

基于 TDLAS 技术的人体呼气末 CO₂ 在线检测

王鑫¹, 荆聪蕊¹, 侯凯旋¹, 张建涛¹, 娄存广^{1,2*}, 姚建铨², 刘秀玲¹

¹河北大学电子信息工程学院, 河北省数字医疗工程重点实验室, 河北 保定 071002;

²天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 呼出气体分析是一种测量呼出气体成分和含量的新技术,在人体健康的无创检测和分析中应用得越来越广泛。基于低成本微型垂直腔面发射激光二极管(VCSEL)搭建了可调谐激光吸收光谱(TDLAS)气体分析系统,实现了人体呼出 CO₂ 的在线测量。该系统主要由激光管、驱动控制电路、光电探测器、放大电路、数据采集卡、控制软件、锁相放大器及赫里奥特气体池构成。该检测池的体积为 400 mL,有效光程为 20 m,激光光源的中心波长为 1579.57 nm。采用波长调制吸收光谱技术中的二次谐波幅值反演计算人体呼出 CO₂ 的浓度。该系统可以实现精准、无损、高效地在线测量人体呼出 CO₂ 气体的浓度,波动范围小于±0.06%,灵敏度为 0.14%。这一研究为近红外 TDLAS 技术研究人体呼出气体与相关疾病标志物的无创检测提供了新的研究思路。

关键词 光谱学; 可调谐半导体吸收光谱; 无损检测; 呼出气体; CO₂

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0311002

Online Detection of Human-Exhaled End-Tidal Carbon Dioxide Using Tunable Semiconductor Absorption Spectroscopy

Wang Xin¹, Jing Congrui¹, Hou Kaixuan¹, Zhang Jiantao¹,

Lou Cunguang^{1,2*}, Yao Jianquan², Liu Xiuling¹

¹College of Electronic Information Engineering & Hebei Key Laboratory of Digital Medical Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China;

²College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The analysis of exhaled gas is a new technology for measuring the composition and content of exhaled gas, which has wide application in non-invasive detection and analysis of human health. In this paper, we build a tunable semiconductor absorption spectroscopy (TDLAS) gas-analysis system using a low-cost vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) to realize online measurements of human-exhaled end-tidal carbon dioxide (CO₂). The system mainly comprises a laser diode, drive control circuit, photodetector, amplifier circuit, data acquisition card, control software, lock-in amplifier, and Herriot gas cell. The gas cell has a volume of 400 mL and an effective optical path of 20 m, and the laser source has a center wavelength of 1579.57 nm. The system uses the second-harmonic amplitude in wavelength-modulated absorption spectroscopy to determine the concentration of CO₂ exhaled by a human body. It achieves a fluctuation range of less than ±0.06% and a sensitivity of 0.14%, which satisfies the detection requirements for human-exhaled CO₂, and it can accurately, non-destructively, and efficiently measure human-exhaled gas online. This study provides a new strategy for non-invasive detection of human-exhaled gas and related diseases by near-infrared TDLAS technology.

Key words spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; nondestructive detection; exhaled breath; carbon dioxide

OCIS codes 140.3470; 170.1470; 300.6470

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-10-09; 录用日期: 2019-11-02

基金项目: 科技部重点研发计划(2017YFB1401200)、国家自然科学基金(61673158,61703133)、河北省高校青年拔尖人才(BJ2016005)、河北省自然科学基金(F2017201192,F2018201070)、河北省医学科学研究项目(ZL20140223)、河北大学研究生创新资助项目(hbu2020ss002)

