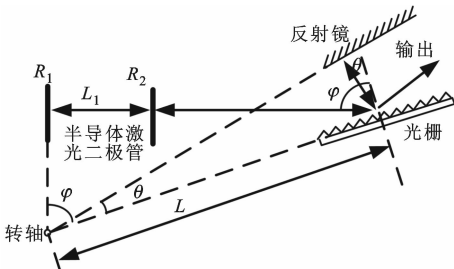


图 2 Littman 型可调谐半导体激光器结构示意图

温度、激光二极管电流和 PZT 的电压都会影响 Littman 型外腔半导体激光器的波长。由于温度调节速度较慢,采用调节温度的方式很难快速实现频率稳定^[13]。

1.2.1 电流反馈 在稳态振荡下,增益介质的折射率和注入电流呈线性关系。折射率的改变可以等效内腔腔长的改变,从而改变波长,根据测试,在保持温度不变的情况下,波长随电流呈线性变化。

理论上激光二极管的电流变化量 ΔI 与半导体激光器的波长变化量 $\Delta\lambda$ 存在如下关系

$$\Delta\lambda = \gamma\Delta I \quad (8)$$

式中: γ 为电流变化量对波长的影响系数,为常数。由 $\Delta\lambda$ 与谐振信号相位误差 δ 间存在函数关系可得

$$f(\delta) = \gamma\Delta I \quad (9)$$

从式(9)可以得出,频率的波动量与电流变化量呈一定的函数关系,可以通过调节电流值来实现稳频。

1.2.2 外腔 PZT 电压反馈 根据光栅所选择的波长为

$$\lambda = d(\sin\theta + \sin\varphi) \quad (10)$$

式中: d 为光栅常数,即两条光栅刻线之间距离; θ 为光束入射角; φ 为一级衍射角。

PZT 驱动反射镜转动,当转角为 $\Delta\varphi$ 时,可以得到

$$\sin(\varphi + \Delta\varphi) - \sin\varphi = \frac{\Delta\lambda}{d} \quad (11)$$

由于变化角度是很小的,因此式(11)可以简化为

$$\Delta\varphi\sin\varphi = \frac{\Delta\lambda}{d} \quad (12)$$

假设 PZT 驱动过程中一直垂直于反射镜平面,可得关系式

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta x}{L_{\text{pzt}}} \quad (13)$$

式中: L_{pzt} 为 PZT 与反射镜转臂接触点到反射镜中心的距离; Δx 为 PZT 的驱动输出位移。

由式(12)、式(13),可得外腔与波长关系

$$\Delta\lambda = \frac{d\Delta x\cos\varphi}{L_{\text{pzt}}} \quad (14)$$

在不考虑滞回特性的情况下,PZT 的输入电压和输出位移关系为

$$\Delta x = K\Delta U \quad (15)$$

式中: K 为 PZT 输入电压和输出位移的转换系数。

结合式(14)、式(15),可得波长改变量与 PZT 输入电压之间的关系为

$$\Delta\lambda = \frac{dK\Delta U\cos\varphi}{L_{\text{pzt}}} \quad (16)$$

再由 $\Delta\lambda$ 与 δ 的函数关系,可得

$$f(\delta) = \frac{dK \Delta U \cos \varphi}{L_{\text{pzt}}} \quad (17)$$

从式(17)可以得出,频率的波动量与电压变化量呈一定的函数关系,可以通过调节 PZT 的驱动电压实现稳频^[13]。

1.3 稳频评价标准

一般评价频率稳定性,需要测得具体的光频变化,如艾伦方差。在无法测得光频的情况下,为了验证稳频效果,选用 F-P 光学腔透射峰值时间间隔作为稳频的参考标准。已知共焦 F-P 光学腔的光强极大值透射公式为

$$m\lambda = 4nL_x \quad (18)$$

式中: m 为第 m 阶透射极大值; n 为透射率。式(18)与式(3)联立,可得

$$L_0 + k \sin(2\pi f t) = \frac{m\lambda}{4n} \quad (19)$$

调节函数信号发生器的输入信号幅值,使得在一个腔的扫描周期 T 中仅有两个激光器透射光强极大值,分别为

$$t_1 = \frac{1}{2\pi f} \arcsin \left[\frac{1}{k} \left(\frac{m\lambda}{4n} - L_0 \right) \right] \quad (20)$$

$$t_2 = \frac{1}{f} - \frac{1}{2\pi f} \arcsin \left[\frac{1}{k} \left(\frac{m\lambda}{4n} - L_0 \right) \right] \quad (21)$$

