

近红外激光二氧化碳传感系统的研制及应用

李亚飞^{1,2}, 刘志伟^{1,2}, 张天羽^{1,2}, 郑传涛^{1,2*}, 王一丁^{1,2}

¹ 吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012;

² 吉林省红外气体传感技术工程研究中心, 吉林 长春 130012

摘要 采用可调谐激光二极管吸收光谱技术, 研制了一种近红外激光二氧化碳(CO₂)传感系统。该系统包含中心波长为 1572 nm 的分布反馈激光器、密集光斑型气室和铟镓砷探测器, 利用 LabVIEW 程序提取二次谐波信号幅值并反演了 CO₂ 浓度。为了表征传感器性能, 利用该系统开展了气体检测实验。结果显示, 当调制深度为 0.32 cm⁻¹ 时, 二次谐波信号的幅值最大; 在体积分数为 0~3% 范围内, 二次谐波信号的幅值与 CO₂ 浓度具有较高的线性度(拟合优度为 0.999); 当 CO₂ 体积分数为 0 时, 连续测试 1 h, 反演得到的浓度波动范围为 $-2 \times 10^{-4} \sim 1.17 \times 10^{-4}$; 当积分时间为 297 s 时, 系统的灵敏度检测下限为 2.7×10^{-6} ; 考虑动态配气时气体的扩散时间, 系统的响应时间为 40~42 s; 连续 15 h 测量室内大气中 CO₂ 浓度, 测得的 CO₂ 平均体积分数约为 $(560 \pm 46) \times 10^{-6}$ 。与已经报道的传感器相比, 该气体传感系统呈现出类似的品质因数, 可在工农业生产、环境保护等领域得到一定的推广和应用。

关键词 激光光学; 传感器; 红外吸收光谱; 可调谐激光二极管吸收光谱; 气体检测

中图分类号 TN21

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0514003

Development and Application of Near-Infrared Laser Carbon Dioxide Gas Sensor System

Li Yafei^{1,2}, Liu Zhiwei^{1,2}, Zhang Tianyu^{1,2}, Zheng Chuantao^{1,2*}, Wang Yiding^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;

² Jilin Provincial Engineering Research Center of Infrared Gas Sensing Technique, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract A near-infrared laser carbon dioxide (CO₂) sensor system is developed using tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS). The system consists of a distributed feedback laser with a central wavelength of 1572 nm, a dense spot-type gas chamber, and an indium gallium arsenic detector. LabVIEW program is used to extract the amplitude of the second harmonic signal and the CO₂ concentration is inverted. In order to characterize the sensor performance, gas detection experiments are carried out by using the system. The results show that, when the modulation depth is 0.32 cm⁻¹, the amplitude of the extracted second harmonic signal is the largest. In the volume fraction range of 0~3%, the amplitude of the second harmonic signal has a high linearity with the CO₂ concentration (the goodness of fit is 0.999). When the volume fraction of CO₂ is 0, the retrieved concentration fluctuation range is $-2 \times 10^{-4} \sim 1.17 \times 10^{-4}$ after continuous test for 1 h. When the integral time is 297 s, the lower limit of sensitivity detection of the system is 2.7×10^{-6} . Considering the gas diffusion time during dynamic gas distribution, the response time of the system is 40~42 s. The CO₂ concentration in the atmosphere is measured continuously for 15 h, and the average CO₂ volume fraction measured is about $(560 \pm 46) \times 10^{-6}$. Compared with the reported sensors, the gas sensing system presents similar quality factors and can be popularized and applied in industrial and agricultural production, environmental protection and other fields.

