

基于可调谐半导体激光吸收光谱的 小型化 C₂H₂ 测量系统

蒋利军¹, 邱选兵¹, 周庆红^{2,3}, 邵李刚¹, 杨雯¹, 魏计林¹, 李传亮¹, 马维光⁴

¹太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024;

²西南科技大学-中国工程物理研究院激光聚变研究中心极端条件物质特性实验室, 四川 绵阳 621010;

³西南科技大学理学院, 四川 绵阳 621010;

⁴山西大学激光光谱研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006

摘要 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术, 研制了一套近红外波段的乙炔(C₂H₂)气体检测系统, 该装置采用波长调制-多光程吸收光谱技术, 提高了系统的检测灵敏度; 为了优化系统测量条件, 在压强范围为 5.3~12.0 kPa 和调制幅度为 0.010~0.035 V 条件下, 测量了体积分数为 5×10^{-5} 的 C₂H₂ 标准气体的光谱信号, 并测量了不同浓度的 C₂H₂ 在总压强为 10.7 kPa 时的二次谐波信号; 为了进一步验证系统的稳定性, 采集 60 s 的光谱信号, 通过 Allan 方差分析获得了系统的最佳探测时间和探测极限。结果表明: 压强为 10.7 kPa 且调制幅度为 0.030 V 时的二次谐波信号强度最大; C₂H₂ 气体浓度与二次谐波幅值呈良好的线性关系, 并且 C₂H₂ 体积分数为 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$ 时的测量误差较小, 小于 $\pm 2\%$; 该实验系统的最佳探测时间为 7.2 s, 探测极限为 2.8×10^{-11} ; 该仪器采用基于嵌入式系统设计的激光器驱动和数字锁相放大器, 具有结构简单、体积小、便于集成等特点, 适用于工业现场和气体运输等方面。

关键词 光谱学; C₂H₂ 气体检测仪; 可调谐半导体激光吸收光谱; 波长调制-多光程吸收技术; 检测灵敏度; 小型化
中图分类号 O433 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP55.033002

Compact Acetylene Detecting System Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

Jiang Lijun¹, Qiu Xuanbing¹, Zhou Qinghong^{2,3}, Shao Ligang¹,
Yang Wen¹, Wei Jilin¹, Li Chuanliang¹, Ma Weiguang⁴

¹Applied Science College, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology-Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621010, China;

³School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

⁴State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract A detecting system of acetylene (C₂H₂) gas in near-infrared region is developed based on the tunable diode laser absorption spectroscopy. The wavelength modulation spectroscopy in combination of multi-pass

收稿日期: 2017-08-01; **收到修改稿日期:** 2017-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(11504256, U1610117, 61405168, 61675120)、山西省高等学校科技创新项目(2015166)、山西省高等学校创新人才支持计划、山西省回国留学人员科研资助项目(2016-096)、晋城市科技攻关计划(1201501004-22)、西南科技大学博士基金(13zx7123)、西南科技大学-中国工程物理研究院激光聚变研究中心极端条件物质特性实验室开放基金(12zxjk08)、西南科技大学-中国工程物理研究院激光聚变研究中心极端条件物质特性实验室平台基金(14tdjk01)

作者简介: 蒋利军(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事吸收光谱方面的研究。E-mail: 2277526629@qq.com

导师简介: 李传亮(1983—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事原子分子光谱方面的研究。

E-mail: clli@tyust.edu.cn(通信联系人)

absorption cell is used to improve detecting sensitivity of the system. To optimize detecting conditions of the system, spectral signals of standard C_2H_2 gas with volume fraction of 5×10^{-5} are detected under the conditions of pressure of 5.3-12.0 kPa and modulated amplitude of 0.010-0.035 V. The second harmonic signals of C_2H_2 with different concentrations are detected at the total pressure of 10.7 kPa. To verify stability of the system, spectral signals for 60 s are acquired, and the most suitable detection time as well as the minimum detection limit is obtained by the Allan variance analysis. The results show that the signal intensity of the second harmonic signals is the greatest at pressure of 10.7 kPa and modulation amplitude of 0.030 V. The volume fraction of C_2H_2 is with a good linear relationship with the amplitude of the second harmonic signals, and the detecting deviation is less than $\pm 2\%$ in the range of volume fraction from 1×10^{-6} to 5×10^{-5} . The most suitable detection time of the experimental system is 7.2 s, and the minimum detection limit is 2.8×10^{-11} . The instrument adopts a laser driver and a digital lock-in amplifier based on an embedded system, so the instrument has the characteristics of simple mechanical structure, small size, and easy integration with other systems. Therefore, the compact detecting system for C_2H_2 gas is suitable for industrial process and gas transmission.

