

文章编号 1004-924X(2018)08-1876-06

## 应用于早期火灾探测的 CO 传感器

党敬民<sup>1</sup>, 于海业<sup>1</sup>, 宋芳<sup>2</sup>, 王一丁<sup>2</sup>, 孙裕晶<sup>1\*</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 为了实现对火灾的早期探测, 设计了一种高精度、高灵敏度 CO 传感器。该传感器以激光波长的为  $2.33\ \mu\text{m}$  的连续型分布反馈激光器为光源。采用波长调制光谱(WMS)技术与一次谐波量化的二次谐波检测方法相结合的研究手段, 对典型环境压力下复杂、重叠的光谱吸收特征进行分离, 从而实现了良好的选择性和较高的灵敏度。基于 Allan Werle 方差的系统长期稳定性评估分析表明, 系统的检测限(LoD)为  $1.18\ \mu\text{L/L}$ ; 当积分时间达到 205 s 时, 系统能够实现  $0.08\ \mu\text{L/L}$  的测量精度。最后, 纸、棉花以及松木等容易产生阴燃的可燃物燃烧实验表明, 所研制的传感器具有良好的早期火灾探测能力。

**关键词:** 火灾探测; 一氧化碳(CO); 分布反馈激光器; 波长调制光谱

**中图分类号:** TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182608.1876

## Development of a CO sensor for early fire detection

DANG Jing-min<sup>1</sup>, YU Hai-ye<sup>1</sup>, SONG Fang<sup>2</sup>, WANG Yi-ding<sup>2</sup>, SUN Yu-jing<sup>1\*</sup>

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding author, E-mail: syj@jlu.edu.cn

**Abstract:** A high-precision, high-sensitivity carbon monoxide (CO) sensor was developed for early fire detection. This sensor relied on a continuous wave distributed feedback (DFB) laser emitting at a wavelength of approximately  $2.33\ \mu\text{m}$  as an excitation source. A  $2f/1f$  Wavelength Modulation Spectroscopy (WMS) strategy was adopted to isolate complex, overlapping spectral absorption features associated with ambient pressure and to achieve excellent specificity and high detection sensitivity. Allan-Werle deviation analysis was used to evaluate the long-term performance of the CO sensor system. A Limit of Detection (LoD) of 1.18 parts per million by volume ( $\mu\text{L/L}$ ) was achieved with a measurement precision of  $0.08\ \mu\text{L/L}$  for an optimal integration time of  $\sim 205\ \text{s}$ . The early fire detection of paper, cotton, and pine wood was conducted in the field, which verified the reliable and robust operation of the developed sensor.

**Key words:** fire detection; carbon monoxide; Distribution Feedback (DFB) laser; Wavelength Modulation Spectroscopy (WMS)

收稿日期: 2018-04-18; 修订日期: 2018-06-01.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFD0700101, No. 2016YFC0303902, No. 2017YFB0402800); 国家自然科学基金资助项目(No. 61775079, No. 61627823, No. 61307124)

## 1 引言

尽管火灾传感器已广泛应用于工业和居住环境,火灾每年仍会造成众多人身伤亡和巨大经济损失<sup>[1]</sup>。目前,利用光散射技术探测烟雾气溶胶的火灾传感器大多存在无烟火失效、响应时间长、误报率高等缺陷<sup>[2]</sup>。

近年来的研究表明,火灾燃烧过程中产生的多种气体(如 CO、CO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 等)可以作为火灾探测的标志<sup>[3]</sup>。CO 具有的阴燃燃烧释放量高(浓度高达 %量级)以及空气中存在量低(浓度低至 0.1 μL/L 量级)等特点,使其在火灾探测中具有不可替代的作用<sup>[4]</sup>。金属氧化物以及电化学等类型的 CO 传感器通常存在寿命短、需要定期校准、交叉干扰(主要是还原性气体)等问题。与这些 CO 传感器不同,基于激光吸收光谱的 CO 传感器具有结构紧凑、响应速度快、长期稳定、选择性好、灵敏度高等优点<sup>[5-6]</sup>。