Key words laser optics; sensor; infrared absorption spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; gas detection

OCIS codes 140.5960; 140.3070; 300.6250; 260.3060

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2019-10-22; 录用日期: 2019-11-27

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0303902)、国家自然科学基金(61775079, 61627823, 61960206004)、吉林省重点科技研发计划项目(20180201046GX, 20190101016JH)

* E-mail: zhengchuantao@jlu.edu.cn

1 引 言

二氧化碳(CO₂)气体浓度的实时监测和控制环境保护、工农业生产等方面得到越来越多的应用^[1]。造成温室效应的主要因素是传统化石能源燃烧所排放的CO₂气体,温室效应对环境和气候变化的影响越来越明显,如加剧海平面的上升、造成气候反常^[2]。CO₂是植物光合作用的主要原料,光合速率与CO₂的浓度呈一定的关系,实时监测和控制CO₂气体浓度能保证植物以理想的光合速率生长,提高质量和产量^[3]。另外,工业生产中也会大量排放CO₂气体,需要对其进行实时监测并减少排放量。因此,监测与控制CO₂气体浓度不仅在环境保护方面起到积极作用,还在工农业生产方面意义深远^[4]。研制一种稳定性好、精确度高、响应时间短的CO₂传感系统具有重要的研究意义和实际应用价值^[5]。

目前,检测CO₂气体的传感器主要是有气相色谱法传感器、催化燃烧传感器、半导体传感器、固体电解质传感器、电化学传感器等。相对于这些传感器,红外气体传感器因其选择性好、测量精度高、响应时间短等特点得到了越来越多的应用^[6]。近年来,随着红外气体传感领域的发展,相关传感器的研制和开发取得了显著的成果^[7]。一种用于测量燃烧流中H₂O、CO₂、CO和温度的四色单端中红外可调激光吸收传感器结构被提出,这是在燃烧流中使用单端结构中红外激光吸收传感器的首次演示^[8]。2019年,一种新型非分散红外CO₂检测热释电装置被提出^[9]。虽然国内对红外传感器的研究起步较晚,但也得到了一定的发展。吴涛等^[10]提出一种基于2.73 μm分布反馈式激光器的呼出气体检测装置,用于临床呼出气体中CO₂和水汽的检测,该装置在临床上具有良好的应用前景。蒋利军等^[11]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,在工业现场检测方面具有良好的应用前景。Liu等^[12]开发了一种用于检测海水溶解CO₂的中红外传感器系统,该传感器系统在深海天然气水合物勘探中具有潜在应用。

因此,红外气体检测技术不论是在工业生产还是在替代传统气体检测技术方面都具有明显的优势。鉴于此,基于红外吸收光谱原理,采用可调谐激光二极管吸收光谱技术(TDLAS)设计了一种近红外激光CO₂检测系统。选择合适的CO₂气体吸收

线,利用分布反馈(DFB)激光器的波长可调谐特性,调节激光器中心波长使其扫过CO₂气体吸收峰^[13]。选用小型密集光斑型气室减小系统的体积,激光器发出的光束在气室中经过多次反射,与待测气体相互作用,最后会聚到钢镓砷探测器以实施探测。优化光路结构及调制深度以获得最佳的传感性能,并开展气体实验,研究传感器性能。

2 传感器系统的设计与优化

2.1 系统结构设计

所设计的近红外激光CO₂传感系统结构如图1所示,主要包括光学部分和电学部分。在光学部分中,CO₂气体分子在1572 nm处具有吸收特性,以此作为气体吸收的中心波长;采用中心波长为1572 nm的分布反馈激光器作为光源,激光器发出的红外光通过入射光纤被准直并耦合进密集光斑型气室;所用气室为赫里奥特气室,物理尺寸为290 mm×90 mm×80 mm,有效光程为16 m,气室的自身损耗(包括耦合损耗以及多次反射损耗)为10 dB,工作温度范围为0~40 ℃;出射光束被抛物聚光镜会聚并耦合进入出射光纤,最后会聚到钢镓砷探测器,探测器再把光信号转换为电信号输出到数据采集卡。在电学部分中,使用集成有温度控制器和电流驱动器的紧凑型激光驱动器来稳定激光器温度并为激光器提供电流,用LabVIEW产生5 Hz的锯齿波并叠加5 kHz的正弦波控制数据采集卡产生激光器的驱动信号和扫描信号^[14],探测器输出的电信号通过数据采集卡后被送入到含LabVIEW程序的计算机中,然后用正交锁相放大的方法来提取二次谐波信号并存储其峰值^[15]。