Key words spectroscopy; detecting instrument of acetylene; tunable diode laser absorption spectroscopy; wavelength modulation-multi-pass absorption technique; detecting sensitivity; compact

OCIS codes 300.6380; 300.1030

1 引言

乙炔(C_2H_2)作为最基本的化工原料之一,在工业生产中非常重要。 C_2H_2 气体的浓度检测在工厂预防 C_2H_2 爆炸、煤矿预测煤炭自燃,以及诊断电力变压器故障类型和早期潜伏性故障等方面具有非常重要的意义^[1-3]。可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术通过调节注入电流和温度来调谐激光波长,从而实现了对分子吸收谱线的测量。TDLAS技术具有分辨率和灵敏度高、响应快速、不易受其他气体组分干扰等优点,因此被广泛应用于环境监测、机动车尾气测量和大气中痕量污染气体监测等与气体检测相关的基础研究中,而且在工业过程控制、生物和医学研究、燃烧过程诊断和爆炸检测等领域也获得了广泛应用^[4-9]。

近年来,TDLAS作为一种实时、有效的在线检测方法得到了广泛应用。由于近红外波段的分布反馈(DFB)激光器技术较成熟,所以大多在近红外波段进行 C_2H_2 检测。2008年,何莹等^[10]采用波长调制技术研制了 $1.530 \mu m$ 附近的 C_2H_2 在线检测系统,其探测极限为 1.46×10^{-6} 。2016年,何启欣等^[11]采用波长调制技术研制了 $1.534 \mu m$ 附近的 C_2H_2 在线检测系统,其探测极限为 6.52×10^{-6} ,且系统实现了小型化。2017年,Ma等^[12]采用石英增强光声光谱实现了 C_2H_2 的超高灵敏度检测,探测极限可达 3.32×10^{-11} 。在近红外和中红外波段都有 C_2H_2 气体分子的吸收谱线,虽然 C_2H_2 分子在近红外波段的吸收比在中红外波段的吸收弱数十倍,但中红外激光器的价格昂贵,且不易接入光纤^[12-13],因此可以选择已经广泛应用于通信及气体

检测领域的商用近红外DFB激光器作为 C_2H_2 气体检测系统的光源。此外,在 $1.5 \mu m$ 波段附近, H_2O 和 CO_2 的吸收比 C_2H_2 的吸收至少低2个数量级。本文选择 C_2H_2 在近红外波段的特征吸收谱线来检测 C_2H_2 气体,基于嵌入式系统设计激光驱动器和数字锁相放大器,采用长光程与激光波长调制相结合的技术,研究了小型化的 C_2H_2 痕量气体测量系统。

2 实验原理

由于气体分子对光的吸收与分子的吸收系数、通过吸收介质的长度、气体分子的浓度有关,因此在弱吸收情况下,出射光强满足Beer-Lambert定律^[11-13]:

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

式中 $I(\nu)$ 为出射光强, ν 为频率, I_0 为入射光强, α 为吸收系数。

波长调制光谱测量通过缓慢变化的三角波或锯齿波扫描信号叠加快速变化的正弦信号(扫描频率为 f)来改变激光二极管的注入电流,从而对激光的波长和强度进行调谐,此时其瞬时频率 $\nu(t)$ 和功率 $I_0(t)$ 可以分别表示为

$$\nu(t) = \nu_0 + \alpha \cos(2\pi ft), \quad (2)$$

$$I_0(t) = I[1 + i_1 \cos(2\pi ft + \phi_1) + i_2 \cos(4\pi ft + \phi_2)], \quad (3)$$