波长在 1.5 μm 附近的激光器具有成本低、线宽窄以及使用寿命长等优势<sup>[7-8]</sup>,当前大多数激光 CO 传感器采用此波段的激光器作为光源。Chen 等利用波长为 1 565.5 nm 的分布反馈激光器和光程为 20 m 的多通气体吸收池设计 CO 气体传感器对火灾进行检测,在温度和压强分别为 300 K 和 15 kPa 的条件下,实现了约 5 μL/L 的检测灵敏度<sup>[9]</sup>。Jiang 等研制了一款基于 1 580 nm 分布反馈激光器的火灾检测系统,结合光程为 100 m 的多通气体吸收池,在常温常压下对 CO 达到了 2 μL/L 的检测下限<sup>[10]</sup>。Wang 等利用波长范围可调(1 520~1 610 nm)的掺钕激光器,并结合光声技术,在常温常压下得到的 CO 噪声等效浓度为 20 μL/L<sup>[3]</sup>。与工作于 1.5 μm 附近通信波段的激光器相比,激射波长处于 2.3 μm 大气窗口附近的激光器,能够匹配吸收更强的 CO 吸收线(通常比 1.5 μm 附近 CO 吸收线高两个数量级),而且受到 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 等空气中常见气体分子的干扰较小。在众多激光光谱技术中,基于谐波检测的波长调制光谱技术,能够分离典型环境压力下复杂、重叠的光谱吸收特征,实现良好的选择性和较高的检测灵敏度,并已广泛应用于气体检测领域<sup>[11-14]</sup>。

本文将 2.33 μm 分布反馈激光器与波长调

制光谱技术相结合,构建了一种用于早期火灾探测的 CO 传感器。

## 2 检测原理

### 2.1 一次谐波量化的二次谐波检测

在波长调制光谱技术中,激光器的驱动电流中介入一个由低频三角波调谐信号和正弦波调制信号叠加而成的混合信号。在该混合信号的一个周期内可以得到以下表达式:

$$f(t) = f_{\text{TRI}}(t) + f_{\text{SIN}}(t), \quad (1)$$

$$v(t) = v_0 + v_m f(t), \quad (2)$$

其中: $f_{\text{TRI}}(t)$ 为周期和幅度分别为  $T_{\text{TRI}}$ 、 $A_{\text{TRI}}$  的三角波信号; $f_{\text{SIN}}(t)$ 为频率、幅度和相位分别为  $f_m$ 、 $A_m$  和  $\varphi(f_m)$  的正弦波信号; $v_0$  为激光器的中心频率; $v_m$  为频率调制系数。

由朗伯比尔定律<sup>[15]</sup>可知,当一束光强为  $I(t)$  的单色光经过一氧化碳分子时,探测器信号  $D(t)$  可表示为:

$$D(t) = \beta\gamma I(t) \exp[-xSL\Psi(T, P, v(t))], \quad (3)$$

其中: $\beta$ 和  $\gamma$  分别为放大倍数和光电转换系数; $x$ 、 $S$ 、 $L$  分别为 CO 浓度、吸收线强度和吸收路径长度; $\Psi(T, P, v(t))$  为与频率相关的线型函数,它与温度和压强有关。在常温常压下, $\Psi(T, P, v(t))$  通常为洛仑兹线型。

经过光电转换和前置放大后,模拟信号  $D(t)$  被转换成数字信号  $D(k)$ 。然后, $D(k)$  同时输入到两个数字正交锁相放大器以抽取一次谐波信号(WMS-1 $f$ )和二次谐波信号(WMS-2 $f$ )。对于 WMS-1 $f$ ,它的两个正交分量可以表示为:

$$D_{1f,\square}(k) = \sum_{n=k-N_{\text{num}}}^k D(n) \sin(2\pi f_m n T_s), \quad (4)$$

$$D_{1f,\diamond}(k) = \sum_{n=k-N_{\text{num}}}^k D(n) \cos(2\pi f_m n T_s), \quad (5)$$

其中: $T_s$  为采样周期, $N_{\text{num}}$  为数值积分周期。进而,WMS-1 $f$  可以表示为:

$$D_{1f}(k) = \sqrt{D_{1f,\square}^2(k) + D_{1f,\diamond}^2(k)}. \quad (6)$$

同样,对于 WMS-2 $f$ ,它的两个正交分量可以表示为:

$$D_{2f,\square}(k) = \sum_{n=k-N_{\text{num}}}^k D(n) \sin(4\pi f_m n T_s), \quad (7)$$

$$D_{2f,\diamond}(k) = \sum_{n=k-N_{\text{num}}}^k D(n) \cos(4\pi f_m n T_s), \quad (8)$$

