

# 基于 1.6 μm 甲烷气体吸收线的半导体激光器 频率稳定性分析\*

董磊 马维光 尹王保 李昌勇 贾锁堂

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

**摘要** 利用波长调制技术以及数字 PI 控制器将外腔二极管激光器(ECDL)稳定到 1.6 μm 处的甲烷气体吸收线上. 稳定后的激光频率波动小于 5.6 MHz, 相对于自由运转时的 160 MHz 有了很大提高, 而误差信号的 Allan 方差均方根(即稳定度)在平均积分时间为 64 s 时达到最小值  $1.66 \times 10^{-11}$ . 从理论上定性分析了频率稳定度受到的各种限制因素, 最后得出本实验中频率稳定度主要受频率调制和探测器噪声限制的结论, 同时给出了提高频率稳定度的方法. 被稳定的激光器主要用于为甲烷气体浓度监测提供频率参考.

**关键词** 激光稳频; 波长调制; 外腔二极管激光器; 数字 PI 控制

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A

## 0 引言

甲烷气体是瓦斯的主要成份, 利用激光遥感技术对甲烷气体的含量进行实时监测<sup>[1-3]</sup>对我国的煤炭工业安全有着重大意义. 光学遥感气体监测是利用气体某一段吸收波段的吸收特性来检测其含量的, 所以激光光源在这一波段的长期稳定性和复现性将直接影响测量结果.

许多有关稳频的文章只是详细介绍了稳频的技术, 以及最终可获得的稳定度(一般由 Allan 方差反映), 但并没有从理论上分析稳定度的各种限制性因素以及如何减少这些限制, 从而提高稳定度<sup>[4,5]</sup>. 本文先是利用波长调制技术<sup>[6,7]</sup>实现了把外腔二极管激光器锁在了 1.6 μm 处的甲烷气体吸收线上, 为甲烷气体浓度探测提供了一个稳定的频率参考, 然后运用 Tsuchida H. 等人的理论, 分析了在本实验中各种稳定度的限制因素, 并和实验结果比较, 吻合得很好. 最后还给出了提高频率稳定度的方法.

## 1 实验装置及稳频过程

本实验使用的光源为德国 Sacher 公司 TEC500, Littman 结构外腔式二极管激光器. 它的工作温度为 16.5℃, 固定输入电流为 70 mA, 输出功率为 1.5 mW, 输出激光在短时间内线宽小于 2 MHz, 图 1 为它在 6105 cm<sup>-1</sup>附近的增益曲线. 实验中波长微调是采用电压调制的方法, 其过程为把调制电压加到激光器外腔光栅后面的压电陶瓷上, 使光栅产生振

动, 引起输出激光波长的变化. 压电陶瓷的预置直流偏置为 50 V 左右, 电压的调制度为 0.8 G/V. 探测器为日本 HAMAMATSU 公司 G8605-23, InGaAs 光电探测器, NEP = 10<sup>-14</sup> W/Hz<sup>1/2</sup>. 锁相放大器为美国 SRS 生产的数字锁相放大器, 本实验中锁相的积分时间常数为 1 ms.

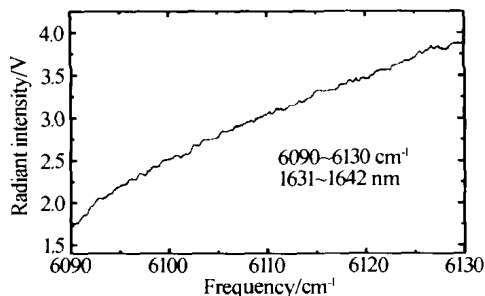


图 1 使用的激光器在 6105 cm<sup>-1</sup>附近的增益曲线  
Fig. 1 Gain curve of the employed laser around 6105 cm<sup>-1</sup>

实验装置如图 2, 外腔二极管激光器输出的光经过法拉第隔离器和甲烷气体吸收池后被探测器探测. 探测器的输出信号被送入数字锁相放大器, 与内部 1 kHz 的参考信号进行相关, 得到一次谐波信号, 然后送入计算机进行处理, 计算机输出控制信号, 同锁相输出的内部 1 kHz 的参考信号相加后, 送入激光器的压电陶瓷控制端口, 对激光器的波长进

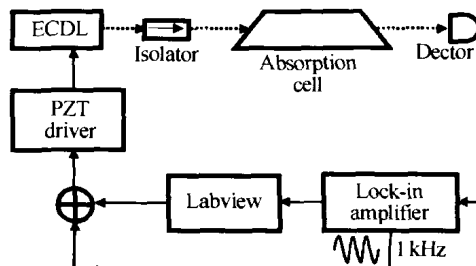


图 2 外腔激光器频率稳定实验装置图  
Fig. 2 Experimental block diagram for frequency stabilization of an external-cavity diode laser

\* 山西省自然科学基金、山西省发展计划委高级专家基金资助  
Tel: 0351-7018489 Email: donglei@sxu.edu.cn  
收稿日期: 2004-03-09

行调制和控制.