式中 t 为时间, ν_0 为激光的中心频率, I 为激光的平均光强, ϕ_1 、 ϕ_2 、 i_1 、 i_2 分别为激光器的特征参数。

当吸收系数 α 小于5.0%时,激光透过率 τ 可以用一阶泰勒公式展开为

$$\tau \approx 1 - p_{\text{tot}} x S^* L \phi(\nu) = 1 - p_{\text{tot}} x S^* L \sum_{k=0}^{\infty} H_k \cos(2\pi k ft), \quad (4)$$

式中 p_{tot} 为总压强, x 为气体的体积分数, S^* 为谱线强度, L 为光程, $\phi(\nu)$ 为激光器的特征参数, H_k 为 k 次哈密顿量, k 为次数。

当 $k=0$ 时, H_k 可以表示为

$$H_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \phi(\nu) d\theta, \quad (5)$$

式中 θ 为相位。

一般情况下, $i_2 \ll 1$, 此时在吸收线中心位置波长调制的一次谐波和二次谐波信号 S_{2f} 可以简化为^[14]

$$S_{2f} \approx -\frac{G\bar{I}_0}{2} p_{\text{tot}} x S^* L H_2, \quad (6)$$

式中 G 为光电探测的增益系数, \bar{I}_0 为平均光强值, H_2 为哈密顿量的 2 次分量。

在(6)式中, G 、 p_{tot} 、 x 、 S^* 、 L 均为常数, 由此可知, 波长调制的二次谐波信号幅值与待测浓度呈线性关系。

3 系统装置的研制

3.1 系统结构

图 1(a) 所示为基于 TDLAS 的小型化 C_2H_2

检测系统原理图, 其中 GRIN 为自聚焦。该 C_2H_2 检测系统由 DFB 激光器、DFB 激光器驱动、Herriott 型多光程池、光电探测器、数字正交锁相放大器模块组成。本系统采用自主设计的驱动器驱动 DFB 激光器, 通过改变 DFB 激光二极管的温度和注入电流实现激光输出频率和功率的调谐。DFB 激光器产生的激光(中心波数为 $6601.6617 \text{ cm}^{-1}$)由隔离器(40 dB)进行隔离, 以进一步避免反射光的反馈, 保护激光器并减小对激光功率的影响。经过光隔离器后的激光经过准直后, 由反射镜耦合到一个基长为 30 cm 的 Herriott 型多光程吸收池中, 反射次数为 56, 有效光程为 16.8 m。出射的光信号由自制耦合镜和透镜会聚到 InGaAs 光电二极管探测器, 得到与光强相关的电压信号经过模数转换后, 输入数字正交锁相放大器进行处理, 然后提取二次谐波信号, 最终根据二次谐波信号的幅值计算得到此时气体的浓度。图 1(b) 所示为对应的小型化 C_2H_2 检测仪的实物图, 其体积为 $60 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 23 \text{ cm}$ 。

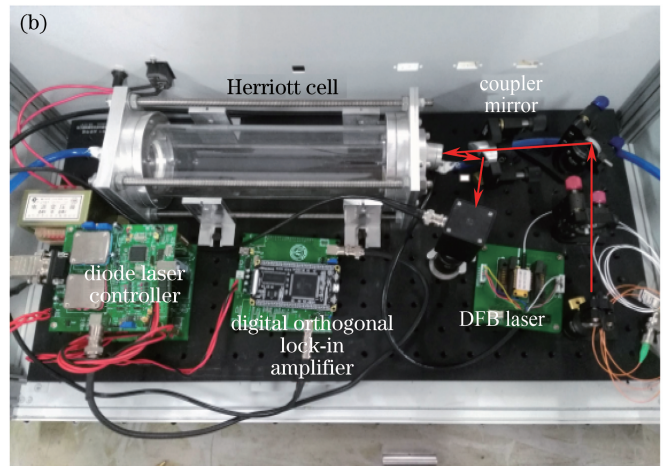
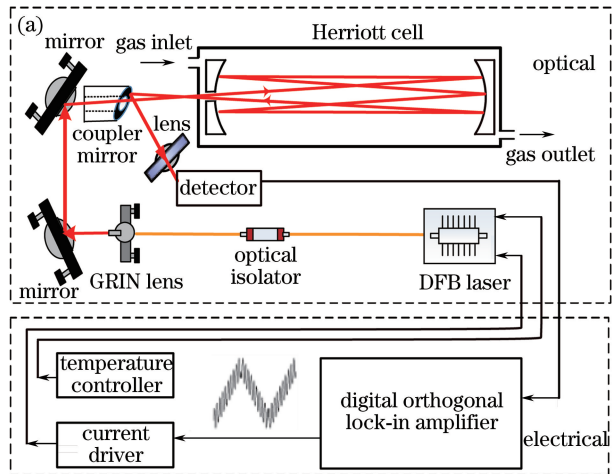


