

信号处理改善波长调制光谱灵敏度的实验研究^{*}

邵 杰^{1)†} 高晓明^{1)‡} 袁恽谦¹⁾ 杨 2) 曹振松^{1)‡} 裴世鑫²⁾ 张为俊²⁾

¹⁾中国科学院安徽光学精密机械研究所国家八六三计划大气光学重点实验室,合肥 230031)

²⁾中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光谱学实验室,合肥 230031)

(2004 年 12 月 10 日收到,2005 年 1 月 25 日收到修改稿)

基于可调谐半导体激光吸收光谱,提出了一种新的信号处理方法用于提高吸收光谱测量的灵敏度. 研究结果表明:采用信号处理(DSP)可以使波长调制光谱的信噪比提高一个数量级,且测量 CO₂ 分子的时候发现一条新谱线. 这些信号处理包括多次平均、数字低通滤波以及最小二乘法拟合. 由于该方法不需要增加设备的复杂性,所以比其他噪声抑制技术更容易在实验中实施、有更实际的应用价值.

关键词:波长调制,信号处理,半导体激光器,吸收光谱

PACC:0765G,4225B,4280,4260F

1. 引 言

可调谐二极管激光器吸收光谱是灵敏度高、选择性好、响应时间快的一种痕量气体分析方法之一^[1]. 同时由于最近几年光通讯的迅速发展,使得半导体激光器性能稳定可靠、易调谐、价格适中等特点,因此作为近年来发展起来的一种新型的激光光谱分析法,已经被广泛应用于环境检测、大气科学、痕量分析、光谱测量等领域^[2-5],结合波长调制技术的探测极限可以达到 10⁻⁶—10⁻⁷的吸收单位^[6].

虽然原理上认为波长调制光谱仅仅受量子噪声源的制约,而实际上同时也受其他干扰噪声的影响,如:电子噪声、残余振幅调制^[7]、激光超噪声、标准具干涉效应等^[8]. 目前有各种各样的实验技术用来抑制这些噪声源,如:采用差分电路^[9]、振动^[10]、高次谐波探测^[11]等. 然而数字信号处理技术在这方面受到很少关注. 由于快速数据采集系统的发展以及不昂贵的个人计算机结合适时数字信号处理技术,使可调谐半导体激光光谱仪的灵敏度进一步提高成为可能.

本文讨论了把 DSP(多次平均、数字带通滤波以及最小二乘法拟合)应用到波长调制光谱技术中,发

现波长调制吸收光谱的二次谐波信号灵敏度大大提高,同时选择合适的调制频率使得光谱分辨率也大大提高. 而且利用该技术提高波长调制灵敏度有易实施、易更新、不需要增加或改动设备等优点,不失为一种简单、高效的方法.

2. 波长调制原理

光通过介质时部分被吸收,由于气体分子的吸收对光谱具有选择性,而且与吸收系数、物质的浓度、通过吸收介质的长度有关,在没有饱和的弱吸收情况下其透过光强满足 Beer-Lambert 法则^[12-15]:

$$I(\nu) = I_0 e^{-\alpha l}, \quad (1)$$

其中 I_0 , I 分别为激光输入光强和透射光强, σ 为气体样品的吸收截面, L 为吸收样品的光学长度, ρ 为样品的密度.

当激光发射波长在中心波长 ν_0 处以调制频率 ω_m 进行调制时,则激光发射波长的瞬时频率为 $\nu = \nu_0 + \delta\nu \cos(\omega_m t)$, $\delta\nu$ 为调制振幅,则通过吸收滞后的激光强度可以表达成余弦 Fourier 级数:

$$I(\nu, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\nu) \cos(n\omega_m t), \quad (2)$$

上式中的 A_n (对 $n > 0$) 是不同谐波成份,它可

^{*} 国家高科技发展计划激光技术领域基金(批准号 2002AA825100)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: shaojie@aiofm.ac.cn

