

波长调制光谱测量系统中的数字化相敏检测实现

李 晗^{1,2} 刘建国¹ 阚瑞峰¹ 姚 路¹ 许振宇¹ 陈玖英¹ 袁 松¹ 魏 敏¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提取淹没在噪声中的弱吸收信号,对波长调制光谱测量中的相敏检测技术进行研究,提出了一种数字化相敏检测实现方案。采用正交向量型结构实现相敏检测过程,通过硬件电路设计和上位机程序编写,完成吸收信号谐波分量的获取。对空气中的 O₂ 进行检测,针对 O₂ 位于 764 nm 附近的一对吸收谱线,成功提取了吸收信号的二次谐波分量。结果显示,系统的检测极限体积分数为 0.50% (光程为 1 m)。

关键词 光谱学;信号处理;可调谐半导体激光吸收光谱;波长调制;相敏检测;二次谐波信号

中图分类号 TN247; O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1115001

Implementation of Digital Phase-Sensitive Detection in Wavelength Modulation Spectroscopy Measurement System

Li Han^{1,2} Liu Jianguo¹ Kan Ruifeng¹ Yao Lu¹ Xu Zhenyu¹ Chen Jiuying¹
Yuan Song¹ Wei Min¹

(¹ Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to detect weak absorption signal overwhelmed in noise, phase-sensitive detection technique used in wavelength modulation spectroscopy system is studied, and a design scheme for digital phase-sensitive detection is presented. An algorithm of orthogonal vector structure is analyzed, and then the extraction of harmonic component is realized by hardware circuit design and computer software programming. The experiment is carried out for the measurement of O₂ in open air by scanning two absorption lines of O₂ near 764 nm, and the second-harmonic signal is successfully extracted. The result shows that the detection limit for volume fraction of the system is 0.50% (with the optical path of 1 m).

Key words spectroscopy; signal processing; tunable diode laser absorption spectroscopy; wavelength modulation; phase-sensitive detection; second-harmonic signal

OCIS codes 300.1030; 300.6260; 300.6340

1 引 言

可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)是一种重要的高灵敏痕量气体检测技术,它利用半导体激光器的波长调谐特性,通过电流控制波长扫描获得被测气体特征吸收光谱,从而实现痕量气体的测量。TDLAS 技术被广泛应用于环境监测^[1-2]、工

业生产控制^[3-4]和生物医疗^[5]等领域。波长调制光谱(WMS)技术作为 TDLAS 的一种常用技术,在实际中应用较多。采用波长调制光谱技术进行气体测量时,需要利用相敏检测原理对吸收信号的谐波分量进行提取,用于气体浓度的反演^[6-8]。因此,研究波长调制光谱测量中的相敏检测技术,对于气体监

收稿日期: 2013-06-05; 收到修改稿日期: 2013-07-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(61205151)、国家自然科学基金(61108034)、中国科学院先导专项(XDA05040102)

作者简介: 李 晗(1987—),女,硕士研究生,主要从事光电探测与信号处理方面的研究。E-mail: hanleehanlee@126.com

导师简介: 刘建国(1968—),男,研究员,主要从事环境污染光学监测新技术、目标散射特性和遥感监测技术等方面的研究。E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn(通信联系人)

测有着重要意义。

本文提出了一种数字化相敏检测实现方案。采用正交矢量型结构实现相敏检测过程,利用硬件电路实现信号数字化、数据采集传输,通过上位机程序完成相敏检测提取谐波分量。利用设计的系统对空气中的 O_2 进行实时探测,并给出了系统的检测极限。

2 波长调制光谱中的相敏检测原理

图 1 为波长调制光谱技术实验原理图。在激光器的驱动电流上加慢变的扫描信号和一个快变的调制信号对激光器的输出波长进行调制。在光束通过样品池经样品气体吸收后,输出光被光电探测器接收。探测器将携带气体吸收信息的光信号转换为电信号,再利用相敏检测原理由锁相放大器进行谐波检测,解调并放大后的信号被送到计算机进行后续处理和分析。