联立式(20)、式(21),得到 t_1 、 t_2 时间间隔 τ 的表达式如下

$$\tau = \frac{1}{f} - \frac{1}{\pi f} \arcsin \left[\frac{1}{k} \left(\frac{m\lambda}{4n} - L_0 \right) \right] \quad (22)$$

式(22)中只有波长 λ 为变量,可以用 τ 作为评价频率稳定度的指标。由于激光器输出波长的变动,导致 F-P 光学腔腔长在扫描过程中产生透射光强峰值的时间发生变化,会引起相邻透射光强峰值时间间隔即图 3 中 τ_1 、 τ_2 的改变,当光频稳定时, τ_1 、 τ_2 值保持稳定。

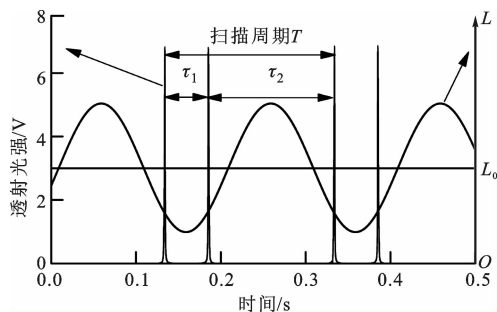


图3 F-P 光学腔腔长调制与透射信号的对应关系

2 稳频实验

2.1 稳频控制实验

采用 F-P 光学腔的锁相稳频技术原理如图 1 所示,实现对 Littman 型外腔半导体激光器的稳频。铷原子钟 (Stanford FS725) 为函数信号发生器 (Tektronix AFG3052C) 提供外部时钟参考。热敏电阻 (Thorlabs TH10K) 与半导体制冷器 (TEC1.4-6) 对激光二极管进行温度的反馈控制,实现长时间的温度稳定。函数信号发生器驱动 F-P 光学腔 (Thorlabs SA200-5B) 腔内的 PZT,使腔长按照正弦规律变化,激光器的出射光入射到 F-P 光学腔中,光电探测器将透过 F-P 光学腔的光信号转化为电信号。锁相放大器 (Stanford SR830) 将这一电信号与信号发生器的驱动信号进行混频,将混频后的信号进行低通滤波得到光学腔谐振信号相位误差 δ ,作为 PID 控制器 (Stanford SIM960) 的测量输入对激光器进行反馈控制,实现激光器的频率稳定。

将 Littman 型外腔半导体激光器的输入电流设置为 120 mA 的恒流模式,温度为 25 °C,信号发生器以频率为 10 Hz、电压幅值为 1~5 V 的正弦波驱动 F-P 光学腔,在无反馈情况下锁相放大器输出的光学腔谐振信号相位误差 δ 如图 4 所示。由图可见,在 3 min 内, δ 从 2 V 漂移到 10 V,漂移量约 400%,经计算,其标准差为 2.467 66 V。透射极大值时间间隔 τ_1 、 τ_2 如图 5 所示,同样有明显的漂移趋势,漂移量约为 25%,标准差分别为 2.997 9、3.050 8 ms。

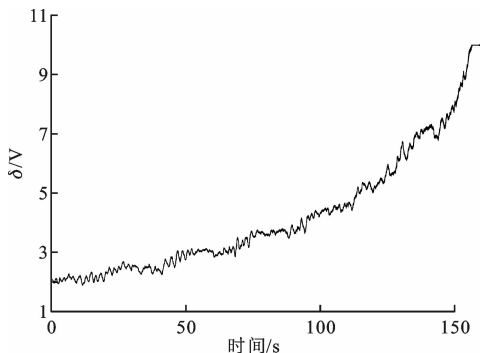


图4 无反馈条件下光学腔谐振信号相位误差

(1)在其他条件不变的情况下,PID 控制器参考值设为 1 V,对激光器进行电流反馈控制。信号稳定后,3 min 的相位误差如图 6 所示,误差信号稳定在 1 V,经计算其标准差为 0.019 0 V。 τ_1 和 τ_2 的曲线如图 7 所示,标准差分别为 2.447 59、2.608 01 ms。