以通过锁相放大器来进行测量,

$$A_n(\nu) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} I_0(\nu + \delta \cos \theta) e^{[-\alpha \nu + \delta \nu \cos \theta] L \rho} \cos(n\theta) d\theta, \quad (3)$$

这里 $\theta = \omega_m t$. 在吸收很小的情况下 ($\rho L \sigma \ll 1$), 并把 $\alpha(\nu)$ 进行 Taylor 展开后^[12], 上式可以写成:

$$A_n(\nu) = -\frac{I_0 S \rho L 2^{1-n}}{n!} \delta^n \nu \frac{d^n \chi(\nu)}{d\nu^n} \Big|_{\nu=\nu_0}, \quad (4)$$

这里 $\sigma = S\chi(\nu)$, 其中 S 为吸收线强, $\chi(\nu)$ 为面积归一化的吸收线型.

从(4)式可以看出谐波成分与样品的浓度、吸收线强以及吸收长度成正比, 所以人们常常用这种方法来探测气体样品的浓度. 同时可以看出 n 次谐波成分与线型 $\chi(\nu)$ 的 n 阶导数成正比, 这就是通常所说的波长调制光谱, 也有人称为导数光谱. 对气体工作物质, 主要有碰撞引起的均匀加宽(Lorentz 线型)和分子热运动引起的 Doppler 非均匀加宽(Gauss 线型).

在较低气压下 Doppler 加宽占主要作用, 此时吸收的线型为归一化的 Gauss 线型函数^[11,13]:

$$\chi_G(\nu) = \frac{1}{\gamma_D} \sqrt{\ln 2 / \pi} e^{-\ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\gamma_D} \right)^2}, \quad (5)$$

$$\gamma_D = 3.58 \times 10^{-7} \times \nu_0 \sqrt{T/M}, \quad (6)$$

χ_G 为 Gauss 归一化线型函数. γ_D 是 Doppler 线型下的半高宽, ν_0 为吸收线的中心频率, T 和 M 分别是 Kelvin 温度和分子量. 把式(5)分别带入式(4), 可以得到二次谐波信号:

$$S_G^2(\nu) = -\eta \frac{I_0 S \rho L}{2\gamma_D^5} \ln 2 e^{-\ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\gamma_D} \right)^2} \times [\gamma_D^2 - 2\ln 2 (\nu - \nu_0)^2] \delta^2 \nu. \quad (7)$$

3. 实验装置

实验装置如图 1 所示, 该装置的主要目的是用来研究高分辨、高灵敏度的气体吸收光谱以及痕量气体分析. 图中采用的 White 型多通池基长为 8m, 最大有效光程可达 1097m; 池内温度可以在 $-56.5 \sim +96^\circ\text{C}$ 之间进行控制, 且池体温度的均匀性优于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$; 池体内部可维持 10^{-9} Pa 以上的高真空. 为了避免其他气体的干扰, 我们在进行实验前把多通池多次抽真空 (2.4×10^{-4} Pa 以下) 后, 然后用 99.99% 纯 CO_2 冲洗多通池, 最后再抽真空. 本实验中采用的光源为连续可调的 DFB 二极管激光器,