2.2 CO₂吸收线的选择

CO₂分子在近红外波段的吸收线强度非常弱,整个实验过程中要考虑避免其他分子(如H₂O)的吸收干扰^[16]。依据HITRAN数据库,选择1572 nm附近相对吸收较强的吸收线;波数为6359.96 cm⁻¹(线强为1.77×10⁻²³ cm·molecular⁻¹)^[16-17],如图2(a)所示。由图2(b)可以看出,在光学长度为16 m,温度为25 ℃,1个大气压条件下,体积分数为2×10⁻²的H₂O的吸收强度远远低于体积分数为5000×10⁻⁶的CO₂的吸收强度,对CO₂的检测没有影响,因此可以忽略。激光器的中心波长为6359.96 cm⁻¹,选择其波长扫描范围为6359.2~6360.7 cm⁻¹,吸收线的宽度为0.15 cm⁻¹,由图2(b)可以确定驱动电流的范围为38~81 mA。

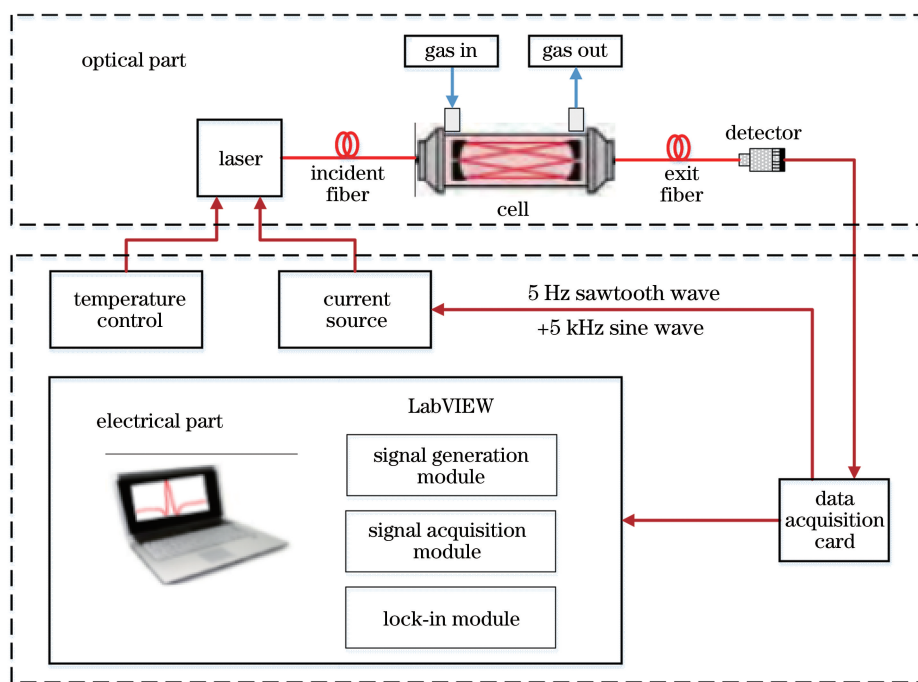


图 1 近红外激光 CO₂ 传感系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of near-infrared CO₂ sensor system