WMS-2f 可以表示为:

$$D_{2f}(k) = \sqrt{D_{2f,\square}^2(k) + D_{2f,\diamond}^2(k)}. \quad (9)$$

这里, WMS-2f 和 WMS-1f 通常进行除法运算以消除光源光强波动产生的影响<sup>[16]</sup>。其商值与气体浓度的关系如下:

$$\frac{\text{Amp}[D_{2f}(k)]}{\text{Amp}[D_{1f}(k)]} = F(c), \quad (10)$$

其中:  $\text{Amp}[D_{2f}(k)]$  和  $\text{Amp}[D_{1f}(k)]$  分别为 WMS-2f 信号以及 WMS-1f 信号的幅值。函数  $F$  可以从系统校验过程中取得。

## 2.2 谱线选择

在选择气体吸收谱线时通常要考虑所用激光器的波长与目标气体是否匹配以及其它气体是否干扰等问题<sup>[16]</sup>。图 1 所示为 CO、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O 和 N<sub>2</sub>O 等气体分子在 2.331~2.334 μm 波长内的吸收情况。

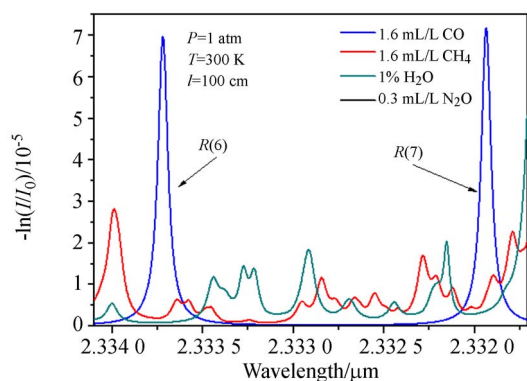


图 1 2.331~2.334 μm 光谱内, CO、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O 和 N<sub>2</sub>O 等气体分子在常温常压下的模拟吸收谱线

Fig. 1 Simulated detectable absorption lines of CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub>O, etc. with concentration at room temperature and atmospheric pressure in range of 2.331 μm to 2.334 μm

由图 1 可知, 在这个光谱范围内有两条 CO 吸收谱线, 即 R(6) 和 R(7), 它们都与我们使用的激光器匹配。此外还可以看出, 主要干扰气体为 CH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub>O。对于位于 2.331 μm 处的 CO 的 R(7) 吸收谱线, CH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的影响都较为严重。比较而言, H<sub>2</sub>O 对 CO 的 R(6) 吸收谱线的影响微乎其微, CH<sub>4</sub> 虽然有一定影响, 但是它的吸收比

CO 弱一个数量级。此外, 实际火灾中 CO 的浓度要远高于图 1 中的浓度<sup>[4]</sup>。综上所述, CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O 和 N<sub>2</sub>O 等气体的影响可以忽略。最后, 本文选择位于 2.334 μm 处的 R(6) 作为常温常压下检测 CO 浓度的最佳谱。

## 3 实验结果及分析

针对所设计的早期火灾传感器系统, 这里分别进行了系统校验、系统稳定性测试以及早期火灾探测等实验工作。

### 3.1 系统校验

为了进行系统校验, 本文利用体积浓度为 100 μL/L 的 CO 标准气、N<sub>2</sub> 纯气, 并结合 Environics 公司的 4040 配气系统, 产生 0~100 μL/L 不同浓度的 CO 气体。图 2 为不同浓度 CO 气体对应的 WMS-1f 信号和 WMS-2f 信号。

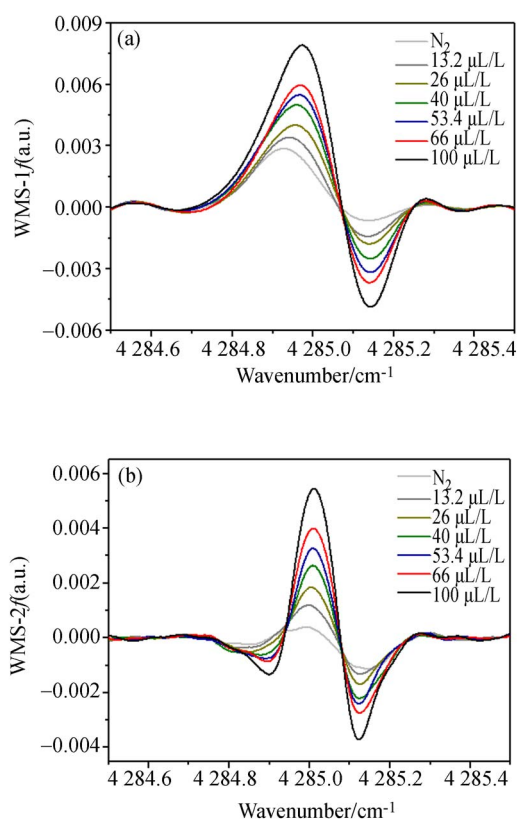


图 2 0~100 μL/L 浓度内, 不同浓度的 CO 对应的 (a) WMS-1f 信号和 (b) WMS-2f 信号

Fig. 2 Extracted (a) WMS-1f and (b) WMS-2f signals within CO concentration range of 0~100 μL/L