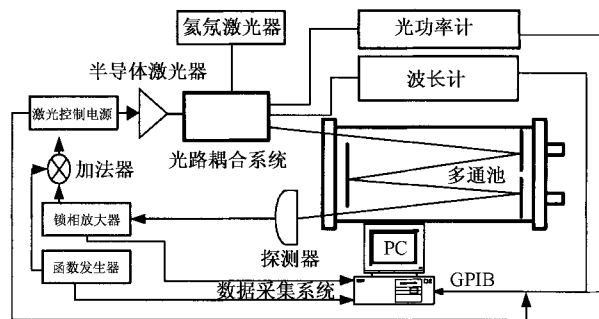


图 1 实验框架图

调谐范围为 $7590 \sim 7620 \text{cm}^{-1}$, 该激光器中心发射波长为 $1.315 \mu\text{m}$, 边模抑制比 30dB, 发射线宽 2MHz, 此发射线宽与气体的吸收线宽 (GHz 以上) 相比可以忽略不计. 该激光器的温度和电流由 TDS3724B 半导体激光电源控制, 该激光器的电流与波长的变化关系约为 $0.017 \text{cm}^{-1}/\text{mA}$, 而激光控制电源的精度为 0.01mA . 激光器输出的约 10% 输入到波长计中用以检测激光的发射波长, 10% 输入到光功率计中用以检测激光的输出功率变化, 剩余的大部分光输入到长程多通池中用以吸收测量, 然后用一个 InGaAs 探测器检测透过多通池的光信号. 透过信号最后被送到一个锁定放大器中解调, 解调信号用安装有数据采集卡的个人计算机进行采集, 采集的信号用 LabWindows/CVI 编辑的程序进行分析. 在实验过程中, 我们通过计算机的 GPIB 接口控制激光电源改变激光器的温度和驱动电流以实现扫描和调制激光发射波长, 同时锁相放大器的解调信号由数据采集卡进行控制采集.

在本实验中为了增加系统的灵活性、抗震动性, 我们对原有系统光路^[14]做了几点重要的改进: 用光纤耦合器来取代原来的透镜组组成的光耦合系统; 同时为了避免光耦合系统的光反射到激光器内而造成激光功率的不稳定, 在光纤耦合器与光纤准直器之间增加一个光纤隔离器.

在使用 DFB 二极管激光器扫描激光波长时, 我们通过一个函数发生器产生一个锯齿波电压信号, 给激光控制电源提供外加扫描电压来扫描激光波长. 为了便于信号处理, 函数发生器在扫描激光波长的同时让函数发生器产生同步 TTL 信号给数据采集卡提供触发信号, 如图 2 所示. 高电平时数据采集卡采集的信号有效, 这样就可以保证每个周期内的采集信号准确重复, 为使用多次平均采集信号平均提供准确地可重复性.

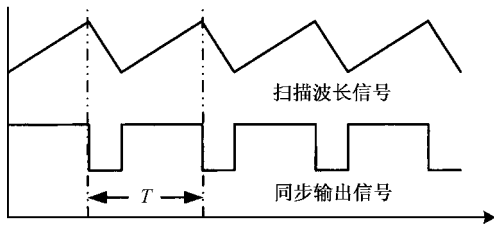


图2 函数发生器同步信号

4. 实验结果分析

为了说明信号处理对波长调制光谱信号的改善效果,我们的实验结果全在同一条件所得.光程为850m、多通池压力为60Pa时纯CO₂、锁相放大器的调制频率和调制振幅分别为1.429kHz和38mV,激光控制器的温度和中心电流分别为28℃和70mA时的二次谐波探测的实验结果.同时我们为了说明我们实验系统的高灵敏度,我们特意从HITRAN数据库选择了两条十分弱的吸收谱线.这两条谱线是41113—01101带中R24,R25两条吸收谱线,从

HITRAN数据库可查出相应吸收的中心位置分别为7600.473738cm⁻¹,7600.577018cm⁻¹,吸收强度分别为 1.081×10^{-26} 和 1.141×10^{-26} cm⁻¹(molecule × cm⁻²)(见HITRAN数据库).

图3中(a)为在一个波长扫描周期内的单次信号(c)为同一波长扫描范围内100次扫描平均的结果.图3中实线为根据公式(7)用最小二乘法拟合多峰结果,最后根据信号振幅与拟合后的残余噪声振幅的比值求出图3中(a)(c)的信噪比分别为1.69与24.从信噪比结果可以看出,100次平均信号得到的信噪比比单次采集信号的信噪比高14倍.