图 1 (a) C_2H_2 浓度测量装置原理图; (b) 小型化 C_2H_2 检测仪实物图

Fig. 1 (a) Schematic of concentration detecting device of C_2H_2 ; (b) photo of compact C_2H_2 detecting instrument

3.2 激光器驱动设计

实验系统采用自主研制的 DFB 激光器驱动来驱动激光器, 整体驱动电路分为主控电路、温控电路、恒流驱动电路、数模转换器(DAC)等, 整体示意图如图 2 所示, 其中 USART 为通用同步/异步串行接收/发送器, ADC 为模数转换器。整个系统的控制部分由计算机完成, 计算机通过串行口可以设置 DFB 激光器的注入电流和工作温度。控制数据从个人计算机(PC)传输到微控制单元(MCU), MCU

经过串行外围设备接口(SPI)总线与 MCP4822 型 DAC 通信来分别控制温控芯片 WTC3243 和电流驱动芯片 WLD3343, 从而分别控制 DFB 激光器的温度和注入电流。

主控芯片采用 ST 公司的 STM32F103 系列控制器, 该控制器具有体积小、功耗低的特点, 适合作为小型化仪器的 MCU。温控芯片 WTC3243 通过电压控制温度, 最大驱动半导体致冷器(TEC)的电流为 2.2 A, 1 h 温度控制稳定性为 $0.002 \text{ }^\circ\text{C}$; 电流驱

动芯片 WLD3343 通过电压控制驱动电流,最大驱动激光器电流为 2.2 A,在 25 °C 下工作 1 h 电流的变化小于 0.02%。

图 3 所示为激光驱动器参数与激光输出峰值波

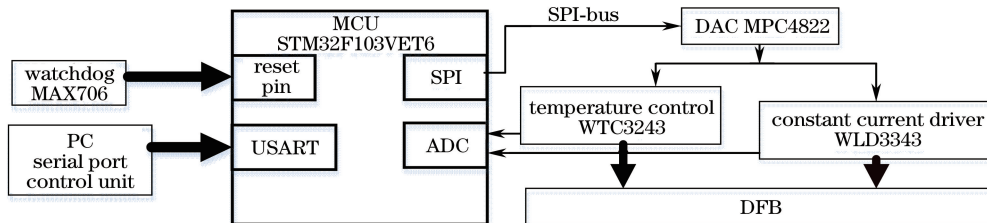


图 2 整体驱动电路框图

Fig. 2 Diagram of whole driving circuit

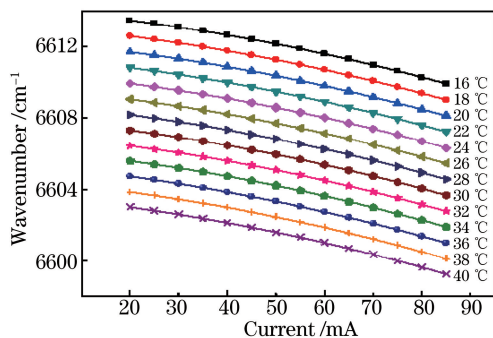


图 3 不同温度下激光器峰值波数
随注入电流的变化

Fig. 3 Variation of peak wavenumber of laser with injection current at different temperatures

3.3 气室设计

由 Beer-Lambert 定律可知,吸收池的光程越长,气体的吸收越明显,灵敏度也就越高。因此,实验中采用自行设计的 Herriott 型多光程吸收池,该 Herriott 吸收池由 2 个曲率半径为 400 mm 的球面镜组成,基长为 30 cm,反射次数为 56,有效光程为 16.8 m。

