

# 消除波长调制光谱中激光能量起伏对 谐波信号干扰的新技术\*

马维光 董 磊 尹王保 李昌勇 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,太原 030006)

**摘 要** 利用扫描外腔二极管激光器(ECDL)后镜压电陶瓷(PZT)电压时频率变化和背景能量起伏之间存在相位差的特性,通过矢量锁相放大器将一个探测器探测到的信号成份和背景起伏噪声分开,获得标准的  $1f \sim 4f$  信号. 如果不存在这个相位差,则无法消除谐波信号背景干扰. 这种技术简单、实用,对理论分析谐波信号以及实现高灵敏探测污染气体传感器的小型化都有重要的指导意义.

**关键词** 应用光学;背景噪声的消除;相敏检测;相位差

**中图分类号** O561.3 **文献标识码** A

## 0 引言

采用可调谐二极管激光器和波长调制光谱技术可以建立方便、廉价、便携的污染气体传感器系统,可以测量气体浓度、温度以及气流速度等<sup>[1,2]</sup>. 同时可以结合光纤耦合技术将多个激光器输出的光耦合起来同时探测多种污染气体<sup>[3]</sup>. 外腔二极管激光器由于具有窄线宽、宽的调谐范围,因此被广泛的应用于气体检测中. 但在利用波长调制和相敏检测技术<sup>[4,5]</sup>来探测微量气体时,由于其存在一定的背景起伏,严重的影响了谐波信号的灵敏度和真实度. 消除这一背景干扰就成了当前我们要解决的一个重要问题. Dharamsi 等进行了大量的利用高次谐波消除探测信号中腔效应<sup>[6]</sup>以及气体浓度扰动<sup>[7]</sup>的实验和理论研究.

本文通过实验分析发现在改变 ECDL 外腔后镜 PZT 电压时,输出激光的背景能量起伏和频率变化之间存在一个固定的相位差,经过理论以及对矢量锁相放大器两个通道输出信号的分析,发现通过合适的处理可以消除谐波探测当中背景起伏的干扰获得很优的信噪比.

## 1 实验装置和技术

图 1 为消除谐波信号背景起伏的实验装置图. 激光源采用 Littman-Metcalf 结构的外腔二极管激光器(ECDL)(SacherTEC500)出射波长为  $1.637 \mu\text{m}$ , 输出功率约为  $1.5 \text{ mW}$ . 通过改变外腔反射镜后面

PZT 的电压来实现波长的连续扫描,线宽小于  $2 \text{ MHz}$ . 将函数发生器(Model Agilent 33120)输出  $7 \text{ Hz}$  的三角波和矢量锁相放大器(Stanford Research Systems Model SR830)输出  $1 \text{ kHz}$  的正弦信号叠加后通过激光控制器的 FM 输入口(内部有十倍的放大)加在偏压为  $34 \text{ V}$  的 PZT 上,来完成波长扫描和调制. 样品池是一根长  $31 \text{ cm}$ 、直径  $3 \text{ cm}$  内表面镀银的密封铜管,充入气压为  $30 \text{ Pa}$  的甲烷气体,气体压强由 Motorola MPX100 压力传感器监测. 吸收信号由热电冷却的 InGaAs 光电探测器(HAMAMATSU G8605-23  $\text{NEP} = 10^{-14} \text{ W/Hz}^{1/2}$ )探测后送入矢量锁相放大器的输入端, X 通道输出的谐波信号和经过放大后的 Y 通道背景噪声叠加后由计算机上的数据采集卡采集,锁相的时间常数设置在  $1 \text{ ms}$ .

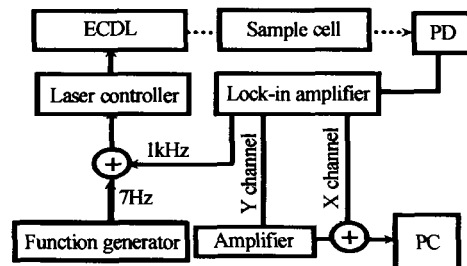


图 1 消除谐波信号背景起伏的实验装置  
Fig. 1 The setup of eliminating the background energy fluctuation of harmonic signal

## 2 理论分析

对于一个 ECDL 系统,吸收信号是通过扫描加在 PZT 上的电压引起波长的连续调谐而获得的. 而由于激光的输出功率随电压的变化不是恒定的,会在吸收信号上附加一个较大的能量起伏,严重的影响了吸收信号. 如果在电压的扫描过程中,频率