为了进一步提高信噪比、以及弄清滤波对信噪比的影响,我们对单次采集信号和多次平均信号进行了滤波,图3中(b)(d)分别对应图3中的(a),(c)的滤波.图3中实线为采用二次谐波理论公式多峰最小二乘法拟合结果,最后根据信号振幅与拟合后的残余振幅噪声的比值得出图3中(b)(d)的信噪比分别为4.7与62.结果表明滤波同样能改善信噪比,同时从图3中(b)(d)可以看出低通滤波对高频白噪声有很好的抑制.

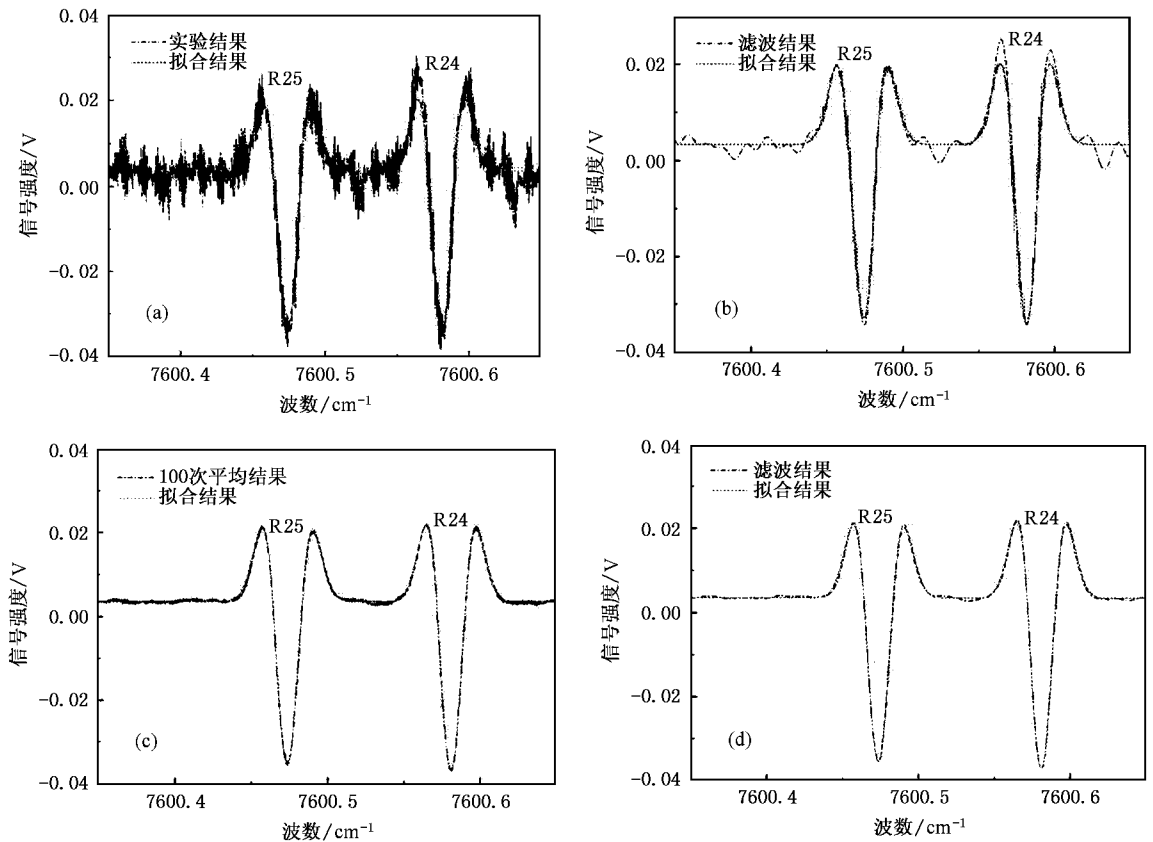


图3 不同信号处理结果

从以上的结果可以看出,在相同条件下仅仅采用多次平均可以使信噪比提高 14 倍左右,仅仅采用数字滤波仅仅使信噪比提高不到 3 倍,如果把多次平均和数字滤波结合起来可以使信噪比提高 37 倍左右.同时可以看出采用数字滤波的方法可以使高频的白噪声明显的降低,而多次平均对由于激光功率的不稳定性带来的基线不平坦噪声很好地抑制,因此把这两种信号处理技术应用到波长调制吸收光谱中使得信噪比大大的提高,相应的灵敏度也得到了大大的改善.