对于正弦信号作用下的波长调制,激光器的瞬间频率为

$$\omega_i(t) = \omega_0 + \Delta F \cos \omega_m t \quad (1)$$

式中  $\Delta F = \beta \omega_m$ ,  $\omega_0$  为激光器的中心频率,  $\omega_m$  为调制频率,  $\beta$  为频率调制系数. 对于弱吸收, 通过样品池的光强表示为

$$I_T(\omega) = I_0(\omega) [1 - \alpha(\omega)] \quad (2)$$

对式(2)用 Taylor 级数展开并代入式(1)得

$$I_T(\omega_i) = I_0 [1 - \alpha(\omega_0) - \frac{d\alpha}{d\omega}|_{\omega_0} \Delta F \cos \omega_m t - \frac{1}{2!} \frac{d^2\alpha}{d\omega^2}|_{\omega_0} (\Delta F)^2 \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega_m t) - \dots] \quad (3)$$

通过锁相相关后获得的一次谐波为吸收系数的一次微分信号.

稳频使用的甲烷气体吸收线见图 3 实线(实验测得). 该吸收线实例位于  $6105 \text{ cm}^{-1}$ , 属于甲烷气体  $2\nu_3$  带 R9 支. 这条吸收线轮廓是由两条相差 6 MHz 的单吸收线组成, 见图 3 虚线(由 Voigt 拟合得出<sup>[11]</sup>). 这时, 样品池中的甲烷气体压强为 2000 Pa, 吸收线半宽大约为 800 MHz, 样品池长度为 30 cm. 图 4 为实验测得稳频所使用吸收线的一次谐波信号, 它的零交叉点对应吸收线的线中心. 这正是下面利用一次谐波技术进行稳频的关键.

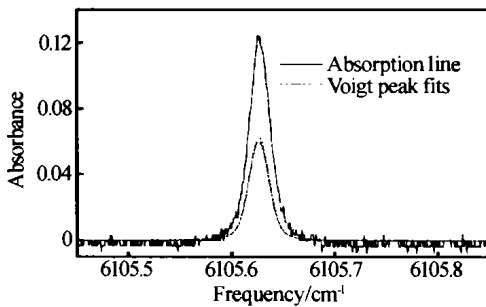


图 3 稳频使用的甲烷气体吸收线  
Fig. 3 The absorption line of methane for frequency stabilization

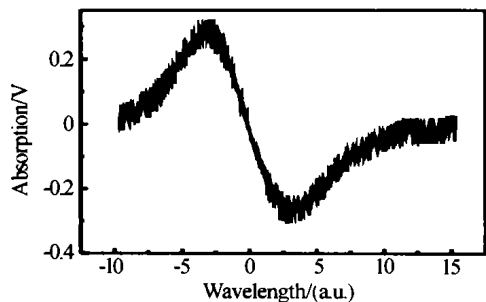


图 4 甲烷气体吸收线的一次谐波信号  
Fig. 4 The first-harmonic of the absorption line of methane

激光器频率稳定的过程就是连续调节激光器外腔 PZT 的电压, 使一次谐波的信号始终保持在零交叉点的过程. 此过程需要通过计算机采集一次谐波的误差信号, 在计算机中进行比较和数字化 PI 运算, 通过 DA 转换提供反馈电压到 PZT 上来完成.

计算机运行在 Labview 平台上, 所使用的 AD-DA 转换卡为美国 NI 公司生产的 PCI-MIO-16E-1, 采样速率为 600 Hz.

## 2 实验结果与分析

通过测量自由运转和稳定的误差信号以及频率-电压转换系数  $g_{FV}$  (本实验  $g_{FV} = 1.79 \times 10^{-9} \text{ V/Hz}$ , 由实验测得), 可以计算出在激光器自由运转下, 频率漂移为 160 MHz; 稳到甲烷吸收线上后, 频率漂移被压窄到 5.6 MHz 左右.

Ohtsu 等人<sup>[8]</sup> 已经从理论上估算出半导体激光器的极限频率稳定度最优可达到量子噪声水平<sup>[9]</sup>, 但是它还要受到其他几个因素的限制. 本文使用波长调制技术获得误差信号, 首先它就不可避免的受到调制信号频率波动的限制<sup>[10]</sup>, 即

$$\sigma(2, \tau) = \Delta\nu_s / \nu_0 \pi f_m \tau \quad (4)$$

在这里  $\sigma(2, \tau)$  为 Allan 方差的平方根,  $\nu_0$  为激光器中心频率,  $\Delta\nu_s$  为激光频率的调制幅度,  $f_m$  为调制频率. 其次, 它还会受到探测器噪声的限制<sup>[10]</sup>, 即

$$\sigma(2, \tau) = (2kTR + eI_0R^2) \times (g_{FV}\nu_0)^{-1} \tau^{-1/2} \quad (5)$$

在这里  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $e$  为电子电荷,  $I_0$  为流过 PN 结或越过势垒的电流,  $R$  为负载电阻,  $g_{FV}$  为频率-电压转换系数. 上式中  $2kTR$ 、 $eI_0R^2$  分别为热噪声和散粒噪声对 Allan 方差的贡献. 由此可见, 可探测到的最小频率变化就受到探测器噪声的限制.