\*国家重大基础研究前期研究专项(2002ccc02500),山西省留学基金资助课题和山西省自然科学基金(20041037)  
Tel:0351-7018489 Email:mwg@sxu.edu.cn  
收稿日期:2004-04-30

变化和背景能量变化之间存在一个相位差  $\delta$ , 就可以用同一个探测器利用相敏检测技术同时获得吸收信号和背景信号. 具体理论分析如下:

一个幅度随频率线性变化的系统, 考虑到激光器的能量起伏, 则它的输出信号可以表示为

$$E_s = A \cos(\omega_0 t + \theta) + B \cos(\omega_0 t + \theta + \delta) \quad (1)$$

这里,  $A$  表示信号幅度,  $B$  为背景能量起伏幅度,  $\omega_0$  为调制频率,  $\theta$  为信号和参考信号间的相位差,  $\delta$  为信号和背景的相位差. 将这个信号注入矢量型锁相放大器后, 经过相敏检测后, 锁相的  $X$  通道和  $Y$  通道的输出信号为

$$E_{Ox} = \frac{1}{2} A \cos \theta + \frac{1}{2} B \cos(\theta + \delta) \quad (2)$$

$$E_{Oy} = -\frac{1}{2} A \sin \theta - \frac{1}{2} B \sin(\theta + \delta) \quad (3)$$

当  $\theta = 0$  时,  $E_{Ox}$  输出最大信号

$$E_{Ox} = \frac{1}{2} A + \frac{1}{2} B \cos \delta \quad (4)$$

$E_{Oy}$  输出无信号背景噪声

$$E_{Oy} = -\frac{1}{2} B \sin \delta \quad (5)$$

则真实信号  $A$  可以表示为

$$A = 2E_{Ox} + 2E_{Oy} \cot \delta \quad (6)$$

由式(6)发现如果  $\delta$  为零, 则无法利用上述方法将两者分离.

### 3 实验结果和讨论

图 2 表明在实验上当 ECDL 外腔 PZT 被正弦扫描时背景的起伏和频率调谐之间的关系, 这两个信号是被同时触发. 采用 FP 腔的透射信号来表征频率的变化, 这里选用对应本实验波长 1637 nm 精细度很低的 852 nm 的共焦 FP 腔, 这样可以很容易表征波长两个扫描电压周期期间的分界点. 对于图上表征频率的实线,  $T_1$  为一个相邻周期的分界点. 图中虚线表示没有 FP 腔时的透射曲线, 以此来表征

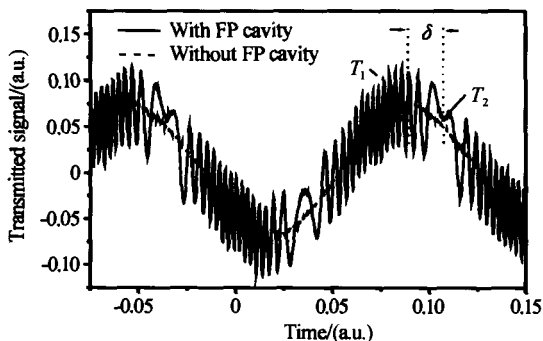


图 2 相同的电压扫描下, 频率调谐(实线)和背景能量起伏(虚线)相位对比

Fig. 2 The phase comparisons of frequency tuning and power variation at the same scanning voltage process

背景能量起伏随电压的变化,  $T_2$  为其的一个分界点. 通过这一实验发现频率调谐和能量起伏之间确实存在一个相位差  $\delta$ , 可以测出其约为  $40^\circ$ .

图 3 为甲烷  $2\nu_3$  带 R(9) 支吸收带中 F1, F2 的叠加线, 具有很大的背景起伏, 而且吸收信号很弱, 要获得很高的探测灵敏度, 谐波探测就是一种很有效的方法. 图 4 为这条吸收线的未处理和处理后的  $1f \sim 4f$  谐波信号的对比,  $A$  为没有经过背景处理的  $X$  通道直接的输出轮廓,  $B$  为  $Y$  通道放大 1.4 倍后输出的背景轮廓.  $A+B$  表示利用式(6)获得的谐波信号, 我们发现基本上已经消除了背景干扰, 尤其是  $3f$  和  $4f$  由于背景的干扰已经很难分辨出真实信号, 这在实际的应用中必然会带来很大的误差. 通过背景噪声放大 1.4 倍, 可以计算出相移  $\delta$  为  $36^\circ$ , 和直接测量的相移相差不大, 说明了本文给出的理论分析是正确的.

