

· 光电测量与检测 ·

## 基于红外光谱技术的 VCSEL 型二氧化碳气体检测系统的研制

王 彪<sup>1</sup> 范兴龙<sup>1,3</sup> 戴童欣<sup>1,3</sup> 黄 硕<sup>1,2</sup> 连厚泉<sup>1,3</sup> 李奥奇<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学,北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学技术大学,合肥 230026

**摘 要:** 二氧化碳气体检测在环境监测、农业生产等多个领域均具有重要研究意义。近年来,随着对 CO<sub>2</sub> 气体检测设备的需求日益增长,传统的气体检测技术无法满足当前的检测需求。基于红外光谱技术,采用新型 VCSEL 激光器,研制了一套二氧化碳气体检测系统。通过自主研发的 VCSEL 激光器温度控制系统、波形叠加调制电流驱动系统以及基于 LabVIEW 的软件锁相放大数据处理平台,实现了对 CO<sub>2</sub> 气体的浓度测量。结果表明,系统的最低检测下限为 90×10<sup>-6</sup>。当标准 CO<sub>2</sub> 气体的浓度为 100×10<sup>-6</sup> 时,所设计气体检测系统的最大相对测量误差为 7.3%,当二氧化碳气体浓度在 350×10<sup>-6</sup>~1 000×10<sup>-6</sup> 时,系统相对测量误差在-1.77%~+1.6% 之间。对 500×10<sup>-6</sup> 浓度 CO<sub>2</sub> 气体进行长达 1 h 时间的测量,检测结果相对变化量小于 2.6%,系统具有较好的稳定性。

**关键词:** TDLAS; WMS; CO<sub>2</sub>; VCSEL 激光器; 气体检测

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI 编码: 10.14016/j.cnki.jgzz.2020.08.022

### Development of VCSEL based carbon dioxide detecting system using infrared spectroscopy

WANG Biao<sup>1</sup> ,FAN Xinglong<sup>1,3</sup> ,DAI Tongxin<sup>1,3</sup> ,HUANG Shuo<sup>1,2</sup> ,LIAN Houquan<sup>1,3</sup> ,LI Aoqi<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics ,Chinese Academy of Sciences ,Changchun 130033 ,China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China;

<sup>3</sup>University of Science and Technology of China ,Hefei 230026 ,China

**Abstract:** Carbon dioxide gas detection has important research significance in many fields such as environmental monitoring and agricultural production. In recent years , with the increasing demand for CO<sub>2</sub> gas detection equipment , traditional gas detection technology cannot meet the current detection needs. In this paper , based on infrared spectroscopy technology , using a new type of VCSEL laser , a set of carbon dioxide gas detection system is developed. Through the self-developed VCSEL laser temperature control system , waveform superposition modulation current drive circuit board and LabVIEW -based software LIA data processing platform , the concentration measurement of CO<sub>2</sub> gas is achieved. The results show that the lowest detection limit of the system is 90×10<sup>-6</sup>. When the standard CO<sub>2</sub> gas concentration is 100×10<sup>-6</sup> , the maximum relative measurement error of the designed gas detection system is 7.3%. When the carbon dioxide gas concentration is 350×10<sup>-6</sup> to 1 000×10<sup>-6</sup> , the relative measurement error of the system will be between -1.77% and +1.6%. The detection of 500×10<sup>-6</sup> CO<sub>2</sub> for up to 1 h , the relative change of the detection result is less than 2.6% , the system has good stability.

**Key words:** TDLAS; WMS; CO<sub>2</sub>; VCSEL laser; gas detection

## 1 引言

二氧化碳气体检测在环境监测、农业生产等多个

领域均具有重要研究意义。在环境监测方面,加大对温室气体尤其是 CO<sub>2</sub> 的排放控制力度,需要以准确、快速地测量 CO<sub>2</sub> 的浓度为前提<sup>[1]</sup>;在农业生产方面,通过测控调节,将 CO<sub>2</sub> 气体的浓度维持在适宜的范围时,能够有效提高温室作物的产量<sup>[2]</sup>;在医学检测、工业生产等其他领域<sup>[3-5]</sup>,CO<sub>2</sub> 均扮演着重要角色。