波长调制光谱中,吸收信号的每个谐波分量幅度直接与痕量气体的浓度成正比^[9-11]。在实际应用中,

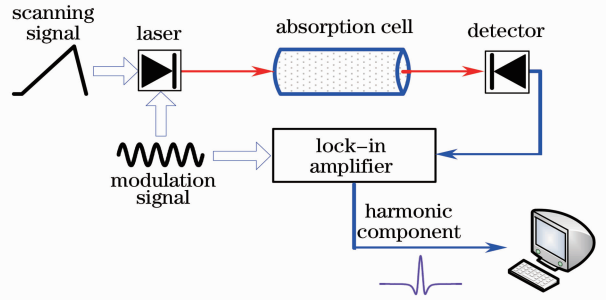


图 1 波长调制光谱技术实验原理图
Fig. 1 Experimental schematic of wavelength modulation spectroscopy

通常选择二次谐波分量作为检测信号。利用相敏检测原理进行二次谐波提取,用于气体浓度的反演。

相敏检测技术^[12]是微弱信号检测中的一种常用技术,利用信号相关性和噪声随机性的特点对有用信号进行提取。相敏检测系统由信号通道、参考通道、相敏检测器(PSD)和低通滤波器(LPF)等组成。本文采用正交矢量型结构实现相敏检测,有两路正交参考信号,基本结构如图 2 所示。

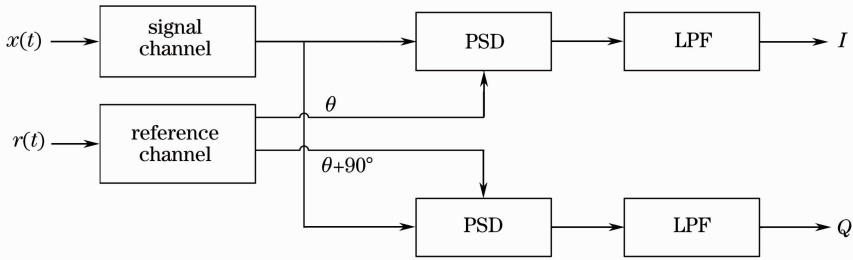


图 2 正交矢量型相敏检测系统的基本结构
Fig. 2 Orthogonal vector structure of phase-sensitive detection

设被测信号为

$$x(t) = V_s \cos(\omega_0 t). \quad (1)$$

两路参考信号均与被测信号同频,在相位上相差 90° ,假设相移分别为 θ 和 $\theta + 90^\circ$,则参考信号可表示为

$$r_1(t) = V_r \cos(\omega_0 t + \theta), \quad (2)$$

$$r_2(t) = V_r \sin(\omega_0 t + \theta). \quad (3)$$

被测信号 $x(t)$ 与参考信号 $r_1(t)$ 送入相敏检测器,输出 $u_p(t)$ 是两路输入信号的乘积,即

$$u_p(t) = x(t)r_1(t) = V_s \cos(\omega_0 t)V_r \cos(\omega_0 t + \theta) = 0.5V_s V_r \cos \theta + 0.5V_s V_r \cos(2\omega_0 t + \theta), \quad (4)$$

式中,结果的第一项为乘积的差频分量,第二项为和频分量。

$u_p(t)$ 经过低通滤波器后,(4) 式中频率为 $2\omega_0$ 的和频分量被滤除,低通滤波器通带之外的噪声也被滤除,输出为

$$I = 0.5V_s V_r \cos \theta. \quad (5)$$

由(5)式可知,单路相敏检测的输出 I 正比于 V_s 、 V_r 和 $\cos \theta$ 。 $\theta = 0$ 时, I 最大。当参考信号的 V_r 和 θ 已知时,就可以得到被测信号幅度 V_s 。但由于输出 I 正比于 $\cos \theta$, θ 的测量误差会直接传递为被测信号幅度 V_s 的测量误差,对单路相敏检测的测量准确性造成很大影响,而正交双通道结构可以避免这个问题^[12]。