图 3(a)为一次谐波量化的二次谐波幅度与相应浓度的线性关系。在进行线性回归分析后,校验  $R^2$  值约为 0.998,这表明系统具有良好的线性响应。另外,从图 3(b)可以看出,CO 浓度的校验值与测量值之间的相对偏差小于 0.01%。

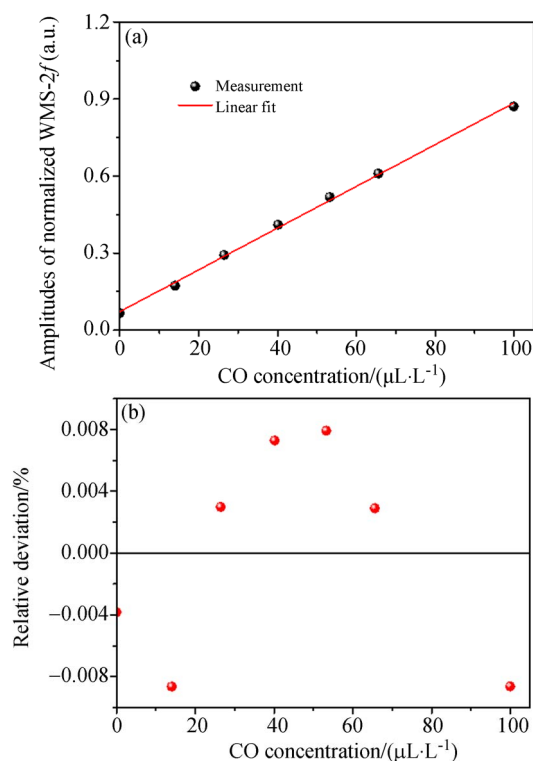


图 3 (a) 一次谐波量化的二次谐波幅度与相应浓度之间的关系;(b) CO 浓度校验值与测量值之间的相对偏差

Fig. 3 (a) Amplitudes of normalized WMS-2f with corresponding CO concentration levels; (b) Relationship between calibrated CO concentration and measured values

### 3.2 系统稳定性

本文利用艾伦方差<sup>[17]</sup>对 CO 传感器系统的稳定性进行了分析。实验中,使浓度为  $31.8 \mu\text{L}/\text{L}$  的 CO 标准气持续通过多通气体吸收池,通气时间为 1 h。传感器系统测得的 CO 浓度随时间的变化如图 5 上半部分所示。在整个测量周期内,浓度的均方根为  $1.21 \mu\text{L}/\text{L}$ ,这相当于测量浓度的 3.8%。图 4 下半部分所示为艾伦偏差的变化情况。从图中可知,系统的检测限(LoD)为  $1.18 \mu\text{L}/\text{L}$ ;当积分时间达到 205 s 时,系统能够实现  $0.08 \mu\text{L}/\text{L}$  的测量精度。从图 4 还可以看

出,当系统漂移占主导时,艾伦偏差随积分时间的增加而减小。在这种情况下,可以通过增加积分时间来提高系统的检测灵敏度,但是也会导致系统的响应时间变长。

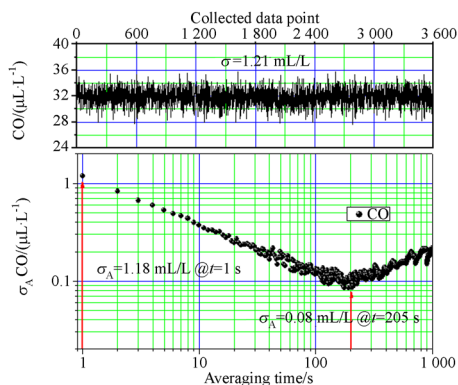


图 4 以 1 Hz 的采样率测量一确定浓度(约为  $31.8 \mu\text{L}/\text{L}$ ) 的 CO 标准气以及对应的艾伦偏差的变化情况

Fig. 4 Allan deviation plot acquired from series of measurements on a certified CO sample ( $\sim 31.8 \mu\text{L}/\text{L}$ ) with 1 Hz sampling rate