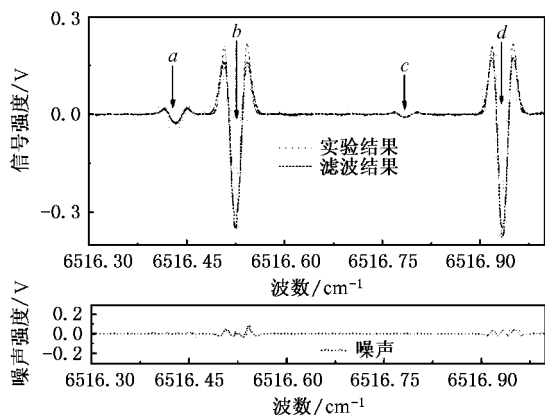


图 4 598.5Pa 压力下通过波长调制光谱技术观测到的纯 CO₂ 的 4 段谱线

为了更能说明利用上述的信号处理提高信噪比的能力,我们用中心发射波长为 1.52 μm 的 DFB 半导体激光器进行了 CO₂ 气体的波长调制实验,实验结果如图 4. 该实验结果是在光程长为 479m、压力为 532Pa 的纯度为 99.99% 的 CO₂ 进行了直接吸收的实验,图 4 中的虚线为在一个波长扫描周期内的 100 次平均的二次谐波吸收信号,实线为最小二乘法的多谱线拟合结果.其中激光电源的控制温度设置在 15 $^{\circ}\text{C}$ 、中心电流设置在 70 mA,锯齿波的扫描电压为 $\pm 0.75\text{ V}$. 从图中可以看出有 4 段谱线,而从最新的 Hitran2004 数据库中查出这段谱线只有 3 条谱线,分别对应图 4 中的 *a*, *b*, *d*. 其中吸收峰 *a*, *b*, *d* 对应的位置和强度分别为 6516.435635 cm^{-1} , 6516.528404 cm^{-1} , 6516.955998 cm^{-1} , 对应的强度分

别为 $8.084 \times 10^{-27} \text{ molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$, $1.02 \times 10^{-25} \text{ molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$, $1.075 \times 10^{-25} \text{ molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$. 其中图 4 中谱线 *a* 是 CO₂ 在 40011—10001 泛频带的 P20;而谱线 *b*, *d* 分别是 CO₂ 在 31111—01101 泛频带的 P24, P23. 可是谱线 *c* 在最新的 Hitran2004 数据库中还没有发现这条谱线,通过最小二乘法拟合的结果我们可以得到这条谱线的位置和强度分别为 6515.78501 cm^{-1} , $2.54 \times 10^{-27} \text{ molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$.

通过采用波长调制技术与数字信号处理技术结合起来,我们对 CO₂ 在 1.53 μm 附近的弱谱带的谱线测量结果可以看出信噪比大大提高.在此较低的气压下我们已经测量 $\sim 10^{-27} \text{ molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$ 强度量级的吸收谱线,如 CO₂ 在 40011—10001 泛频带的 P20,并同时发现了一条强度为 $2.54 \times 10^{-27} \text{ molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的新谱线.我们的多通池光程长可以达到千米,如果再增加光程长度、把数字 DSP 技术同波长调制技术结合起来可以测量更低强度的吸收谱线,在低气压下我们可以测量谱线的极限强度到 $\sim 10^{-28} \text{ molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$,这使我们这套设备作为光谱分析、以及高灵敏度探测、气体同位素分析成为可能.