与传统红外 CO<sub>2</sub> 气体检测所用光源如 DFB 激光

收稿日期: 2020-04-07

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目( No.61727822)

作者简介: 王彪(1981-),男,博士,副研究员,主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: wb5996@163.com

<http://www.laserjournal.cn>

器等相比, VCSEL 激光器工作阈值电流低、制作成本低, 具有频率响应快、可调谐范围宽等特点, 能够降低系统整体功耗, 提高 CO<sub>2</sub> 气体检测系统性价比<sup>[6]</sup>。VCSEL 激光器作为一种新型半导体激光器, 将其作为系统光源应用于激光二氧化碳气体检测, 是 VCSEL 激光器在分子光谱领域的一个新应用, 扩展了其应用范围。

基于红外光谱技术, 采用 TDLAS-WMS 检测方法, 根据 HITRAN 数据库选择 CO<sub>2</sub> 气体的近红外波段吸收谱线。利用 VCSEL 激光器, 采用 30 m 长光程气室, 通过此前已报道的自主研制的 VCSEL 激光器温度控制系统、波形叠加调制电流驱动电路板以及软件锁相放大数据处理平台, 实现了对 CO<sub>2</sub> 气体的浓度测量。所设计 CO<sub>2</sub> 气体检测系统性能指标能够达到项目预期, 满足系统应用需求, 具有广阔的应用前景。

## 2 系统检测原理

设定 VCSEL 激光器出射光中心波长对应频率为  $\nu_c$ , 加载的高频正弦波信号幅值为  $a$ , 频率为  $f_m$ , 则  $\nu_c$  处的激光瞬时频率为:

$$\nu = \nu_c + a \cos(2\pi f_m t) \quad (1)$$

经过调制后的激光透射光强可以表示为:

$$I(\nu_c, t) = [I_0 + I_0 \cdot \cos(2\pi f_m t)] \exp[-\alpha(\nu_c + a \cdot \cos(2\pi f_m t))] \quad (2)$$

式中  $\alpha(\nu)$  是气体的吸收系数,  $\nu$  是待测气体的吸收波长对应的频率。

采用 WMS 技术的气体浓度测量, 在后端数据处理时需要进行谐波提取。对公式(2)进行傅里叶余弦级数展开, 则有:

$$I(\nu_c, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\nu_c) \cdot \cos(2n\pi f_m t) \quad (3)$$

式中  $A_n(\nu_c)$  为  $n$  次谐波系数。

$$A_n(\nu_c) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} I_0(\nu_c + a \cos\theta) \exp[-\alpha(\nu_c + a \cos\theta) CL] \cos n\theta d\theta \quad (4)$$

式中  $\theta = 2\pi f_m t$ 。

由于所叠加的高频正弦波调制信号的幅值  $a$  较小, 一般认为  $I_0$  在调制前后大小保持为常数, 因此可以将式(4)简化为:

$$A_n(\nu_c) = \frac{2I_0}{\pi} \int_0^{\pi} \exp[-\alpha(\nu_c + a \cos\theta) CL] \cos n\theta d\theta \quad (5)$$

由于  $\alpha(\nu) CL \ll 1$ , 式(5)可以简化为:

$$A_n(\nu_c) = \frac{2I_0 CL}{\pi} \int_0^{\pi} -\alpha(\nu_c + a \cos\theta) \cos n\theta d\theta = I_0 CL H_n(\nu_c) \quad (6)$$

由(6)可以看出, 浓度大小与吸收后信号的  $n$  次谐波幅值成正比关系。其中  $H_n(\nu_c)$  为吸收系数的函数:

$$H_n(\nu_c) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \alpha(\nu_c + a \cos\theta) \cos n\theta d\theta \quad (7)$$

当调制信号幅值远小于 CO<sub>2</sub> 吸收线宽, 对式(7)中的吸收系数进行泰勒级数展开:

$$\alpha(\nu_c + a \cos\theta) = \alpha(\nu_c) + \frac{\partial \alpha(\nu)}{\partial \nu} \Big|_{\nu=\nu_c} \cdot (a \cos\theta) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \alpha(\nu)}{\partial \nu^2} \Big|_{\nu=\nu_c} \cdot (a \cos\theta)^2 + \dots \quad (8)$$