* E-mail: loucunguang@163.com

1 引言

呼吸维持着人类正常的生理活动,而呼吸信号是衡量人体健康的重要指标之一。到目前为止,已经确认的人体呼出气体中的成分超过了 1000 种,其中一部分是人体自身代谢所产生的内源性气体,包括种类繁多的可挥发性有机物(VOCs),还有一部分是通过呼吸进入人体的污染气体。研究表明,呼出气体的种类和浓度差异反映了个体在机能上的差别,甚至可以反映当时的身体健康状况^[1-4]。Phillips 等^[5]经过多年的实验和研究筛选出了 47 种与肺癌相关的可挥发性有机化合物,其中的 16 种有较高的检出率和相关性。研究结果表明,呼出一氧化氮是哮喘或其他与呼吸相关的炎症的重要特异性指标^[6-7],糖尿病患者呼出丙酮含量较健康人群有明显升高^[8]。呼出气体检测具有无创性和快速性,通过对人体呼出气体中特异性物质的检测和分析可以对人体的患病情况进行早期筛查和初步诊断,实现病程的良好控制。呼气末 CO₂ 是一项非常重要的生理参数,可以反映患者肺部代谢、通气和循环情况,也是临床检查的重要指标。患有慢性阻塞性肺病(COPD)、哮喘和肺炎的病人呼出的 CO₂ 的含量与正常人有较大差异^[9]。人体呼出 CO₂ 的水平与肺通气量水平具有相关性,通过监测人体呼出 CO₂ 可以有效降低婴儿猝死综合征(SIDS)和阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征(OSAHS)患者的潜在风险,同时能够对重症患者以及外科患者的呼吸健康状况进行初步评估^[10]。因此,呼出气体的定量分析在临床应用中发挥着重要作用。

呼出气体检测需要对多种低浓度痕量气体进行快速准确测量。市场上常见 CO₂ 分析仪采用的测量方法有激光吸收光谱法、质谱法和电子鼻法等,而非色散红外光谱法(NDIR)使用得较为广泛。基于 NDIR 技术的 CO₂ 分析仪响应时间约为 150 ms,精度约为 ±0.01%。在诸多种应用中,激光光谱技术与电化学气敏传感技术相比,无论是特异性、灵敏度还是实时性都具有很大优势。国内外许多学者利用激光光谱技术对 CO₂ 的浓度进行了检测:Zare 等^[11]通过腔衰荡光谱(CRDS)技术研究了 CO₂ 的两种同位素在 1600 nm 处的吸收情况;Wang 等^[12]使用中红外激光器(ICL)开发了一款基于增强光声光谱(QEPAS)的气体传感器;陆恒等^[13]利用可调谐激光吸收光谱(TDLAS)技术同时检测了 CO₂ 和水蒸气,探测极限可达到 10⁻⁵。然而,市面上常用的非

色散红外光谱法(NDIR)虽然精度和灵敏度比较高,但容易受到光源强度变化和背景漂移的影响;腔衰荡光谱(CRDS)技术对吸收池质量和长度都有着极高的要求,很难开发出结构紧凑、成本低廉的小型系统;光声光谱(QEPAS)技术对腔内压力和气流稳定性的要求较高,同时音叉本身存在热噪声,从而限制了它的实际应用。TDLAS 技术是一种专门针对痕量气体进行检测的新型检测技术,光谱宽度比较窄,很适合用于识别并测量呼出的痕量混合气体,具有选择性强以及检测精度、灵敏度和分辨率高的优点^[14-15],已成为目前主流的痕量气体检测技术。将 TDLAS 技术应用于人体呼气末 CO₂ 的在线检测时,患者呼气的温度、水汽、压力都会对测量精度产生影响,需要对其进行精准控制;同时,采用低成本激光器搭建紧凑的小型系统,可使系统具有便携性,提高在线检测的响应特性。

与侧向出光的分布式反馈激光器(DFB)相比,垂直腔面发射激光器(VCSEL)的射出光垂直于芯片表面,能够扫描更宽的波长范围。VCSEL 激光器的工作电流一般小于 10 mA,具有功耗低、效率高、寿命长、体积小的优点,非常适用于便携式设备和长时间的监测终端,因此在激光光谱检测系统中具有很大的发展潜力^[16]。

2 系统的设计与搭建

2.1 红外吸收光谱法

基于 TDLAS 技术的呼出气体浓度检测技术的主要原理是朗伯-比尔定律,由该定律可以推导出二次谐波峰值与被检测气体的浓度成正比^[17-18]。TDLAS 技术主要利用可调谐半导体激光器的窄线宽和波长随着注入电流改变的特性,通过电流调制使激光器的波长扫描被测气体分子的吸收峰。此时,待测气体可对激发光信号产生较强的吸收,根据吸收导致的输出光信号幅值的变化就可以实现气体浓度的定量测量。采用较其他技术更为简单且成本低、精度高的二次谐波波长调制(WMS-2f)技术,可以有效降低低频噪声和闪烁噪声,提高信噪比。通过合理选择波谱线,利用信号解调电路输出的二次谐波的峰值就可以反演被测气体的浓度。