5. 结 论

总之,通过把多次平均、数字带通滤波以及最小二乘法拟合等几种信号处理技术成功地应用到波长调制光谱中,使波长调制吸收光谱的探测灵敏度大大的提高.从实验结果可以看出应用信号处理技术使信噪比增加一个多数量级,并发现了一条最新 Hitran2004 数据库没有的谱线,同时可以看出我们的波长调制光谱系统具有非常高的灵敏度,为以后的光谱分析、同位素含量探测提供了基础.数字信号处理不需要增加辅助设备就可以抑制波长调制光谱信号的噪声,且可以很容易适应变化的实验条件,因此信号处理的方法可以应用到不同的光谱探测方法中以降低随机白噪声以及激光功率不稳定带来的噪声.



- [1] Jean-Christophe Nicolas , Alexei N *et al* 1998 *Applied Optics* **37** 7906
- [2] Shao J , Gao X M , Deng L H *et al* 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1908
- [3] Shao J , Zhang W J , Gao X M *et al* 2005 *Chin. Phys.* **14** 482
- [4] Reid J , Garside B K and Ballik E A 1978 *Appl. Opt.* **17** 300
- [5] Uehara K , Yamamoto K , Kikugawa T *et al* 2001 *Sensors and Actuators B* **74** 173
- [6] Gustafsson J and Axner O 1998 *Spectrochimica Acta Part B* **53** 1827
- [7] Haris R , Clinton B C , Russell E W *et al* 1994 *OPTICS LETTERS* **19** 144
- [8] Zhu X and Cassidy D T 1995 *Applied Optics* **34** 8303
- [9] Liger V V 1999 *Spectrochimica Acta Part A* **55** 2021
- [10] Gustafsson J , Chekalin N and Axner O 2003 *Spectrochimica Acta Part B* **58** 123
- [11] Dharamsi A N 1996 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **29** 540
- [12] Edwards C S , Barwood G P *et al* 2001 *Meas. Sci. Technol.* **12** 1214
- [13] Shao J , Gao X M , Zhang W J *et al* 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 57
- [14] Wei H L , Wu C J and Gong Z B 2002 *High Power Laser and Particle Beams* **14** 35 (in Chinese] 魏合理、邬承就、龚知本 2002 强激光与粒子束 **14** 35]
- [15] Hu S M , He S G , Ling H *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1435 (in Chinese] 胡水明、何圣贵、林海等 2000 物理学报 **49** 1435]

Experimental research on the sensitivity of wavelength modulation by signal processing^{*}

Shao Jie^{1,2)†} Gao Xiao-Ming^{1,2)} Yuan Yi-Qian¹⁾ Yang Yong²⁾
Cao Zhen-Song^{1,2)} Pei Shi-Xin²⁾ Zhang Wei-Jun²⁾

¹⁾ *Laboratory of Atmospheric Optics , Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics , Hefei 230031 , China)*

²⁾ *Environmental Spectroscopy Laboratory of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Hefei 230031 , China)*

(Received 10 December 2004 ; revised manuscript received 25 January 2005)

Abstract

We present a signal-processing system developed for enhancing the sensitivity of absorption measurement based on tunable diode laser wavelength modulation spectroscopy. A signal-to-noise ratio enhancement of an order of magnitude was observed when digital signal-processing algorithms were applied to wavelength modulation spectrometers in the near-infrared at the same time a new spectra was found by observation of CO₂ near 1.53 μm. These algorithms include digital low-pass filters , multiple averages , and a least squares fit. Digital signal processing has a practical advantage over other noise suppression techniques because it is easy to implement and adapt able to all experiments.

Keywords : wavelength modulation , digital signal process , diode laser , absorption spectroscopy

PACC : 0765G , 4225B , 4280 , 4260F

^{*} Project supported by the National Higher Technology Development Programme of China (Grant No. 2002AA82510).

[†] Corresponding author. E-mail : shaojie@aiofm.ac.cn