### 3.3 早期火灾探测

为了验证所研制的火灾传感器的实际应用能力,对纸、棉花以及松木等 3 种可燃物燃烧过程产生的 CO 进行了测量。将  $0.55 \text{ g}$  碎纸、 $0.53 \text{ g}$  棉花以及  $0.58 \text{ g}$  松木先后置于加热器上进行加热,利用真空泵以  $40 \text{ L}/\text{min}$  的流量对加热器上方的气体进行抽取,实验结果如图 5 所示。

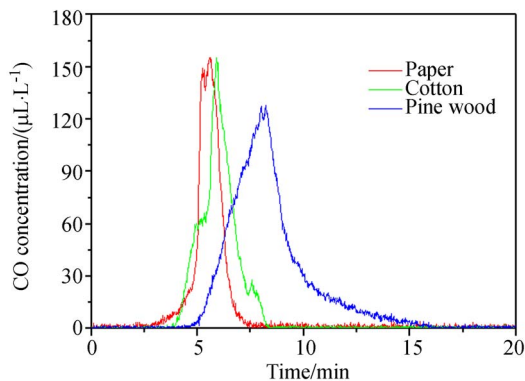


图 5 纸、棉花以及松木等燃烧过程中 CO 的变化  
Fig. 5 Variation of CO concentrations in combustion process of paper, cotton and pine wood respectively

从图中可以看出,这 3 种可燃物都经历了从阴燃到明火燃烧的过程。纸、棉花以及松木在阴燃中产生 CO 的峰值浓度分别为 155.5, 155.3 以及 128.2  $\mu\text{L/L}$ 。CO 能被探测到的时间分别为 164, 227 以及 272 s。当达到各自的着火点时,阴燃转化为明火燃烧,并且随着气体的不断扩散,CO 浓度不断降低。此外,在 CO 浓度降低的过程中,与另外两种可燃物相比,松木产生 CO 浓度的减小率略低,这是木炭的“碳化效应”所致。

### 3.4 性能对比

将研制的火灾传感器与国内外相关研究工作进行比较,如表 1 所示。相对于 S Chen<sup>[9]</sup>等利用通信波段激光器构建的火灾传感器而言,所研制

表 1 与国内外相关工作的比较

Tab. 1 Comparisons between our work and other related works

相关工作	激光波长/ $\mu\text{m}$	吸收线强	光谱技术	光程长度/m	检测下限/ $(\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$
S Chen 等 <sup>[9]</sup>	1.565	$2.03 \times 10^{-23}$	波长调制	20	5
赵辉等 <sup>[18]</sup>	2.332	$3.44 \times 10^{-21}$	直接吸收	100	8.15
本文	2.334	$3.40 \times 10^{-21}$	波长调制	14.5	1.18
Bradshaw 等 <sup>[19]</sup>	4.610	$4.40 \times 10^{-19}$	波长调制	0.4	1

注:吸收线强的单位为  $\text{cm}^{-1}(\text{mol cm}^{-2})^{-1}$

的传感器具有更短的光程长度和更低的检测下限。与赵辉等<sup>[18]</sup>同样利用 2.33  $\mu\text{m}$  激光器研制的传感器相比,本文采用了波长调制光谱技术,故检测下限更低。虽然 Bradshaw<sup>[19]</sup>等采用中红外激光器开发的传感器具有更短的光程长度和更低的检测下限,但昂贵的成本妨碍了其普及。目前,影响传感器性能的主要因素为光干涉,我们正在研究如何解决该问题,从而进一步提高检测精度。