2.2 谱线的选择

人体呼出气体一般由体积分数为 78% 的 N₂、14.2% 的 O₂、约 4% 的 CO₂ 和 6% 的水蒸气及痕量挥发性有机气体组成。因此,选择合适的激光波长可以避免其他气体的干扰,实现对目标气体的精确

测量。通过对 HITRAN 数据库的查询发现:CO₂在 1580 nm 处有两个吸收强度为 $10^{-23} \text{ cm}^{-1} \cdot (\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}$ 的吸收峰,两个吸收峰处于干扰分子对光吸收的影响比较小;同时,因为吸收池前冷阱对呼出气体中的水蒸气具有冷凝作用,因此水蒸气同样可以忽略不计。在有效光程为 20 m、温度为 296 K,压力为 101.325 kPa 的条件下,呼出气体中的 O₂ 和 CO₂ 气体在 1578.2~1581.8 nm 波段之间光的吸收度如图 1 所示,可以看出:在 1579.57 nm(6330.83 cm^{-1})处,O₂ 的吸收情况明显低于 CO₂,它们在该峰处产生的影响可以忽略不计。因此,本文采用中心波长为 1579.57 nm 的 VCSEL 激光二极管作为 CO₂ 测量系统的激光光源,采用背景气体为 N₂ 的 CO₂ 标气来进行浓度反演和系统响应特性的研究^[19-20]。

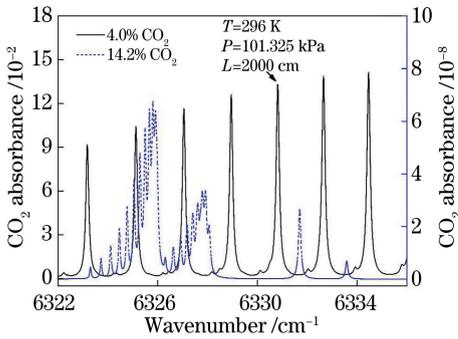


图 1 CO₂ 和 O₂ 在 1578.2~1581.8 nm 波段的模拟吸收图
Fig. 1 Simulated absorption spectra of CO₂ and O₂ at 1578.2~1581.8 nm

基于 TDLAS 的人体呼气末 CO₂ 测量系统的原理图和实际装置如图 2 所示。采用美国 Wavelength 公司一款集成化程度高的紧凑型驱动器 LDTC02020 调节激光管的温度和电流,使激光在 1578.58~1582.20 nm 范围内扫描。本文的检测系统采用 WMS-2f 技术,通过一块由锁相放大器和数字合成器高度集成的调制解调锁相放大器(2f 板)对激光管进行外部波长调制,将其产生的 10 kHz 的正弦波加载到控制激光器扫描的锯齿波上,被调制好的光经过准直器 A375TM-C 和楔形窗口镜片射入赫里奥特气体池中。赫里奥特池的长度为 320 mm,光线在池内经历 64 次反射,有效光程可达到 20 m,容积为 400 cm³。检测池中射出的光束采用具有聚焦功能的探测器 DET08CL/M(该探测器的探测范围为 800~1700 nm,带宽为 5 GHz,上升时间约为 70 ps)进行接收,探测器接收到的光

信号经跨阻放大器 TLC2201 进行电流-电压转换,同时通过控制带宽来抑制噪声,然后经过 2f 板进行二次谐波的解调。用数字示波器 MDO4054C 和 LabVIEW 进行数据的收集,最后采用 Origin 和 MATLAB 进行数据分析。

经过实验测试可知,加载峰峰值为 12 mV、频率为 10 kHz 的正弦波信号时可以获得更强的二次谐波信号。激光管的注入电流为 6.2~7.2 mA (10 mA/V),扫描深度为 100 mV,周期为 400 ms,平均输出功率为 0.8 mW。吸收强度会受到温度的影响,而压强又会影响谱线的线宽,因此,为避免温度和压强的干扰,分别采用压力仪表 APC30WP 和温度控制器 XH-W1308 控制吸收池的压强和温度,以确保能在最佳的条件下对呼出 CO₂ 进行在线检测。用波长 $\lambda = (635 \pm 5) \text{ nm}$ 的红光激光器 PGL-VI-635 来辅助调整光路。由于呼出气体中的水蒸气可能会附着在气体池中反射镜的表面,故而采用 -30 °C 的冷阱对呼出气体进行除湿。