4 结果与分析

在常温、大气压下的气体分子吸收光谱中,由温度主导的多普勒展宽和由压力主导的压力展宽均具有重要作用^[15-17]。当实验温度保持在室温时,光谱信号强度的变化来源于压强的变化。由于总压强和调制幅度会对波长调制的二次谐波信号产生影响,所以分别测量了 C_2H_2 体积分数为 5×10^{-5} 的标准气在压强分别为 5.3, 6.7, 8.0, 9.3, 10.7, 12.0 kPa, 且调制幅度分别为 0.010, 0.015, 0.020, 0.025, 0.030, 0.035 V 时 C_2H_2 气体的二次谐波信号,信号幅值如图 4 所示。由图 4 可知:随着总压强和调制幅度增加,二次谐波的幅值增加;在总压强为 10.7 kPa 且

数的变化。由图 3 可知:保持温度不变,电流每增加 5 mA,激光器发射的中心波数约减小 0.2 cm^{-1} ;在电流恒定的情况下,随着温度升高,激光器的输出中心波数减小,变化幅度约为 $0.5 \text{ cm}^{-1}/\text{C}$ 。

调制幅度为 0.030 V 时,吸收谱线的峰值为 23.4;当调制幅度增加到 0.035 V 时,谐波信号开始变小,因此实验系统的最佳压强为 10.7 kPa,最佳调制幅度为 0.030 V。

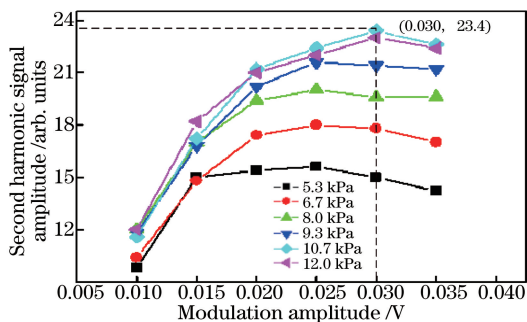


图 4 C_2H_2 体积分数为 5×10^{-5} 的标准气在不同总压强和调制幅度时的二次谐波信号幅值

Fig. 4 Second harmonic signal amplitude of standard gas with C_2H_2 volume fraction of 5×10^{-5} at different total pressures and modulation amplitudes

为了得到检测系统的二次谐波信号与气体浓度的关系,采用静态配气法,对体积分数 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$ 的 C_2H_2 气体样品进行测量,得到的二次谐波信号、二次谐波信号幅值与 C_2H_2 体积分数的关系以及测量误差如图 5 所示。由图 5 可知, C_2H_2 气体的体积分数与二次谐波幅值呈线性关系,线性相关系数为 0.9982,拟合误差小于 $\pm 2\%$ 。

为了进一步分析 C_2H_2 测量系统的稳定性,引入 Allan 方差对存在于数据中的不同噪声项进行量化。通过 Allan 方差能清楚地观测各类噪声随积分时间变化的规律,从而对各种噪声源进行辨识,评估系统的稳定性^[18]。实验中记录 60 s 内体积分数为 10^{-5} 的 C_2H_2 (总压强为 10.7 kPa) 的波长调制光谱信号,结果如图 6(a) 所示,计算得到的 Allan 方差如图 6(b) 所示。由图 6(b) 可知,随着积分时间延长,