## 4 结 论

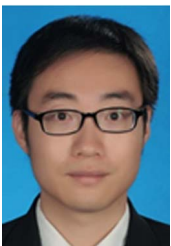
本文介绍了一种基于 2.33  $\mu\text{m}$  分布反馈激光器的紧凑型、可移动式 CO 传感器。利用 WMS 技术分离典型环境压力下复杂、重叠的光谱吸收特征。一次谐波量化的二次谐波检测(WMS-2f/WMS-1f)策略与基于 LabVIEW 的锁相放大器相结合,实现了良好的选择性和较高的检测灵敏度。线性回归分析可知,校验  $R^2$  值约为 0.998,这表明系统具有良好的线性响应。艾伦偏差结果显示,系统的检测限为 1.18  $\mu\text{L/L}$ ;当积分时间达到 205 s 时,系统能够实现 0.08  $\mu\text{L/L}$  的测量精度,从而证明了系统的稳定性。纸、棉以及松木的早期火灾检测实验表明,所研制的传感器具有很强的实用价值,在早期火灾检测领域有着广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] BOGUE R. Sensors for fire detection [J]. *Sensor Review*, 2013, 33(2): 99-103.
- [2] COURBAT J, PASCU M, GUTMACHER D, et al.. A colorimetric CO sensor for fire detection [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 25:1329-1332.
- [3] WANG J, WANG H. Tunable fiber laser based photoacoustic gas sensor for early fire detection [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 65(7): 1-4.
- [4] GUTMACHER D, HOEFER U, WÖLLENSTEIN J. Gas sensor technologies for fire detection [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2012, 175(6): 40-45.
- [5] LACKNER M. Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) in the process industries—a review [J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2007, 23(2): 65-147.
- [6] LI J, YU B, ZHAO W, et al.. A review of signal enhancement and noise reduction techniques for tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2014, 49(8): 666-691.
- [7] KOSTEREV A A, TITTEL F K. Ammonia detection by use of quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy with a near-IR telecommunication diode laser [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(33): 6213-7.
- [8] YIN X, DONG L, ZHENG H, et al.. Impact of humidity on quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy based CO detection using a near-IR telecommunication diode laser [J]. *Sensors*, 2016, 16(2): 162.

- [9] CHEN S J, HOVDE D C, PETERSON K A, *et al.*. Fire detection using smoke and gas sensors [J]. *Fire Safety Journal*, 2007, 42(8): 507-515.
- [10] 蒋亚龙, 祝玉泉, 王进军. 可调谐半导体激光吸收光谱技术用于火灾探测——初步试验[J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(1): 56-61.  
JIANG Y L, ZHU Y Q, WANG J J. Application of tunable diode laser absorption spectroscopy to fire detection: Preliminary experiment [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(1): 56-61. (in Chinese)
- [11] TAO L, SUN K, KHAN M A, *et al.*. Compact and portable open-path sensor for simultaneous measurements of atmospheric N<sub>2</sub>O and CO using a quantum cascade laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28106-28118.
- [12] PHILIPPE L C, HANSON R K. Laser diode wavelength-modulation spectroscopy for simultaneous measurement of temperature, pressure, and velocity in shock-heated oxygen flows [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30): 6090.
- [13] LI J, PARCHATKA U, FISCHER H. Development of field-deployable QCL sensor for simultaneous detection of ambient N<sub>2</sub>O and CO [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2013, 182(3): 659-667.
- [14] GOLDENSTEIN C S, SCHULTZ I A. Fitting of calibration-free scanned-wavelength-modulation spectroscopy spectra for determination of gas properties and absorption lineshapes [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(3): 356-67.
- [15] KIM D E, LEE H J, CHA E J, *et al.*. Development of non-invasive optical transcutaneous Pco<sub>2</sub> gas sensor and analytic equipment [J]. *Am. J. Public Hygiene*, 2004, 19: 730-733.
- [16] YU Y, SANCHEZ N P, GRIFFIN R J, *et al.*. CW EC-QCL-based sensor for simultaneous detection of H<sub>2</sub>O, HDO, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> using multi-pass absorption spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10391-10401.
- [17] ALLAN D W. Statistics of atomic frequency standards [J]. *Proc. IEEE*, 1966, 54(2): 221-230.
- [18] 赵辉, 刘锐, 蔡廷栋, 等. 中心波长 2.33 μm 附近 CO 和 CH<sub>4</sub> 分子的同时探测[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(9): 2369-2372.  
ZHAO H, LIU K, CAI T D, *et al.*. Simultaneous trace detection of carbon monoxide and methane at 2.33 μm [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2011, 23(9): 2369-2372. (in Chinese)
- [19] BRADSHAW J L, BRUNO J D, SONNENFROH D M. Small low-power consumption CO-sensor for post-fire cleanup aboard spacecraft [J]. *SPIE*, 2011, 8032(10): 2089-2092.

## 作者简介:



党敬民(1987—),男,天津人,博士,助理研究员,2011年、2016年于吉林大学分别获得学士、博士学位,现为吉林大学生物与农业工程学院博士后,主要从事红外传感与超宽带传感方面的研究。  
E-mail: jmdang@jlu.edu.cn

## 通讯作者:



孙裕晶(1969—),男,山西介休人,教授,硕士生导师,2000年、2005年于吉林大学分别获得硕士、博士学位,主要从事智能农业机械和智能装备测试技术等方面的研究。  
E-mail: syj@jlu.edu.cn