3 实验结果与讨论

3.1 系统的标定

为了评估 TDLAS 系统的性能,实现浓度反演,使用标准气体对传感器进行评估和校正。将纯 N₂ (体积分数为 99.99%) 和体积分数分别为 2.5%、4.0%、5.0%、10.0% 的标准 CO₂ 气体分别注入到气体池中,进行周期扫描,每次测量前将纯 N₂ 通入吸收池中,目的是排除残余气体干扰,并保持每次测量时气体池内压强和温度恒定。图 3 为实验数据采集过程中示波器捕获到的接收端光信号及二次谐波(2f)信号图。

在图 4(a)中可以看出,随着气体浓度增大,锯齿波的凹陷程度增大,即气体浓度越大,吸收越强,产生的吸收凹陷越大。通过锁相放大器对锯齿波进行解调,可以得到与浓度相对应的吸收峰的 2f 信号,如图 4(b)所示,可以看出系统的响应时间约为 15 ms。提取 100 组测量的 2f 信号峰值并取均值,获得了 CO₂ 浓度与 2f 信号幅值的拟合曲线,如图 4(c)所示,可见,CO₂ 浓度与 2f 信号强度呈现明显的正相关性。如图 4(c)所示,2f 信号幅值与 CO₂ 的体积分数(0~10.0%)具有良好的线性关系,线性拟合系数 $R^2 = 0.99729$ 。因此,通过拟合公式可以实现待测气体浓度的精确反演^[21]。

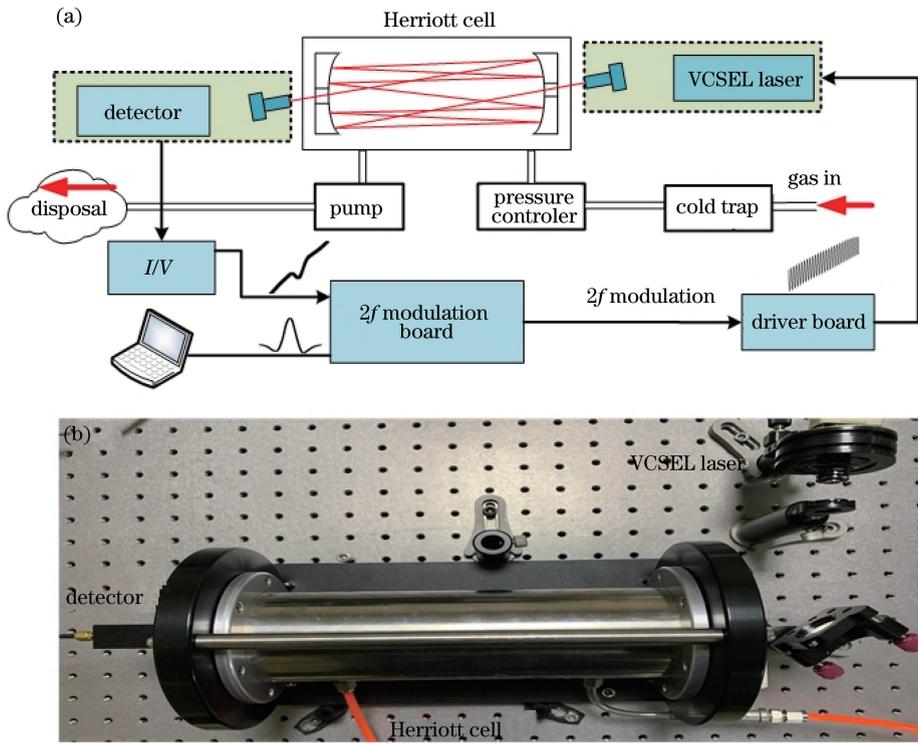


图 2 基于 TDLAS 的人体呼气末 CO₂ 检测系统。(a) 配置示意图；(b) 系统实物图

Fig. 2 Human end-tidal CO₂ detection system based on TDLAS. (a) Schematic configuration; (b) photography of system platform