为了衡量激光的频率稳定性, 我们计算出误差信号在平均积分时间 1 ms 和 150 s 之间的 Allan 方差<sup>[11]</sup>  $\sigma^2$ . 图 5 为激光器自由运转时的 Allan 方差平方根  $\sigma$ . 由图可见, 在 0.06 s 时 Allan 方差平方根达到最小值  $1.33 \times 10^{-9}$ , 然后就缓慢上升, 这主要是因为环境温度的变化和二极管输入电流的波动引起的. 图中直线为估算的量子噪声所决定的理论最低稳定度<sup>[8]</sup>, 可以看到自由运转的激光器稳定度比理论所决定的最优稳定度相差很多, 在积分时间大于 0.06 s 时, 自由运转激光器的 Allan 方差的平方根与理论曲线趋势相反.

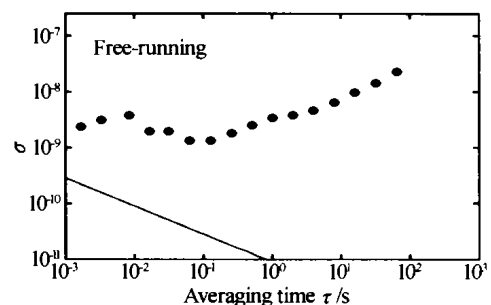


图 5 自由运转激光器的 Allan 方差平方根  
Fig. 5 Square root of Allan for a ECDL laser under free-running

图 6 为稳定后误差信号的 Allan 方差平方根. 在平均积分时间为  $1 \text{ ms} < \tau < 130 \text{ s}$  时, 获得的稳定度为

$$1.66 \times 10^{-11} \leq \sigma \leq 1.8 \times 10^{-9}$$

图中, 直线 A 和 B 分别为探测器噪声和频率调制的方差, 直线 C 为估算的量子噪声决定的理论稳定度<sup>[8]</sup>. 本实验中  $f_m = 1 \text{ kHz}$ ,  $\nu_0 = 6105.6260 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\Delta\nu_s = 11.2 \text{ MHz}$ ,  $g_{\text{FV}} = 1.79 \times 10^{-9} \text{ V/Hz}$ , 代入式(4)和(5)可得到 A 线为  $\sigma = 1.1 \times 10^{-10} \tau^{-1/2}$ , B 线为  $\sigma = 1.9 \times 10^{-11} \tau^{-1}$ . 由图可见, 当  $\tau < 0.03 \text{ s}$  时, 稳定度受到频率调制限制, 当  $\tau > 0.03 \text{ s}$  时, 稳定度受到探测器噪声的限制. 稳定度从始到终都没有达到量子噪声的水平, 这可能是因为吸收线比较弱. 为了获得较高的信噪比, 我们需要较大的调制电压, 即较大的  $\Delta\nu_s$ ; 同时吸收线的半宽比较大(约  $800 \text{ MHz}$  左右), 这就意味着  $g_{\text{FV}}$  比较小, 所以由式(4)、(5)看出频率调制和探测器噪声的影响会比较大. 要想获得更高的稳定度, 可以加大吸收池长度, 或者使用饱和和吸收光谱. 比较图 5 和图 6 可以看出, 被稳频的激光器稳定度被提高了 100 倍左右.

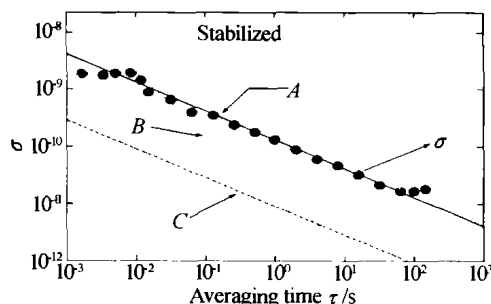


图 6 稳频激光器的 Allan 方差平方根

Fig. 6 Square root of Allan for a ECDL laser under stabilized frequency

### 3 结论

通过实验我们在  $1.6 \mu\text{m}$  处获得了一个频率参考. 频率波动小于  $5.6 \text{ MHz}$ , 稳定度在平均积分时间为  $64 \text{ s}$  时达到了最小值  $1.66 \times 10^{-11}$ . 稳定度在  $\tau < 0.03 \text{ s}$  受到了频率调制的限制; 在  $\tau > 0.03 \text{ s}$  时受到了探测器噪声的限制. 由于较大的频率调制和探测器噪声的限制, 使稳定度始终达不到量子噪声的水平. 可以通过加大吸收池长度, 或者使用饱和吸收光谱来提高本实验中的稳定度. 系统中使用了计

算机连续化控制技术代替了模拟 PI 控制环, 减小了系统的体积, 为产品的小型化提供了可能. 本实验也用模拟 PI 控制环完成过, 其性能和结果同数字控制环基本相同.