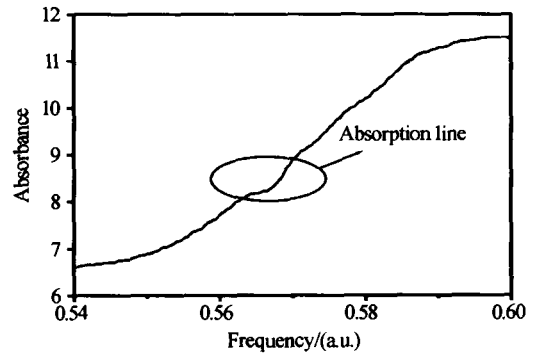


图 3 30 Pa 的气压下甲烷  $2\nu_3$  带 R9 支吸收带中 F1, F2 的叠加线

Fig. 3 The unresolved F1, F2 lines of  $2\nu_3$  band R9 manifold of methane at the pressure of 30 Pa

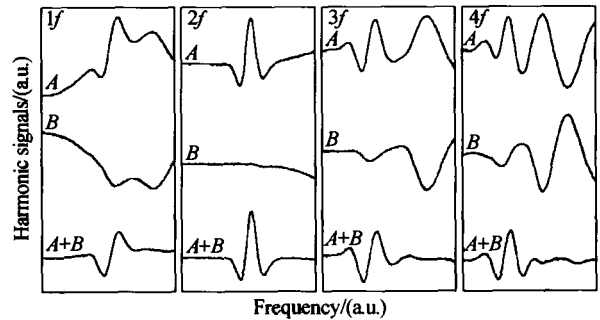


图 4 未消除背景和消除背景后的  $1f \sim 4f$  谐波信号比较  
Fig. 4 The comparisons of uneliminated background and the eliminated background of  $1f \sim 4f$  harmonic signals

### 4 结论

消除利用谐波探测技术提高微量气体浓度高灵敏检测中背景噪声对测量结果的影响, 不仅可以提高探测的灵敏度, 也为从理论上分析谐波信号消除了干扰. 本文利用在相同的电压扫描下, 频率调谐和背景起伏存在的相位差, 给出了一种简单实用的消除谐波信号背景干扰的技术. 这必将对高灵敏污

染气体检测装备的小型化和灵敏度提供强有力的技术支持.

#### 参考文献

- 1 Arroyo M P, Hanson R K. Absorption measurements of water-vapor concentration, temperature, and line-shape parameters using a tunable InGaAsP diode laser. *Appl Opt*, 1993, **32**(30): 6104~6116
- 2 Arroyo M P, Langlois S, Hanson R K. Diode-laser absorption technique for simultaneous measurements of multiple gasdynamic parameters in high-speed flows containing water vapor. *Appl Opt*, 1994, **33**(15): 3296~3307
- 3 Baer D S, Hanson R K, Newfield M E, *et al.* Gopaul Multiplexed diode-laser sensor system for simultaneous H<sub>2</sub>O O<sub>2</sub>, and temperature measurements. *Opt Lett*, 1994, **19**(22): 1900~1902
- 4 董磊, 马维光, 尹王保, 等. 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. *光子学报*, 2005, **34**(4): 489~492  
Dong L, Ma W G, Yin W B, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 489~492
- 5 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
- 6 Dharamsi A N, Shea P C, Bullock A M. Reduction of effects of Fabry-Perot fringing in wavelength modulation experiments. *Appl Phys Lett*, 1998, **72**(24): 3118~3120
- 7 Dharamsi A N, Bullock A M. Measurements of density fluctuations by modulation spectroscopy. *Appl Phys Lett*, 1996, **69**(1): 22~24

## A New Technique for Eliminating the Effect of Background Energy Fluctuation on the Harmonic Signals of Wavelength Modulation Spectroscopy

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

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

Received date: 2004-04-30

**Abstract** When the voltage of the PZT on the back mirror of the ECDL is scanned, there exists a phase difference of the frequency variation and the background energy variation. It is realized that the absorption signal and background signal can be obtained separately at the same detector by use of the upper laser character and a lock in amplifier. A better 1f-4f harmonic signals can be obtained. If the phase difference doesn't exist, the background harmonic signal cannot be eliminated. It is very important for setting up a miniature high sensitivity gas sensor.

**Keywords** Applied optics; Eliminating the background fluctuation of harmonic signals; Phase sensitivity detection; Phase difference



**Ma Weiguang** was born in Sep. 1976. He received his bachelor degree of theoretical physics from Shanxi University in 2000. Now he is pursuing his doctor degree there. His research interests are laser spectroscopy and the detection of trace gas.