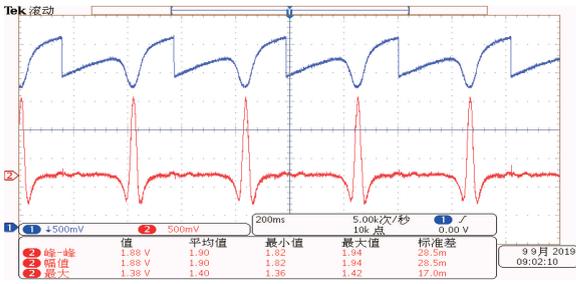


图 3 TDLAS 系统采集的实验数据

Fig. 3 Experimental data collected by TDLAS system

3.2 检测极限的计算

为了测量系统的检测下限，配制体积分数为 2.5% 的标准 CO₂ 气体，并将其通入吸收池中进行周期扫描，经过多次实验和对比发现，扫描频率过快会导致信号失真，不能保持良好的波形，频率太低，则会导致信噪比(SNR)变小。因此，选择优化的扫描频率和电压分别为 2.5 Hz 和 0.8 mV。经锁相放大器解调得到的信号的 SNR 较大，同时没有失真，基线相对更平滑。采集到的两个周期内的 2f 信号如图 5 所示。

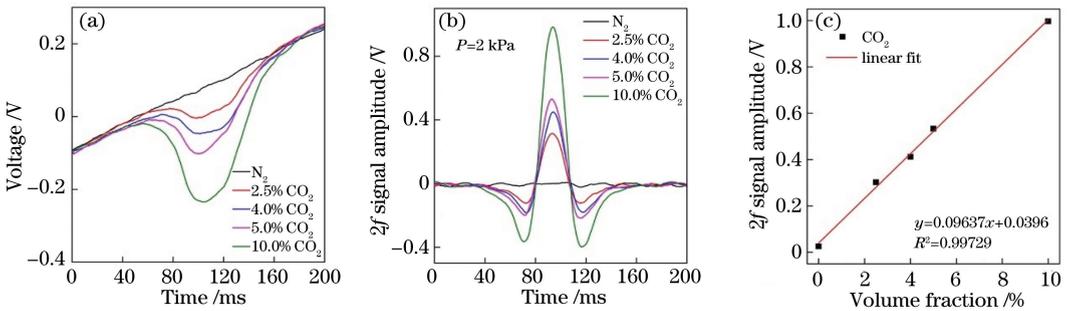


图 4 TDLAS 系统浓度反演过程图。(a) 不同浓度 CO₂ 的直接吸收信号；
(b) 不同浓度 CO₂ 的 2f 信号；(c) 2f 峰值均值与 CO₂ 浓度的关系

Fig. 4 Concentration inversion process of TDLAS system. (a) Direct absorption signal of CO₂ with different concentrations; (b) 2f signal of CO₂ with different concentrations; (c) relationship between the amplitude of 2f signal and concentration of CO₂

根据图 5 可以对信噪比进行推算,在 CO₂ 体积分数为 2.5% 时,根据 2*f* 信号峰值均值(SV)为 0.30 V 和无吸收处的噪声幅值(SD)之比可以计算出该系统的二次谐波信噪比约为 55.56^[22]。采用样品检出限的方法(3σ 准则)对系统检测的最小灵敏度进行估算^[23],即认为最小检测灵敏度为噪声幅值(SD)的 3 倍,从而可以获得系统测量的最小灵敏度约为 0.14% (用 CO₂ 体积分数为 2.5% 时的 2*f* 幅值(SV)0.3 V 去除 3 倍噪声幅值(SD)就可以得到。

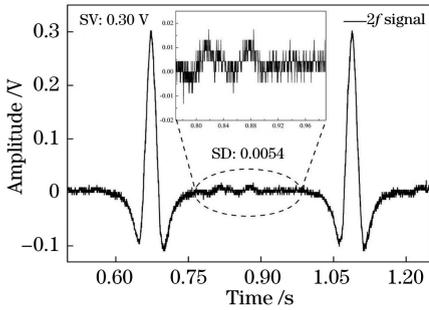
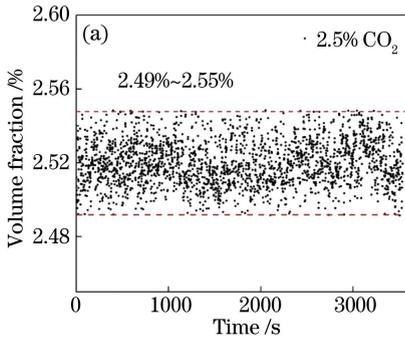