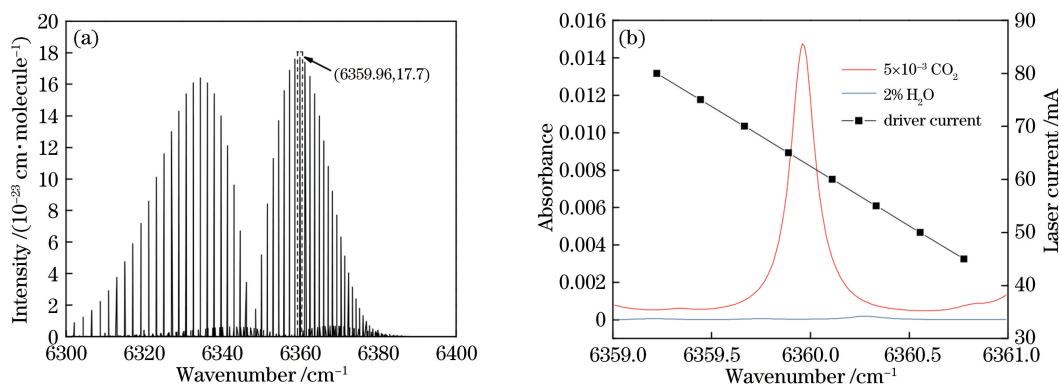


图 2 CO₂ 吸收线的选择。(a) CO₂ 的吸收光谱曲线；(b) CO₂ 和 H₂O 的吸光度，以及工作温度为 28 °C 时发射波数和驱动电流的关系曲线

Fig. 2 Selection of CO₂ absorption line. (a) Absorption spectra of CO₂; (b) absorbance of CO₂ and H₂O, and driver current as a function of laser emission wavenumber at operation temperature of 28 °C

2.3 调制深度的优化

在理论上，调制深度为所选吸收线半峰全宽的 1.1 倍才能达到一个最大的谐波信号幅值（定义为气体吸收峰处二次谐波信号与基线信号的差值），为了获得最佳的传感性能，应确定一个合适的调制深度^[17]。如图 3 所示，为了增加二次谐波信号的信噪比，将体积分数为 2×10^{-3} CO₂ 气体通入气室中，然后提取二次谐波信号幅值。调制深度决定了二次谐波信号的幅值，通过优化调制深度，可以获得最大的幅值，在该幅值处的调制深度即为最优调制深度。本文采用的采集卡的量程为 ± 10 V，应用该采集卡

对电压范围为 200~300 mV 的探测器输出的吸收信号进行采样。针对采集得到的吸收信号，利用 LabVIEW 进行锁相放大处理，最终得到二次谐波信号，并计算其幅值。从图 3 可以看出，当调制深度为 0.32 cm^{-1} 时，二次谐波信号幅值最大，则最优的调制深度为 0.32 cm^{-1} ，此时，最大谐波信号幅度是 0.00041 V。需要说明的是，本文得到的 0.00041 V 是 LabVIEW 程序对吸收信号进行锁相放大等处理后得到的原始数值，该数据处理结果可能与实际值存在差异。通过设定正弦波调制信号的幅值，即可得到此最优调制深度；根据激光器电压-电流-波数

的换算关系,可以得到正弦波调制信号的幅值为 0.46 V。

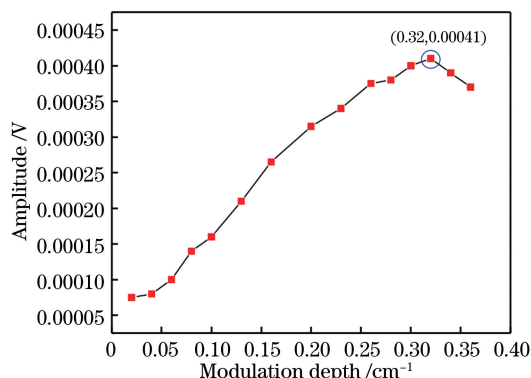


图 3 CO₂体积分数为 2×10^{-3} 时调制深度和二次谐波信号幅值的关系曲线

Fig. 3 Relationship between modulation depth and amplitude of second harmonic signal at CO₂ volume fraction of 2×10^{-3}

3 系统性能测试

3.1 CO₂ 气体标定实验

利用 Environics 公司的 Series4000 配气系统,采用动态配气法配置了体积分数分别为 0, 0.2×10^{-3} , 0.5×10^{-3} , 0.800×10^{-3} , 1.2×10^{-3} , 1.6×10^{-3} , 2×10^{-3} , 2.5×10^{-3} 和 3×10^{-3} 的 CO₂, 将其依次通入气室中,利用正交锁相技术提取二次谐波信号的幅值,每种浓度的气体测试 5 min,测试结果如图 4 所示。