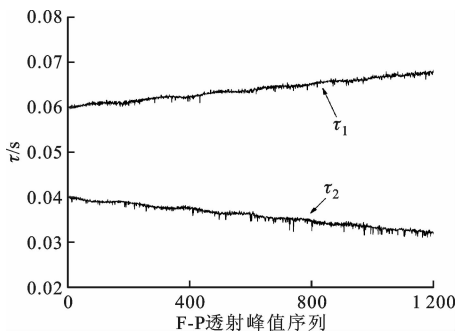


图 5 无反馈条件下 τ_1 、 τ_2 曲线图

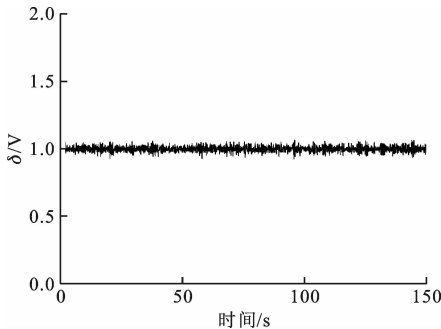


图 6 电流反馈条件下光学腔谐振信号相位误差

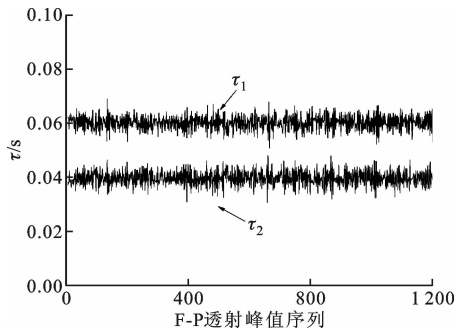


图 7 电流反馈条件下 τ_1 、 τ_2 曲线图

在电流反馈情况下,每间隔 10 min 采集 1 组数据,得到光学腔谐振信号相位误差 δ 标准差与 τ_1 、 τ_2 标准差如表 1 所示。

表 1 电流反馈情况下 δ 及 τ_1 、 τ_2 标准差

测量序号	δ 标准差/V	τ_1 标准差/ms	τ_2 标准差/ms
1	0.019 034	2.447 59	2.608 01
2	0.019 862	2.542 08	2.747 49
3	0.019 535	2.286 86	2.420 11

测试结果表明,电流反馈显著提高了光学腔谐振信号相位误差 δ 的稳定度,也抑制透射极大值时间间隔的变化。

(2)在同样的实验条件下,采用 PID 反馈外腔 PZT 电压的方法,得到光学腔谐振信号相位误差 δ 如图 8 所示,其标准差为 0.037 603 V。 τ_1 、 τ_2 曲线