### 参考文献

- 董磊, 马维光, 尹王保, 等. 甲烷气体  $2\nu_3$  带 R9 支吸收线强度的精确测量. 光学学报, 2004, **24**(5): 709 ~ 712  
Dong L, Ma W G, Yin W B, et al. Acta Optica Sinica, 2004, **24**(5): 709 ~ 712
- 尹王保, 汪丽蓉, 赵延霆, 等. 靶材料 BRDF 现场模拟测量. 光子学报, 2003, **32**(4): 473 ~ 476  
Yin W B, Wang L R, Zhao Y T, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, **32**(4): 473 ~ 476
- 马维光, 尹王保, 董磊, 等. 高灵敏探测甲烷气体的实验研究. 中国激光, 2004, **31**(Suppl.): 287 ~ 289  
Ma W G, Yin W B, Dong L, et al. Chinese Journal of Lasers, 2004, **31**(Suppl.): 287 ~ 289
- Koch G J, Cook A L, Fitzgerald C M, et al. Frequency stabilization of a diode laser to absorption lines of water vapor in the  $944 \text{ nm}$  wavelength region. Opt Eng, 2001, **40**(4): 525 ~ 528
- Yanagawa T, Saito S, Yamamoto Y. Frequency stabilization of  $1.5 \mu\text{m}$  InGaAsP distributed feedback laser to  $\text{NH}_3$  absorption lines. Appl Phys Lett, 1984, **45**(8): 826 ~ 828
- 李倩, 肖连团, 李昌勇, 等. 低频波长调制光谱的理论及实验研究. 光学学报, 2001, **21**(3): 317 ~ 319  
Li Q, Xiao L T, Li C Y, et al. Acta Optica Sinica, 2001, **21**(3): 317 ~ 319
- 黄涛, 赵延霆, 赵建明, 等. 谐波探测在 Cs 原子饱和吸收光谱中的应用. 光子学报, 2003, **32**(10): 1247 ~ 1249  
Huang T, Zhao Y T, Zhao J M, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, **32**(10): 1247 ~ 1249
- Ohtsu M, Fukada H, Tako T, et al. Estimation of the ultimate frequency stability of semiconductor lasers. Jpn J Appl Phys, 1983, **22**(7): 1157 ~ 1166
- Yamamoto Y. AM and FM quantum noise in semiconductor laser-part I: theoretical analysis. IEEE J Quantum Electron, 1983, **QE-19**(1): 34 ~ 46
- Tsuchida H, Tako T. Limit of the frequency stability in AlGaAs semiconductor lasers. Jpn J Appl Phys, 1983, **22**(12): 1870 ~ 1875
- Allan D W. Statistics of atomic frequency standard. Proc IEEE, 1966, **54**(2): 221 ~ 230

## An Analysis of Frequency Stability of LD Stabilized to CH<sub>4</sub> Absorption Lines at 1.6 μm

Dong Lei, Ma Weiguang, Yin Wangbao, Li Changyong, Jia Suotang

*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, College of Physics and Electronics Engineering,  
Shanxi Univ., Taiyuan 030006*

Received date: 2004-03-09

**Abstract** The frequency of an external-cavity diode laser has been stabilized to absorption line of methane at wavelengths around 1.6 μm by employing the wavelength modulation technique and the digitized controller. The frequency fluctuation of the stabilized laser is held within 5.6 MHz and better than 160 MHz of the free-running laser. The root of Allan variance of error signals reaches a minimum of  $1.66 \times 10^{-11}$  when averaging time is 64 s, well within the precision needed for application. And various limiting factors are analyzed. It is found that the stability is mostly limited by the noise of photodetector and frequency modulation in the experiment. Several methods of improved stability are also presented here. Such a treatment can provide a guidance of any experiment of frequency stabilization. The primary application of this stabilized laser is to provide a frequency reference for remote sensing of the concentration of methane.

**Keywords** Laser stabilization; Wavelength modulation; External-cavity diode laser; Digital PI controller



**Dong Lei** was born in 1979, in China. He received the B. S. degree in Electronics from the Shanxi University in 2002. Now he is studying in Shanxi University for the Doctor's degree. He is researching on the laser technology and the laser spectrum.