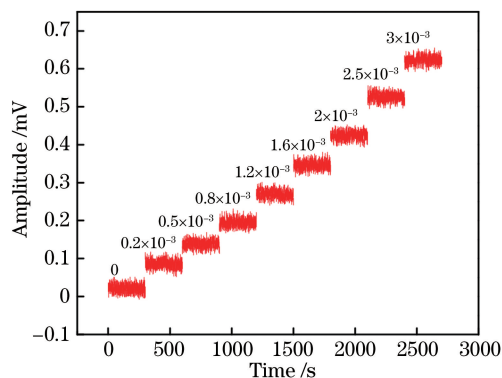


图 4 不同浓度 CO₂ 气体下提取的二次谐波信号幅值与时间的关系图

Fig. 4 Relationship between amplitude of second harmonic signal and measurement time for different CO₂ concentration

对每种浓度气体样品的二次谐波信号幅值进行平均处理,如图 5 所示,拟合出二次谐波信号幅值 Amp(2f)和气体浓度 C (10^{-6}) 之间的关系,得到的

拟合关系式为

$$A_{\text{Amp}(2f)} = 1.95802 \times 10^{-4} C + 0.03561, \quad (1)$$

式中: $A_{\text{Amp}(2f)}$ 为二次谐波信号幅值。拟合优度 $R^2 = 0.999$ 。

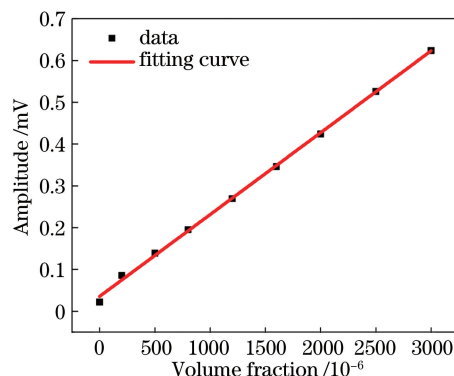


图 5 二次谐波信号幅值与气体体积分数的拟合关系曲线
Fig. 5 Fitting curve between volume fraction of gas and amplitude of second harmonic signal

3.2 稳定性测试及艾伦方差

稳定性主要是反映传感器在一段时间内保持性能参数的能力^[18]。为了测试该传感系统的稳定性,向气室中通入体积分数为 0 的 CO₂ 气体(即纯氮气),这样可以减小配气产生的系统浓度波动,另外可利用氮气环境下传感器的输出结果来预测系统的检测下限。系统采样时间设置为 1 s,用正交锁相的方法提取二次谐波信号的幅值,并根据(1)式将二次谐波的幅值转换为气体的浓度值,连续测试 1 h。从图 6 结果可以看出,在 CO₂ 体积分数为 0 时,测试的浓度波动范围为 $-2 \times 10^{-4} \sim 1.17 \times 10^{-4}$ 。

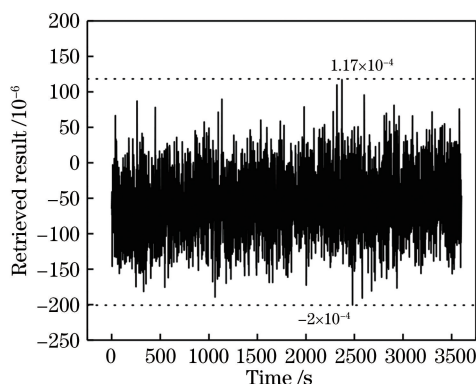


图 6 CO₂ 体积分数为 0 时反演结果随时间的变化曲线
Fig. 6 Retrieved result versus time when volume fraction of CO₂ is 0

为了进一步分析系统的稳定性,引入了艾伦方差。艾伦方差不仅是检测系统稳定性的重要指标,同时也可以预测系统的检测下限^[18-19]。由图 7 可以看出,积分时间为 1 s 时,艾伦方差为 $1916.5 \times$

10^{-12} , 检测系统的灵敏度检测下限为 43.8×10^{-6} 。随着积分时间的增加, 系统的稳定性更好, 检测下限降低, 当积分时间等于 297 s 时, 系统的最低灵敏度检测下限为 2.7×10^{-6} 。这是因为增加积分时间可以有效降低高斯噪声, 进而降低检测下限并提高系统稳定性。