同理,正交的另一路输出为

$$Q = 0.5V_s V_r \sin \theta. \quad (6)$$

由(5),(6)式可以计算出被测信号的幅度和相位为

$$V_s = \frac{2}{V_r} \sqrt{I^2 + Q^2}, \quad (7)$$

$$\theta = \arctan(Q/I). \quad (8)$$

由(7)、(8)式可以看出,与单路相敏检测输出相比,正交矢量型相敏检测系统可以同时获得被测信号的幅度与相位信息,且得到的被测信号幅度 V_s 与 θ 无关,避免了对参考信号做可变移相以及移相对

测量准确性的影响,能够达到更好的测量效果。

3 系统设计方案

针对波长调制光谱测量系统设计数字化相敏检测系统,整体框图如图 3 所示。

数字化相敏检测系统主要包括硬件电路和上位机程序两个部分。硬件电路以现场可编程门阵列(FPGA)为核心,利用 FPGA 产生调制信号加到激光

器上,激光器发出的光经过一段光路气体吸收后,被探测器接收。探测器接收到的模拟信号经过调理后,通过模数转换器(A/D)转换为数字信号,送入 FPGA;FPGA 利用双口随机存储器(RAM)对接收到的数字信号进行缓存,再通过通用异步收发传输器(UART)模块向上位机串行传送数据;上位机用 Matlab 软件对接收到的数据进行处理、运算,用正交双通道结构实现相敏检测,完成谐波分量的提取。

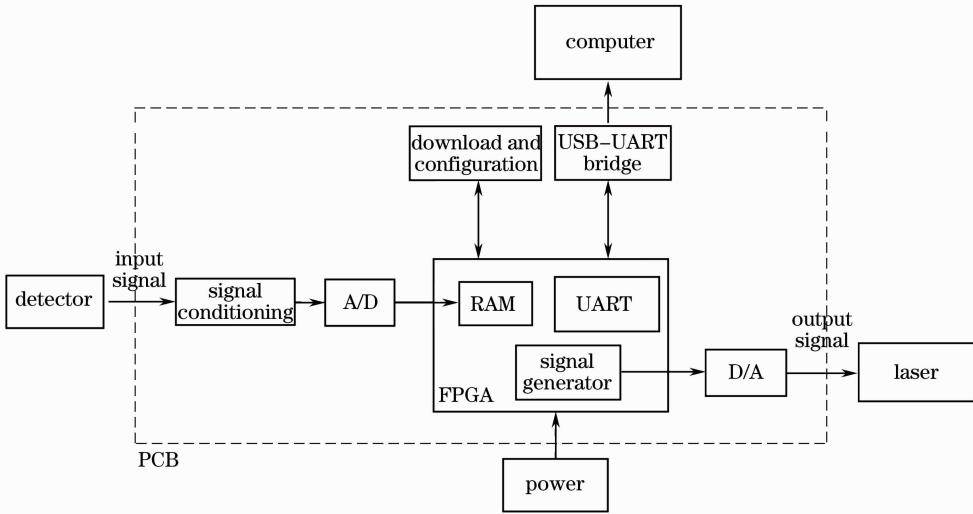


图 3 系统整体设计框图

Fig. 3 Designed block diagram of the integrated system

3.1 硬件电路设计

系统的硬件电路包括信号调理与 A/D 转换部分、数据采集与传输部分、调制信号产生部分。

探测器输出的信号送入电路板(PCB),首先对其调理,进行两级前置放大和低通滤波操作,调理为适合 A/D 芯片处理的信号后再进行 A/D 转换。A/D 芯片选用 LTC2203,最高采样速率可达 $2.5 \times$

10^7 s^{-1} ,内部采用五级流水线结构,16 位并行数据输出。本文采用 $1.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 采样速率,FPGA 提供 LTC2203 时钟控制信号控制 A/D 转换。另一方面,LTC2203 转换后的数据传送给 FPGA 进行处理。

数据的采集与传输部分以 FPGA 为核心,FPGA 芯片选用 Altera 公司的 Cyclone II 系列 EP2C8Q208C8。FPGA 的逻辑设计模块图如图 4