图 5 体积分数为 2.5% 的 CO₂ 的二次谐波波形
Fig. 5 Waveform of 2*f* signal of CO₂
with volume fraction of 2.5%

3.3 系统稳定性评估

为了衡量和评价系统的稳定性,将体积分数为 2.5% 的 CO₂ 气体注入吸收池中,设置扫描周期为 400 ms,保持池内压强为 2 kPa,温度为 296 K,运行该



系统并连续测量 1 h,采集得到 9000 组实验数据,提取数据峰值点绘制出图 6(a)。可以看出,在长达 1 h 的时间内,系统可以稳定工作。对于体积分数为 2.5% 的 CO₂ 气体,系统反演计算得到其输出范围为 2.49%~2.55%,波动范围不超过 ±0.06%。

为了进一步评估系统的长时间稳定性,对一系列连续时间数据进行 Allan 方差分析,通过 Allan 方差可以清楚地观察到噪声随积分时间的变化规律,如图 6(b) 所示。可以看出,在积分时间约为 180 s 时,测量系统的 Allan 方差处于一个相对平稳的状态。因此该系统的最佳探测时间约为 180 s,探测极限(体积分数)约为 0.03% (3.1×10^{-4})^[24]。

3.4 呼出气体测量

通过建立的 TDLAS 系统对实际呼出 CO₂ 进行在线测量。在实验过程中,为了保持吸收池气压稳定,使用 400 mL/s 的气体流量计使实验在恒定的流速下进行,通过控制呼出气体的流速并使用真空泵可以保持压强恒定为 2 kPa。本实验采用延长呼吸法检测肺深处的肺泡气体更能反映人体血液中 CO₂ 的浓度。检测池体积为 400 mL,而健康人一次深度呼吸呼出气体的体积约 3500 mL,在线测量呼出气体过程能够实现对吸收池内气体的不断冲洗。由图 7(a) 可以看出,2*f* 信号强度随着呼气时间的延长而上升。

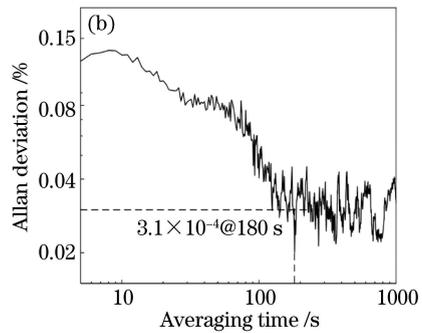


图 6 系统稳定性。(a) 体积分数为 2.5% 的 CO₂ 气体的测量结果;(b) 系统的 Allan 方差评估结果

Fig. 6 Stability of the system. (a) Measurement result of 2.5% CO₂; (b) Allan deviation of the system

呼气时间持续约 10 s,信号的幅值从 0.18 V 增大到 0.55 V,直到接近最大值后开始缓慢变化;在呼气结束时,CO₂ 的浓度趋向饱和。若是重复进行呼气检测,CO₂ 的浓度变化趋势也如图 7(a) 一样,具有可重复性。其中测量到的呼气分为三个阶段:第一阶段为呼气初始阶段,波形和幅值并无明显变化,呼出气体中不含死腔气;第二阶段为呼气上升阶段,此时波形斜率急剧上升,呼出气体中为死腔气和肺泡气的混合气体;第三阶段为肺泡气体的稳定期,变

化微小,保持平稳,为肺泡气。在第三阶段观察到的呼气末 CO₂ 浓度比呼气初始(第一阶段)呼出的死腔气体中的 CO₂ 浓度高约 4 倍。这个结果与之前的研究结论一致^[25]。图 7(b) 展示了志愿者正常呼吸时,根据采集到的 2*f* 的峰值所绘制的未经平滑处理的曲线,良好的可重复性证实了本文系统具有实时在线检测的能力。此外,本文还采集了 5 名健康志愿者呼气末 CO₂ 稳定均值的浓度变化曲线,如图 8 所示,测试对象为平均年龄 25 岁、无哮喘史、无过