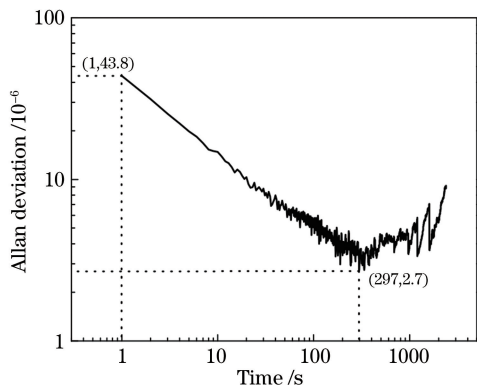


图 7 近红外 CO₂ 传感器的 Allan 标准差曲线

Fig. 7 Allan deviation curve of near-infrared CO₂ sensor

3.3 响应时间测试

一般把实际测试时间的 10%~90% 定义为系统的响应时间, 该时间取决于气室结构、气体流速和处理器处理数据的速度^[19]。为了测试系统的响应时间, 采用动态配气的方法依次向气室中通入 0、 0.5×10^{-3} 、 1.5×10^{-3} 、 1×10^{-3} 、0 的 CO₂ 气体样品, 气体流速为 $1800 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 检测结果稳定后均保持 300 s。实验结果如图 8 所示, 可以看出, 系统的响应时间 t 为 40~42 s。实际测得的响应时间包含了配气系统的时间, 同时由于配气过程(从配气开始到稳定输出)较长, 传感器响应时间变长。

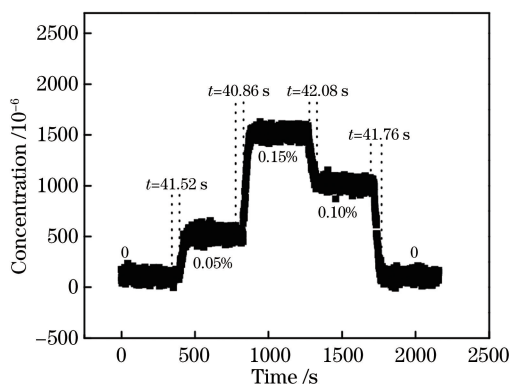


图 8 测得的传感器响应时间曲线

Fig. 8 Measured response time curve of sensor

3.4 误差来源及分析

传感器的测量精度主要取决于采集的误差, 该误差与探测器的输出信号幅值范围、采集卡量程、分辨率有关。探测器输出的吸收信号的幅值范围为

200~300 mV。本文采集卡的量程为 $\pm 10 \text{ V}$ 、分辨率为 16 位。若想降低采集卡误差对检测性能的影响, 可行的办法是对探测器输出信号进行调整, 使其幅值范围与采集卡量程相匹配, 此时可最大程度地降低采样误差, 提高分辨率。若增大气体浓度测量范围, 由于气体浓度增大, 仅吸收峰处探测器输出信号下降, 而吸收信号的幅度范围不会受影响, 即在利用该采集卡采样时, 并不能改变采集卡的误差, 从而并不能从根本上提高测量精度。

3.5 对比分析

通过与已经报道的近红外 CO₂ 传感器作对比, 可以评估本文中传感器的性能。定义品质因数 (FOM) = 灵敏度 (σ) × 光程 (L)。对比结果如表 1 所示。本文气体传感器的品质因数为 $700.80 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。Asakawa 等^[20] 报道的近红外 CO₂ 传感器在光程为 29.91 m 时系统的灵敏度为 26×10^{-6} 。Li 等^[21] 报道的近红外 CO₂ 传感器在光程为 55.1 m 时的灵敏度为 7.5×10^{-6} 。通过对比可以看出, 本文报道的传感器具有类似的品质因数。

表 1 三个近红外 CO₂ 传感器的性能比较

Table 1 Performances of three near-infrared

CO₂ sensors

Sensor	$\sigma / 10^{-6}$	L / m	FOM / (10^{-6} m)
Sensor in Ref. [20]	26.0	29.91	777.66
Sensor in Ref. [21]	7.5	55.10	413.25
Proposed sensor	43.8	16.00	700.80