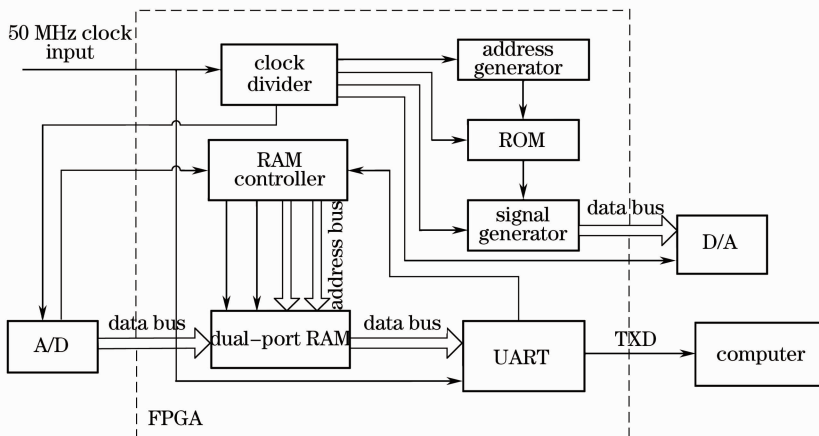


图 4 FPGA 逻辑设计模块图

Fig. 4 Block diagram of FPGA programming

所示,其功能包括:1) 对外部晶振提供的 50 MHz 系统时钟进行分频,为其他模块工作提供时钟;2) 在 FPGA 中构建双口 RAM,将 A/D 转换后的数据进行缓存,保证传输速率匹配;3) 进行数据并串转换、格式变换,利用 USB-UART 接口将数据发送至上位机;4) 利用片内只读存储器(ROM)产生正弦调制信号,结合简单运算,叠加上锯齿扫描信号后输出。图 4 中 TXD 指发送数据。

FPGA 生成的数字扫描调制信号通过 LTC1668 芯片进行 D/A 转换,转换为模拟电流信号,再通过 LT1809 转换为电压信号后加到激光器上。LTC1668 是一款 16 位、 $5.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 差分电流输出 D/A 转换器。本文中,采用 $1.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 的转换速率,FPGA 提供 LTC1668 时钟输入信号,控制 D/A 转换。最终将电压信号作为扫描调制信号通过控制板加至可调谐半导体激光器,使激光器的波长发生扫描和调制。通过改变 FPGA 程序,可以调节信号的频率和幅度,以满足不同应用需求。

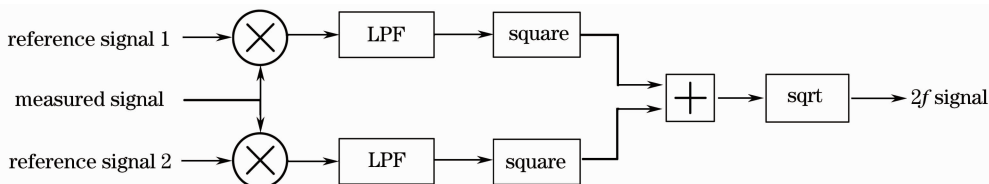


图 5 Matlab 中实现相敏检测的原理图

Fig. 5 Schematic diagram of phase-sensitive detection with Matlab

被测信号分别与两路参考信号相乘,再送入低通滤波器,滤除和频分量和高频噪声,得到与 $2f$ 信号成正比的差频直流分量。构建低通滤波器时选用巴特沃斯滤波器,设定合理的滤波器归一化通带、阻带截止频率,文中分别以波长调制系统中锯齿波、正弦波的频率为标准设定。设置通带最大衰减为 1 dB,阻带最小衰减为 50 dB。利用 buttord() 函数计算出巴特沃斯滤波器的阶数和截止频率,再利用 butter() 函数设计出巴特沃斯滤波器的系数,最后利用 filter() 函数实现滤波器。