如图 9 所示,标准差分别为 0.752 547、0.749 241 ms。

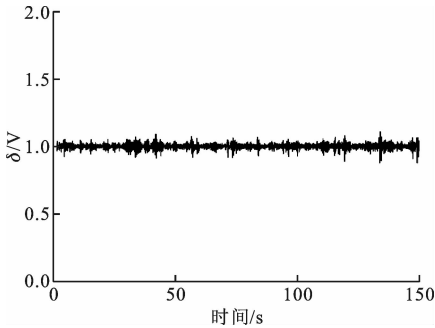


图 8 外腔 PZT 电压反馈条件下光学腔谐振信号相位误差

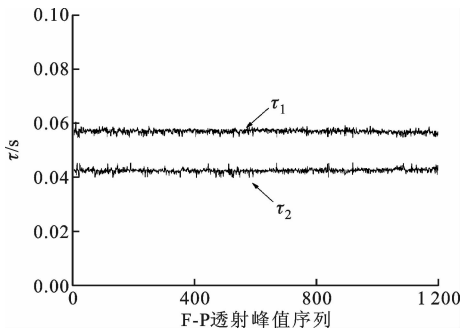


图 9 外腔 PZT 电压反馈条件下 τ_1 和 τ_2 曲线图

在外腔 PZT 电压反馈条件下,每间隔 10 min 采集 1 组数据,得到光学腔谐振信号相位误差 δ 标准差与 τ_1 、 τ_2 标准差如表 2 所示。

表 2 外腔反馈情况下 δ 及 τ_1 、 τ_2 标准差

测量序号	δ 标准差/V	τ_1 标准差/ms	τ_2 标准差/ms
1	0.037 603	0.752 55	0.749 24
2	0.035 290	0.565 53	0.599 45
3	0.038 157	0.672 58	0.654 30

电压反馈实验结果优于电流反馈,在得到较稳定的光学腔谐振信号相位误差的同时,通过分析 τ_1 、 τ_2 标准差数据,得出频率稳定度比电流反馈时提升 75%。Littman 型可调谐外腔半导体激光器结构如图 2 所示。零级衍射光作为输出光,一级衍射光通过反射镜原路返回到谐振腔,实现调谐。电流反馈稳频的前提是一级衍射光在这个过程中强度不变,然而通过电流反馈控制稳频时,电流显著改变导致反馈回的一级衍射光强度改变,反馈光强也是影响频率的因素,两种影响因素耦合在一起影响了实验的最终结果。

(3)通过设置不同的 PID 参考电压实现设置不同的光频,在相同的条件下进行实验,得到光学腔谐振信号相位误差 δ 见图 10, τ_1 、 τ_2 值曲线见图 11。

在改变光频外腔反馈的情况下,每间隔 10 min 多次采样,得到光学腔谐振信号相位误差 δ 标准差与 τ_1 、 τ_2 的标准差如表 3 所示。

采样次数	δ 标准差/V	τ_1 标准差/ms	τ_2 标准差/ms
1	0.033 661	0.422 83	0.428 60
2	0.038 464	0.385 00	0.402 83
3	0.034 872	0.419 32	0.420 17

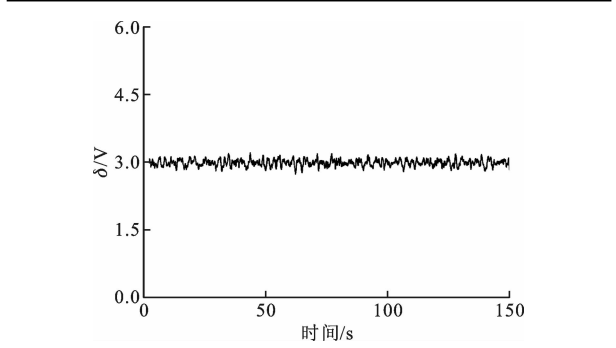


图 10 改变光频后外腔反馈下谐振信号相位误差

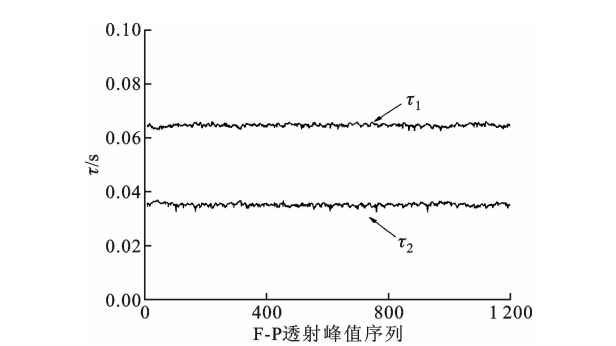


图 11 改变光频后外腔反馈 τ_1 和 τ_2 曲线图

测试结果表明,外腔反馈稳频方式在不同光频下都能抑制误差信号与 τ 信号的波动,稳频效果提高为无反馈情况下的 80% 以上。

2.2 稳频 He-Ne 激光器性能对比

本文选用透射峰值时间间隔 τ_1 、 τ_2 作为间接评价稳频方法有效性的指标。为了进一步分析外腔半导体激光器的稳频效果,用稳频 He-Ne 激光器(CVI&MG 25-STP-912-230)进行一组对比实验。该激光器输出波长为 632.8 nm,8 h 内频率稳定性小于 ± 1 MHz,实验装置如图 12 所示。