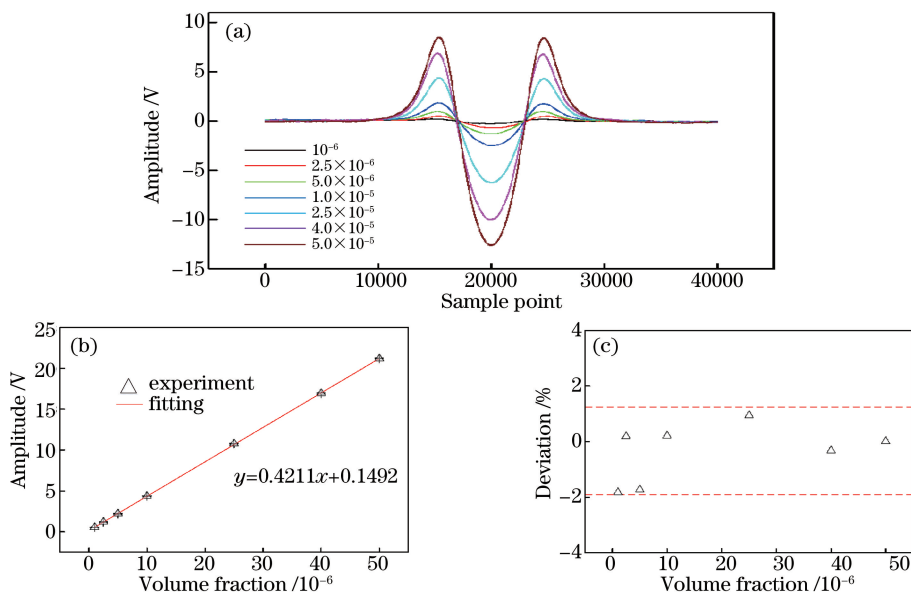


图 5 (a)不同体积分数 C_2H_2 的波长调制二次谐波信号;(b)二次谐波信号幅值与 C_2H_2 体积分数的关系;(c)测量误差

Fig. 5 (a) Wavelength modulation second harmonic signals for C_2H_2 with different volume fractions;

(b) relationship between amplitude of second harmonic signal and C_2H_2 volume fraction; (c) detecting deviation

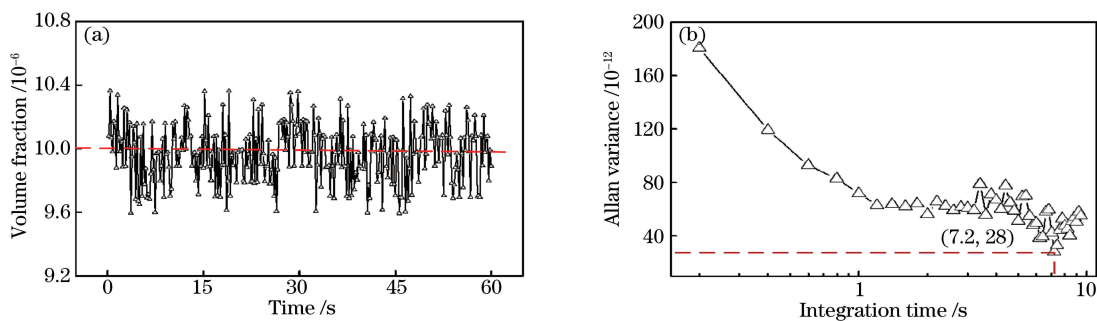


图 6 (a) 60 s 的实验测量数据;(b)测量系统的 Allan 方差

Fig. 6 (a) Experimental detecting data for 60 s; (b) Allan variance of detecting system

Allan 方差呈现出先减小后平稳然后再增大的趋势。当积分时间到达 7.2 s 时,Allan 方差处于平稳状态,此时标准差为 2.8×10^{-11} ,由此可得本测量系统的极限探测为 2.8×10^{-11} 。

5 结 论

根据 TDLAS 波长调制技术原理,针对工业现场的环境条件研制了小型化 C_2H_2 检测系统。通过将多光程吸收光谱与波长调制相结合,使波长调制吸收光谱的探测灵敏度大幅提高。实验结果显示,二次谐波信号幅值与 C_2H_2 气体浓度具有相关系数为 0.9982 的线性度,探测极限为 2.8×10^{-11} 。表明该系统能够作为 C_2H_2 气体检测传感器,在工业现场检测方面具有良好的应用前景。若进一步集成激光器驱动和数字锁相放大器,优化多光程池,可使系统在确保高灵敏度的情况下进一步小型化。

参 考 文 献

- [1] Wagner S, Klein M, Kathrotia T, *et al.* *In situ* TDLAS measurement of absolute acetylene concentration profiles in a non-premixed laminar counter-flow flame [J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(3): 585-589.
- [2] Ren W, Farooq A, Davidson D F, *et al.* CO concentration and temperature sensor for combustion gases using quantum-cascade laser absorption near $4.7 \mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(3): 849-860.
- [3] Sun L F, Yu H. Online multi-component gas concentration detection system based on TDLAS technology [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017(3): 73-77.
孙灵芳, 于洪. 基于 TDLAS 技术的在线多组分气体浓度检测系统 [J]. *仪表技术与传感器*, 2017(3): 73-77.
- [4] Xia H, Liu W Q, Zhang Y J, *et al.* Detection