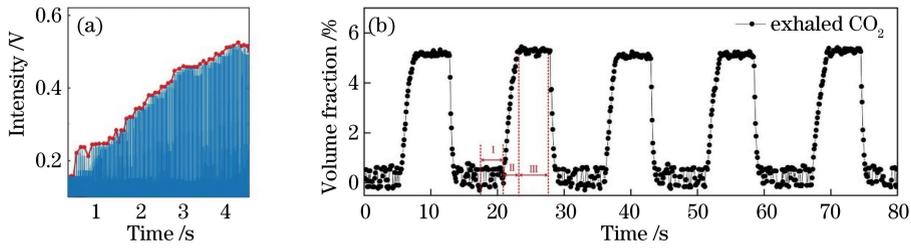


图 7 人体呼出气体检测实验。(a) 进行正常呼气时所采集的 $2f$ 信号峰值;
(b) 80 s 内正常呼吸过程中呼出的 CO_2 的浓度曲线

Fig. 7 Human exhaled gas detection experiments. (a) Peak value of $2f$ signal collected during normal exhalation; (b) concentration curve of exhaled CO_2 during normal breathing in 80 s

敏史、无吸烟史的在校大学生, 志愿者在进行实验前休息 5 min, 每次的延长呼气时间大于 5 s, 在夹鼻时自然呼气, 连续测量并采集。从图中可以看出, 5 位实验者于在线模式下的呼气末 CO_2 浓度均在正常范围, 并且个体差异不明显。有研究表明, 慢性阻塞性肺病患者呼气末 CO_2 浓度明显升高, 通过采集慢性阻塞性肺病患者呼气末 CO_2 浓度数据, 有望建立合理的氧疗机制, 提高患者的生存质量。

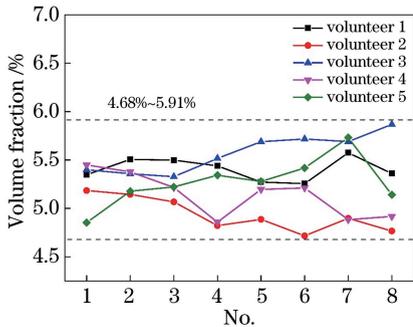


图 8 5 名健康成年志愿者连续 8 次呼气末 CO_2 浓度

Fig. 8 Consecutive eight times end-tidal CO_2 concentrations of five healthy adult volunteers

4 结 论

基于近红外的 TDLAS 技术的气体浓度测量系统越来越受到关注, 而 VCSEL 激光器为开发可靠、紧凑、低功耗和低成本的呼出气体监测装备提供了可行性。在该实验系统中, 采用 VCSEL 二极管在 1579.57 nm 处获得了 0.14% 的检测灵敏度。 $2f$ 信号的响应时间约为 15 ms, 比市场上常规 CO_2 分析仪的时间响应 (约 150 ms) 低一个数量级, 因此 TDLAS 系统具有较高的响应速度。总体而言, 基于 VCSEL 的 TDLAS 系统测量精度显然可以满足实时识别人体呼出 CO_2 浓度的变化。相对于小直径的 VCSEL 二极管, 此实验中的赫里奥特气体吸收池可能很大, 将来会采用更加紧凑的吸收池来进

一步提高设备的便携性。该设备对于检测和分离人体呼气中的肺泡气体具有重要意义, 不但为人体呼气末 CO_2 的检测提供了一个可行思路, 也为呼吸气体分析的应用研究提供了参考方案。

参 考 文 献

- [1] Amal H, Leja M, Broza Y Y, et al. Geographical variation in the exhaled volatile organic compounds [J]. Journal of Breath Research, 2013, 7 (4): 047102.
- [2] Jiang C Y, Sun M X, Li Y X, et al. Breath analysis using laser spectroscopy techniques: development and future [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(2): 0207015.
姜琛昱, 孙美秀, 李迎新, 等. 激光光谱技术在呼吸气体分析中的发展与未来 [J]. 中国激光, 2018, 45 (2): 0207015.
- [3] Güntner A T, Sievi N A, Theodore S J, et al. Noninvasive body fat burn monitoring from exhaled acetone with Si-doped WO_3 -sensing nanoparticles [J]. Analytical Chemistry, 2017, 89(19): 10578-10584.
- [4] Zhang D, Guo D M, Yan K. A breath analysis system for diabetes screening and blood glucose level prediction [M] // Breath analysis for medical applications. Singapore: Springer, 2017: 259-279.
- [5] Phillips M, Gleeson K, Hughes J M B, et al. Volatile organic compounds in breath as markers of lung cancer: a cross-sectional study [J]. The Lancet, 1999, 353(9168): 1930-1933.
- [6] Chen F J, Liao H, Huang X Y, et al. Importance of fractional exhaled nitric oxide in diagnosis of bronchiectasis accompanied with bronchial asthma [J]. Journal of Thoracic Disease, 2016, 8(5): 992-999.
- [7] Weetjens B J, Mgone G F, Machang'u R S, et al. African pouched rats for the detection of pulmonary tuberculosis in sputum samples [J]. The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease, 2009, 13