在相同实验条件下,稳频 He-Ne 激光器的误差信号如图 13 所示,在 0.6 V 附近发生微小波动,其标准差为 0.007 03 V。透射极大值时间间隔 τ_1 、 τ_2 曲线如图 14 所示, τ_1 、 τ_2 标准差分别为 0.104 455、0.145 368 ms。

稳频 He-Ne 激光器透射峰值时间间隔 τ 稳定

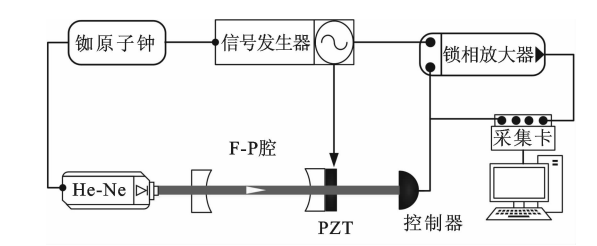


图 12 He-Ne 激光器对比实验装置示意图

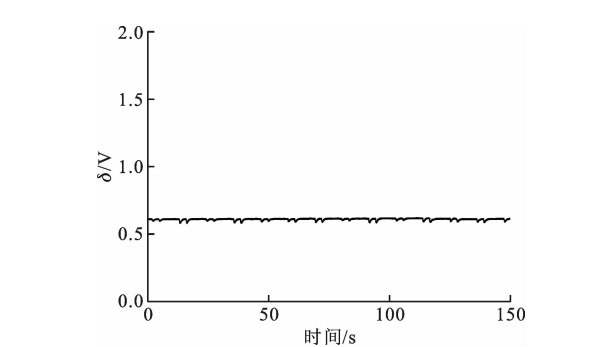


图 13 He-Ne 激光器谐振信号相位误差

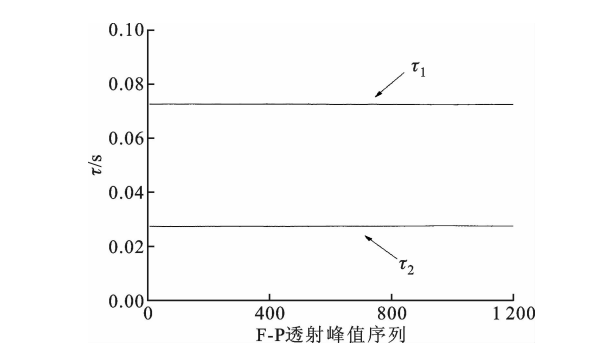


图 14 He-Ne 激光器 τ_1 和 τ_2 曲线图

在 0.1 ms,通过外腔 PZT 电压反馈,可以实现半导体激光器比较理想的稳频效果,透射峰值时间间隔 τ 稳定在 0.1 ms 量级上。

3 结 论

本文针对外腔半导体激光器出射频率难以稳定的问题,提出一种锁相稳频技术。该方法将激光器的光频锁定在 F-P 光学腔的平均腔长上,系统简单,对腔长扫描频率要求较低。通过理论推导,将光学腔谐振信号相位误差稳定性和波长稳定性联系起来,并提出用 F-P 光学腔透射峰值时间间隔 τ 标准差间接验证波长稳定性。同时,探讨了电流、外腔 PZT 电压两种稳频方式的可行性,对实验结果进行了分析,并与稳频 He-Ne 激光器实验进行比对。结果表明,在外腔反馈的条件下,激光器出射频率稳定性提高 80% 以上,并且可以实现较长时间的频率稳定。该方法还能够适用于不同波长的激光器的稳频。

参考文献:

- [1] 苑丹丹, 胡妹玲, 刘宏海, 等. 激光器稳频技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2011(8): 22-28.
YUAN Dandan, HU Zhuling, LIU Honghai, et al. Research of laser frequency stabilization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011(8): 22-28
- [2] 陈长水, 王芳, 刘颂豪, 等. 半导体激光器稳频技术综述 [J]. 量子电子学报, 2010, 27(5): 513-521.
CHEN Changshui, WANG Fang, LIU Songhao, et al. Review of frequency stabilization technology of semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2010, 27(5): 513-521.
- [3] HALL J L, HOLLBERG L, BAER T, et al. Optical heterodyne saturation spectroscopy [J]. Appl Phys Lett, 1981, 39(11): 680-683
- [4] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSKI F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. Applied Physics: B, 1983, 31(2): 97-105.
- [5] BLACK E D. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization [J]. American Journal of Physics, 2001, 69(1): 79-87.
- [6] TIWARI V B, MISHRA S R, RAWAT H S, et al. Laser frequency stabilization and large detuning by Doppler-free dichroic lock technique: application to atom cooling [J]. Pramana, 2005, 65(3): 403-411.
- [7] 邓忠文, 刘志刚, 陶龙, 等. 新型可调谐外腔半导体激光器光频扫描干涉测距方法 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(5): 104-109
DENG Zhongwen, LIU Zhigang, TAO Long, et al. Novel frequency scanned interferometry absolute distance measurement by tunable external-cavity diode laser [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(5): 104-109
- [8] 胡国元, 艾勇, 张燕革. F-P 干涉仪传递函数的分析及模拟 [J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(S2): 330-333.
HU Guoyuan, AI Yong, ZHANG Yange. Analysis and simulation of FPI transfer function [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22(S2): 330-333.
- [9] MCFERRAN J J, MARIC M, LUITEN A N. New method to estimate the frequency stability of laser signals [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(6): 2065-2067.
- [10] LIU X, CASSOU K, CHICHE R, et al. Laser frequency stabilization using folded cavity and mirror reflectivity tuning [J]. Optics Communications, 2016, 369: 84-88.
- [11] HUNGER D, STEINMETZ T, COLOMBE Y, et al. Fiber Fabry-Perot cavity with high finesse [J]. New Journal of Physics, 2010, 12(6): 1-23.
- [12] 张为波, 刘志刚, 周杨理, 等. 基于同步调谐的 Littman 型可调谐半导体激光器 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(10): 29-33.
ZHANG Weibo, LIU Zhigang, ZHOU Yangli, et al. Tunable diode lasers in Littman configuration with the method of synchronous tuning [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(10): 29-33.
- [13] ZENG Z, ZHANG S, TAN Y, et al. The frequency stabilization method of laser feedback interferometer based on external cavity modulation [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(2): 025108.

[本刊相关文献链接]

- 余宝, 王昭, 黄军辉, 等. 机床滚转角高精度测量中的频偏现象研究. 2016, 50(3): 101-105. [doi: 10.7652/xjtuxb201603016]
- 张为波, 刘志刚, 周杨理, 等. 采用同步调谐方法的 Littman 型可调谐半导体激光器. 2015, 49(10): 29-33. [doi: 10.7652/xjtuxb201510005]
- 张周强, 贾书海, 马斌山. 光声光谱遥测装置中音叉光激励振动的数值模拟. 2014, 48(7): 96-101. [doi: 10.7652/xjtuxb201407017]
- 邓忠文, 刘志刚, 陶龙, 等. 新型可调谐外腔半导体激光器光频扫描干涉测距方法. 2013, 47(5): 104-109. [doi: 10.7652/xjtuxb201305019]
- 刘晔, 惠培智, 褚俊龙, 等. 利用泰勒展开式的光学电流互感器补偿方法和仿真研究. 2012, 46(8): 22-26. [doi: 10.7652/xjtuxb201208004]
- 赵一博, 韩妙飞, 闫相国. 几种漫射光学成像图像重建算法的比较研究. 2012, 46(4): 106-111. [doi: 10.7652/xjtuxb201204018]
- 秦玉伟, 赵宏. 庄仲琴热光源谱域光学相干层析成像系统. 2011, 45(11): 63-67. [doi: 10.7652/xjtuxb201111013]
- 费致根, 郭俊杰, 马小军, 等. 微型五坐标测量机激光测头安装误差的标定. 2011, 45(5): 64-68. [doi: 10.7652/xjtuxb201105012]

(编辑 杜秀杰)