对低通滤波后的两路数据进行平方、求和、开方运算,就可以得到最终的 $2f$ 信号,实现对二次谐波分量的提取。对 $2f$ 信号进行作图,并输出其峰值。

4 实验结果与分析

完成数字化相敏检测系统的设计后,搭建实验平台,进行验证。实验平台由可调谐半导体激光器、激光器控制板、探测器、硬件电路和上位机组成,如图 6 所示。

3.2 上位机程序设计

上位机通过 Matlab 编程实现串行通信和相敏检测。

利用 Matlab GUI 编程,设计简单的串口操作界面,对串口打开和关闭进行控制。设备控制箱中的 serial 类及 instrcallback() 回调函数,进行实时串行通信。本文采用中断方式对串口进行控制实现串行通信,实时处理下位机传送的数据。在 instrcallback() 回调函数中,设置具体的串行通信事件。实时接收 FPGA 发送的串行通信数据,每接收到两个锯齿扫描周期的数据时,触发中断事件,调用回调函数。回调函数对数据进行整合和截取,提取一个扫描周期内的有效数据作为被测信号,进行相敏检测处理。

相敏检测的实现采用正交矢量型结构,如图 5 所示。两路参考信号在 Matlab 中生成,频率为调制正弦波的 2 倍,相位相差 90° 。

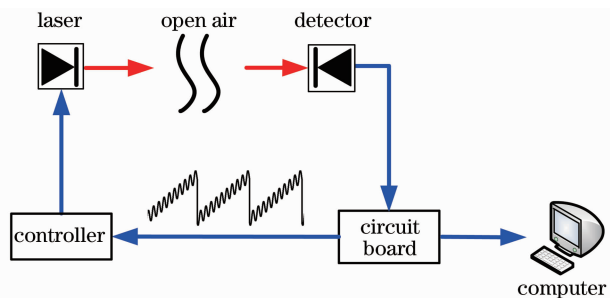


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup

采用近红外可调谐半导体激光器作为光源,通过控制板实现对激光器电流和温度的控制。首先,由设计的电路板产生正弦和锯齿叠加信号,经过控制板加至激光器,调节温度控制使激光器工作在合适的波长范围;激光器产生的激光经准直后通过待测气体,然后被光电探测器接收;探测器接收到的包含吸收信息的光信号被转换为电信号送入电路板,对其进行调理后转换为数字信号,经过 FPGA 缓存、转换,传送至上位机处理;上位机进行数据的实

时采集和相敏检测,提取二次谐波分量并输出。

4.1 O₂ 吸收的二次谐波分量

实验测量空气中 O₂ 的吸收情况,在短光程自由空气中进行测量。正弦调制信号频率设为 156.25 kHz,锯齿扫描信号频率为 1.22 kHz。光源选用 Nanoplus 公司生产的分布反馈(DFB)半导体激光器,中心波长为 764 nm,14 针蝶形封装。激光器控制板选用 Thorlabs 公司的 ITC102。实验测量信号的具体参数如表 1 所示。

光束通过光程为 53.5 cm 的自由空气后,由大面积硅探测器接收。虽然空气中的 O₂ 体积分数很高,达 20.95%,但由于 O₂ 在近红外的吸收线强度较弱,仅为 10⁻²⁴ 量级,且因在短光程下测量,所以用肉眼很难直接观察到 O₂ 的吸收信号。

选取 O₂ 位于 764.168 nm 和 764.280 nm 的一对吸收谱线,数据采集及处理过程如图 7 所示,每个扫描周期取 6000 个点的有效数据进行处理。可以看出,经过相敏检测,能够得到明显的吸收信号的二

次谐波分量,获取 O₂ 的吸收信息。

表 1 波长调制实验的信号参数

Table 1 Signal parameters for wavelength modulation tests

Parameter	Value
Ramp sweep frequency	1.22 kHz
Modulation frequency	156.25 kHz
Wavelength and current ratio	0.023 nm/mA
Ramp amplitude	400 mV (16 mA)
Wavelength range of scan	0.368 nm
Modulation depth (peak-to-peak)	134.15 mV (5.366 mA)
Modulation depth (in terms of laser wavelength)	0.062 nm

由实验结果可以看出,利用设计的数字化相敏检测系统,针对不同吸收,可以成功提取吸收信号的二次谐波分量。采用正交结构实现相敏检测,因为经过了开方运算,所以得到的结果是非负的,二次谐波的波形均在正半轴。