- (6): 737-743.
- [8] Wang Z N, Sun M X, Zhao X M, et al. Study of breath acetone in a rat mode of 126 rats with type 1 diabetes[J]. *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques*, 2017, 8(1): 1000344.
- [9] Bagchi S, SenGupta S, Mondal S. Development and characterization of carbonic anhydrase-based CO₂ biosensor for primary diagnosis of respiratory health [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(5): 1384-1390.
- [10] Cao H, Hsu L C, Ativanichayaphong T, et al. A non-invasive and remote infant monitoring system using CO₂ sensors[C]//2007 IEEE Sensors, October 28-31, 2007, Atlanta, GA, USA. New York: IEEE, 2007: 989-992.
- [11] Zare R N, Kuramoto D S, Haase C, et al. High-precision optical measurements of ¹³C/¹²C isotope ratios in organic compounds at natural abundance[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(27): 10928-10932.
- [12] Wang Z, Wang Q, Ching J Y L, et al. A portable low-power QEPAS-based CO₂ isotope sensor using a fiber-coupled interband cascade laser[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 246: 710-715.
- [13] Lu H, Zhang G, Zhang G X, et al. Study on simultaneous detection of CO₂ and H₂O based on TDLAS [J]. *Jiangsu Science & Technology Information*, 2018, 35(5): 41-43.
陆恒, 张刚, 张国贤, 等. 基于 TDLAS 的二氧化碳和水汽同时检测技术研究[J]. *江苏科技信息*, 2018, 35(5): 41-43.
- [14] Dong L, Tittel F K, Li C G, et al. Compact TDLAS based sensor design using interband cascade lasers for mid-IR trace gas sensing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): A528-A535.
- [15] Nie W, Kan R F, Yang C G, et al. Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0911001.
聂伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0911001.
- [16] Lan L J, Chen J, Wu Y C, et al. Self-calibrated multiharmonic CO₂ sensor using VCSEL for urban in situ measurement [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(4): 1140-1147.
- [17] Lu W Y, Zhu X R, Li Y S, et al. Comparison of direct absorption and wavelength modulation methods for online measurement of CO₂ by TDLAS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0717002.
卢伟业, 朱晓睿, 李越胜, 等. TDLAS 直接吸收法和波长调制法在线测量 CO₂ 的比较[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(7): 0717002.
- [18] 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.
- [19] Cui R Y, Dong L, Wu H P, et al. Highly sensitive and selective CO sensor using a 2.33 μm diode laser and wavelength modulation spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 24318-24328.
- [20] Azhar M, Mandon J, Neerincx A H, et al. A widely tunable, near-infrared laser-based trace gas sensor for hydrogen cyanide (HCN) detection in exhaled breath [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(11): 268.
- [21] Guo X Q, Zheng F, Li C L, et al. A portable sensor for in situ measurement of ammonia based on near-infrared laser absorption spectroscopy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 115: 243-248.
- [22] Li J D, Du Y J, Peng Z M, et al. Measurements of spectroscopic parameters of CO₂ transitions for Voigt, Rautian, Galatry and speed-dependent Voigt profiles near 1.43 μm using the WM-DAS method [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 224: 197-205.
- [23] Pogány A, Wagner S, Werhahn O, et al. Development and metrological characterization of a tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) spectrometer for simultaneous absolute measurement of carbon dioxide and water vapor [J]. *Applied Spectroscopy*, 2015, 69(2): 257-268.
- [24] 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.
- [25] Ghorbani R, Schmidt F M. ICL-based TDLAS sensor for real-time breath gas analysis of carbon monoxide isotopes [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12743-12752.