- method comparison of CO concentration measurement in combustion based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(1): 42-46.
- 夏慧, 刘文清, 张玉钧, 等. 可调谐激光吸收光谱技术监测燃烧中 CO 检测方法比较[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, 3(1): 42-46.
- [5] Wang J, Maiorov M, Jeffries J B, *et al.* A potential remote sensor of CO in vehicle exhausts using 2.3 μm diode lasers [J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(11): 1576-1584.
- [6] Chen J Y, Liu J G, Zhang Y J, *et al.* Methane sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(2): 146-149.
- 陈玖英, 刘建国, 张玉钧, 等. 一种基于 TDLAS 谐波探测技术的甲烷传感器[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(2): 146-149.
- [7] Li F, Yu X L, Gu H B, *et al.* Measurement of flow parameters in a scramjet combustor based on near-infrared absorption [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(6): 1061-1067.
- 李飞, 余西龙, 顾洪斌, 等. 超燃燃烧室气流参数诊断[J]. *力学学报*, 2011, 43(6): 1061-1067.
- [8] Lan L J, Ding Y J, Jia J W, *et al.* Theoretical and experimental study of measuring gas temperature in vacuum environment using tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(8): 083301.
- 蓝丽娟, 丁艳军, 贾军伟, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱测量真空环境下气体温度的理论与实验研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(8): 083301.
- [9] Yang X B, Zhao W X, Tao L, *et al.* Measurement of volatile organic compounds in the smog chamber using a Chernin multipass cell [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(7): 5154-5162.
- 杨西斌, 赵卫雄, 陶玲, 等. 一种新型光学多通池系统应用于烟雾箱内挥发性有机化合物探测[J]. *物理学报*, 2010, 59(7): 5154-5162.
- [10] He Y, Zhang Y J, Kan R F, *et al.* The development of acetylene on-line monitoring technology based on laser absorption spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10): 2228-2231.
- 何莹, 张玉钧, 阚瑞峰, 等. 基于激光吸收光谱乙炔在线监测技术的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(10): 2228-2231.
- [11] He Q X, Liu H F, Li B, *et al.* Online detection system on acetylene with tunable diode laser absorption spectroscopy method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(11): 3501-3505.
- 何启欣, 刘慧芳, 李彬, 等. 基于可调谐激光二极管吸收光谱的乙炔在线检测系统[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(11): 3501-3505.
- [12] Ma Y F, He Y, Zhang L G, *et al.* Ultra-high sensitive acetylene detection using quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy with a fiber amplified diode laser and a 30.72 kHz quartz tuning fork [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(3): 031107.
- [13] Tu X H, Liu W Q, Zhang Y J, *et al.* Second-harmonic detection with tunable diode laser absorption spectroscopy of CO and CO₂ at 1.58 μm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(7): 1190-1194.
- 涂兴华, 刘文清, 张玉钧, 等. CO 和 CO₂ 的 1.58 μm 波段可调谐二极管激光吸收光谱的二次谐波检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(7): 1190-1194.
- [14] Li C L, Wu Y F, Qiu X B, *et al.* Pressure-dependent detection of carbon monoxide employing wavelength modulation spectroscopy using a Herriott-type cell [J]. *Applied Spectroscopy*, 2017, 71(5): 809-816.
- [15] Chen Y, Zhao W X, Hu C J, *et al.* Experimental study of the photochemical reaction in the smog chamber using a Chernin multipass cell [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0830001.
- 程跃, 赵卫雄, 胡长进, 等. Chernin 型多通池用于烟雾箱光化学反应过程的实验研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0830001.
- [16] Yuan S, Kan R F, He Y B, *et al.* Laser temperature compensation used in tunable diode-laser absorption spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0515002.
- 袁松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱中激光器温度补偿[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0515002.
- [17] Yuan S, Kan R F, He Y B, *et al.* Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1208003.
- 袁松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气 CO₂ 监测仪[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208003.
- [18] Ye W L, Zheng C T, Wang Y D. Stability measurement and temperature compensation of mid-infrared methane detection device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0323003.
- 叶玮琳, 郑传涛, 王一丁. 中红外甲烷检测仪稳定性实验及温度补偿研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0323003.