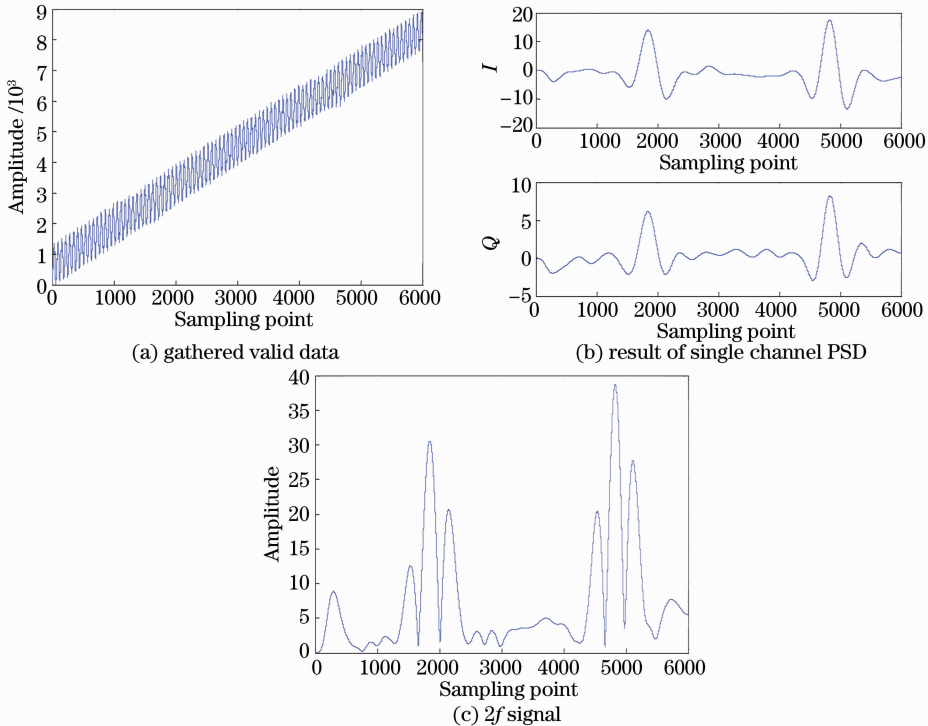


图 7 764.168 nm 和 764.280 nm 处 O₂ 的吸收谱线

Fig. 7 Absorption spectra of O₂ at 764.168 nm and 764.280 nm

4.2 系统检测极限

检测极限是系统可以检测出的最小响应对应的的气体浓度,它的值主要取决于噪声的大小。根据 Stutz 的理论^[13],取系统最小检测信号幅度等同于系统噪声幅度标准差的 3 倍时的信号值为检测极

限,即

$$S_{\text{limit}} = 3 \times \left[\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (\Delta n_{\text{innoise}} - \bar{\Delta n}_{\text{noise}})^2 \right]^{1/2}. \quad (9)$$

调制系数位于最优调制系数 2.2 附近时,对空气

中的 O_2 进行测量,提取二次谐波信号,将所得的噪声代入(9)式,得到 $S_{\text{limit}} = 1.9234$ 。在 TDLAS 系统中,二次谐波信号的峰值与待测气体浓度成正比,即^[14]

$$\frac{N_{\text{test}}}{V_{\text{test}}} = \frac{N_0}{V_0}, \quad (10)$$

其中 N_{test} 代表待测气体的浓度, V_{test} 代表待测气体的二次谐波信号峰值, N_0 为空气中的 O_2 浓度, V_0 是 53.5 cm 光程自由空气下提取出的 O_2 的二次谐波峰值。