4 大气 CO₂ 浓度测量

在实验室环境下, 利用该近红外激光 CO₂ 传感系统, 从第一天晚上 19:00 到第二天上午 10:00 连续 15 h 观测了大气中 CO₂ 浓度, 如图 9 所示。在 19:00—22:00 期间, 由于晚上实验室人员较多, 观测的 CO₂ 浓度值较高, 在 22:00—10:00 实验室人员较少, 观测值趋于平稳, 然后在 02:00 左右对着气室的入气口人工吹气, 在吹气之前考虑到水汽、吹气不稳等因素, 在入气口前加了一个干燥管, 防止水汽冷凝到镜片影响光路。此时观测的 CO₂ 体积分数增大到 5×10^{-2} , 最后测得的 CO₂ 平均体积分数约为 $(560 \pm 46) \times 10^{-6}$ 。在未来的研究工作中, 为了提升大气 CO₂ 浓度的检测精度, 针对该近红外 CO₂ 传感系统, 可以进一步降低光学噪声、增大光程; 或者研制中红外激光 CO₂ 传感器, 利用 CO₂ 在中红外波段更强的吸收特性, 提高灵敏度。

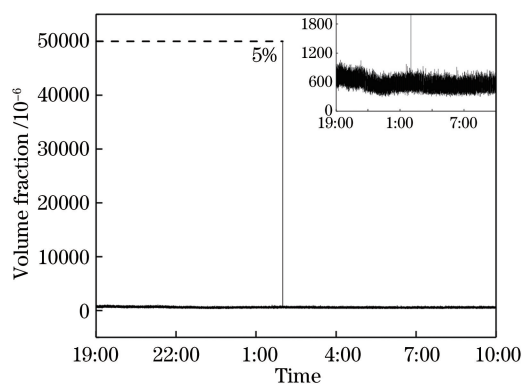


图9 实验室环境下观测到的CO₂浓度值

Fig. 9 Observed CO₂ concentration in laboratory environment

5 结 论

根据CO₂气体分子在近红外波段的吸收特性,利用DFB激光器和密集光斑型气室研制了一种近红外激光CO₂传感系统。利用该系统开展了CO₂气体实验,实验结果表明:当调制深度为0.32 cm⁻¹时,提取的二次谐波信号的幅值最大为0.00041 V;在0~3000×10⁻⁶体积分数范围内,二次谐波信号的幅值与CO₂气体浓度具有较高的线性度(拟合优度为0.999);当CO₂体积分数为0时,连续测试1 h的浓度波动范围为-2×10⁻⁴~1.17×10⁻⁴;当积分时间为297 s时,系统的灵敏度检测下限为2.7×10⁻⁶;考虑动态配气时气体的扩散时间,系统的响应时间为40~42 s;利用该气体检测系统在实验室环境下连续15 h测量大气中的CO₂浓度,测量的CO₂平均体积分数约为(560±46)×10⁻⁶。与已经报道的传感器相比,该气体传感系统呈现出类似的品质因数,且已经初步应用于室内大气CO₂浓度检测。在未来研究工作中,可对该传感器系统进行适当的工业化设计,使其能应用于工农业生产、环境保护等领域。

参 考 文 献

- [1] Sur R, Sun K, Jeffries J B, et al. Multi-species laser absorption sensors for *in situ* monitoring of syngas composition[J]. Applied Physics B, 2014, 115(1): 9-24.
- [2] Zheng C T, Ye W L, Li G L, et al. Performance enhancement of a mid-infrared CH₄ detection sensor by optimizing an asymmetric ellipsoid gas-cell and reducing voltage-fluctuation: theory, design and experiment[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 160(1): 389-398.
- [3] Li B, He Q X, Fu Y, et al. Development of near

infrared distributed feedback laser temperature control system for CO detection [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s214002.

李彬, 何启欣, 付洋, 等. 用于CO气体检测的近红外分布式反馈激光器温控系统[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s214002.