已知空气中 O_2 的体积分数为 20.95%, 光程为 53.5 cm, 将二次谐波的峰值和计算出的 S_{limit} 值代入(10)式,可以得到 O_2 体积分数的检测极限为

$$N_{\text{limit}} = 0.93\%. \quad (11)$$

所以,对于本系统而言, O_2 体积分数的最低检测极限为 0.50% (光程为 1 m)。

5 结 论

分析了利用相敏检测技术提取二次谐波的基本原理,提出了一种数字化相敏检测实现方案。通过硬件设计和上位机程序编写,实现了数字化相敏检测。利用设计的相敏检测系统进行实验研究,测量了空气中 O_2 的吸收,验证了利用该系统提取二次谐波的可行性。对实验结果进行分析,得到了系统的检测极限体积分数为 0.50% (光程为 1 m)。该系统对波长调制光谱的吸收信号进行实时采集和处理,利用数字化方法实现相敏检测,有较好的灵活性,应用前景广阔,并且可为相敏检测系统的小型化实现提供一定参考。

参 考 文 献

- 1 D'Amato F, Lancia A, Werle P. Very precise measurement of carbon dioxide atmospheric concentration by using TDLs [C]. SPIE, 1996, 2834: 242-248.
- 2 Wang Guishi, Cai Tingdong, Wang Lei, *et al.*. Application of digital frequency locking techniques in real-time measurement of methane in atmosphere [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1008002.
王贵师, 蔡廷栋, 汪磊, 等. 基于数字频率锁定技术实时探测实际大气中甲烷浓度 [J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1008002.
- 3 Zhang Zhirong, Dong Fengzhong, Wang Yu, *et al.*. On-line

- monitoring of industrial toxic gases with a digital-control module [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(s1): s100304.
- 张志荣, 董凤忠, 王煜, 等. 基于数字控制模块的工业有毒气体在线监测仪 [J]. 光学学报, 2011, 31(s1): s100304.
- 4 X Liu, J B Jeffries, R K Hanson, *et al.*. Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature [J]. Appl Phys B, 2006, 82(3): 469-478.
- 5 S Svanberg. Laser based diagnostics-from cultural heritage to human health [J]. Appl Phys B, 2008, 92(3): 351-358.
- 6 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. Tunable diode laser absorption spectrometer monitors the ambient methane with high sensitivity [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(9): 1217-1220.
闾瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱法监测环境空气中甲烷的浓度变化 [J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1217-1220.
- 7 Cui Houxin, Qi Rubin, Chen Wenliang, *et al.*. Measurement of oxygen concentration using tunable diode laser absorption spectroscopy and wavelength modulation spectroscopy [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(10): 1558-1562.
崔厚欣, 齐汝宾, 陈文亮, 等. 可调谐激光波长调制技术检测氧气浓度 [J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1558-1562.
- 8 He Ying, Zhang Yujun, Zhu Anning, *et al.*. Open-path ammonia high sensitivity on-line monitoring in farmland based on laser techniques [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(s1): s100407.
何莹, 张玉钧, 朱安宁, 等. 开放式农田氨气的高灵敏激光在线监测 [J]. 光学学报, 2011, 31(s1): s100407.
- 9 P Werle. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors [J]. Spectrochimica Acta Part A, 1998, 54(2): 197-236.
- 10 J T C Liu, J B Jeffries, P K Hanson. Wavelength modulation absorption spectroscopy with $2f$ detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows [J]. Appl Phys B, 2004, 78(3-4): 503-511.
- 11 Liu Kun, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, *et al.*. Investigation of intra-cavity gas sensing technology based on wavelength modulation [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0105008.
刘琨, 刘铁根, 江俊峰, 等. 基于波长调制技术的内腔式气体传感研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0105008.
- 12 Gao Jinzhan. Detection of Weak Signals [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 154-170.
高晋占. 微弱信号检测 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 154-170.
- 13 Stutz Jochen, Platt U. Numerical analysis and estimation of the statistical error of differential optical absorption spectroscopy measurements with least-squares methods [J]. Appl Opt, 1996, 35(30): 6041-6053.
- 14 Tu Xinghua, Liu Wenqing, Wang Tiedong, *et al.*. Noise analysis of second-harmonic detection with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Chinese J Quantum Electronics, 2006, 23(4): 522-526.
涂兴华, 刘文清, 王铁栋, 等. 基于可调谐二极管激光吸收光谱学对二次谐波检测噪声分析研究 [J]. 量子电子学报, 2006, 23(4): 522-526.

栏目编辑: 史敏