- [4] Dang J M, Fu L, Yan Z H, et al. A review of mixed gas detection system based on infrared spectroscopic technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(10): 2851-2857.
党敬民, 付丽, 闫紫微, 等. 基于红外光谱技术的混合气体检测系统概述[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2851-2857.
- [5] He Q X, Zheng C T, Liu H F, et al. A near-infrared acetylene detection system based on a 1.534 μm tunable diode laser and a miniature gas chamber[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 75: 93-99.
- [6] Chen K W, Zhang X W, Zhao Z Q, et al. Big bore and extremely flexible mid-infrared hollow waveguide for gas absorption module[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285: 45-49.
- [7] Chen C, Dang J M, Huang J Q, et al. DFB laser temperature control system with high stability and strong robustness [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(4): 1004-1010.
陈晨, 党敬民, 黄渐强, 等. 高稳定、强鲁棒性DFB激光器温度控制系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(4): 1004-1010.
- [8] Peng W Y, Goldenstein C S, Spearrin M, et al. Single-ended mid-infrared laser-absorption sensor for simultaneous *in situ* measurements of H₂O, CO₂, CO, and temperature in combustion flows [J]. Applied Optics, 2016, 55(33): 9347-9359.
- [9] Wilson D, Phair J W, Lengden, M. Performance analysis of a novel pyroelectric device for non-dispersive infra-red CO₂ detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(15): 6006-6011.
- [10] Wu T, Zhang H L, Kong W P, et al. Simultaneous on-line measurement of exhaled carbon dioxide and water vapor based on 2.73 μm distributed feedback laser [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1230001.
吴涛, 张怀林, 孔维平, 等. 基于2.73 μm分布反馈式激光器同时在线测量呼出气体中的CO₂和水汽[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1230001.
- [11] Jiang L J, Qiu X B, Zhou Q H, et al. Compact acetylene detecting system based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 033002.
蒋利军, 邱选兵, 周庆红, 等. 基于可调谐半导体激

- 光吸收光谱的小型化 C_2H_2 测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 033002.
- [12] Liu Z W, Zheng C T, Chen, et al. ICL-based mid-infrared carbon dioxide sensor system for deep-sea natural gas hydrate exploration[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5598-5609.
- [13] Yu X, Gao Z L, Song N, et al. Design and experiment of pocket infrared gas detector[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(1): 0104001.
于鑫, 高宗丽, 宋楠, 等. 袖珍式红外瓦斯检测仪的设计与实验[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 0104001.
- [14] Zheng C T, Ye W L, Huang J Q, et al. Performance improvement of a near-infrared CH_4 detection device using wavelet-denoising-assisted wavelength modulation technique[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 190: 249-258.
- [15] Li J S, Parchatka U, Fischer H. Development of field-deployable QCL sensor for simultaneous detection of ambient N_2O and CO [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 182: 659-667.
- [16] Dang J M. Study on quantum cascade laser based detection system for carbon monoxide [D]. Changchun: Jilin University, 2016: 1-144.
党敬民. 基于 QCL 的红外一氧化碳检测系统研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016: 1-144.
- [17] Xie K H, Zhang X, Zhang X W, et al. A slot microring sensor with feedback spiral waveguide for trace gas CH_4 sensing in mid-infrared region[J]. Optoelectronics Letters, 2019, 15(1): 1-5.
- [18] Huang S H, Huang Y J, Chui H C. Trace methane sensor using mid-infrared light emitting diode in hollow-core fiber [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 282: 599-602.
- [19] Pi M Q, Zheng C T, Bi R, et al. Design of a mid-infrared suspended chalcogenide/silica-on-silicon slot-waveguide spectroscopic gas sensor with enhanced light-gas interaction effect[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 297: 126732.
- [20] Asakawa T, Kanno N, Tonokura K. Diode laser detection of greenhouse gases in the near-infrared region by wavelength modulation spectroscopy: pressure dependence of the detection sensitivity[J]. Sensors, 2010, 10(5): 4686-4699.
- [21] Li C L, Shao L G, Jiang L J, et al. Simultaneous measurements of CO and CO_2 employing wavelength modulation spectroscopy using a signal averaging technique at $1.578 \mu m$ [J]. Applied Spectroscopy, 2018, 72(9): 1380-1387.