将式(8)代入(7)中, 得到  $H_n(\nu_c)$  泰勒级数展开式:

$$H_n(\nu_c) = \frac{2^{1-n}}{n!} a^n \frac{d^n \alpha}{d\nu^n} \Big|_{\nu=\nu_c} \quad (9)$$

由方程(9)可以看出, 待测气体吸收后信号的  $n$  次谐波幅值与气体吸收谱线的  $n$  阶导数成正比。由于二氧化碳气体的吸收谱线关于中心频率对称, 因此, 吸收能量的奇次谐波在  $\nu_c$  处为零, 偶次谐波在  $\nu_c$  处达到最大<sup>[7-11]</sup>。对于不同次数的偶次谐波, 其在  $\nu_c$  处的取值随着次数的增加而递减, 二次谐波的幅值在  $\nu_c$  处最大<sup>[11-15]</sup>。因此, 所设计的 CO<sub>2</sub> 气体检测系统选择二次谐波用于表征气体浓度。系统通过调制信号的二倍频信号作为参考信号, 利用基于 LabVIEW 的虚拟锁相放大器提取二次谐波信号幅值, 反演得到待测 CO<sub>2</sub> 气体的浓度。

## 3 吸收谱线选择

在进行 CO<sub>2</sub> 气体检测系统具体的设计之前, 需要先确定 CO<sub>2</sub> 气体目标吸收谱线, 以便于选择对应的光学器件完成整体硬件系统的设计。根据 HITRAN 数据库(HITRAN 2016) 绘制 CO<sub>2</sub> 气体在 6 290~6 345 cm<sup>-1</sup>波段的吸收谱线, 如图 1 所示。

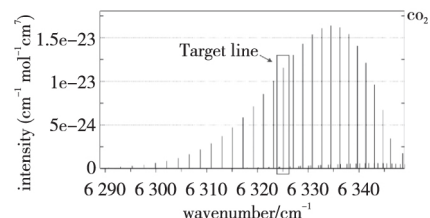


图 1 6 290~6 345 cm<sup>-1</sup>波段 CO<sub>2</sub> 吸收谱线图

选择 6 325. 13 cm<sup>-1</sup>作为二氧化碳气体浓度检测系统的目标吸收峰。在 6 325. 13 cm<sup>-1</sup>附近绘制的 2% 浓度水汽与 100×10<sup>-6</sup>浓度的 CO<sub>2</sub> 气体吸收谱线如图 2 所示, 由图中可以看出, 空气中水汽的存在不会对 100×10<sup>-6</sup>二氧化碳的气体检测造成影响。

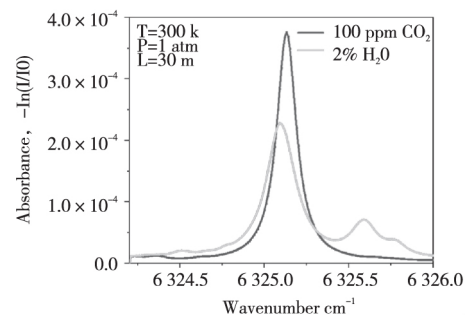


图 2 6 324~6 326 cm<sup>-1</sup>波段 100×10<sup>-6</sup>二氧化碳与 2%水汽吸收对比

## 4 系统配置

基于激光吸收光谱技术的 VCSEL 型 CO<sub>2</sub> 气体检测系统的结构框图如图 3 所示,CO<sub>2</sub> 气体检测系统主要由光学及电学系统两部分组成。光学系统主要完成激光的出射、经多次反射被 CO<sub>2</sub> 气体吸收以及待测信号的探测接收等功能。选用德国 Vertilas 公司的中心波长在 1 581 nm 处的 VCSEL 激光器(VL-1581-1-SE-H4)作为 CO<sub>2</sub> 气体检测系统的激光光源。系统选用 Herriot 光学反应池,气室总长度为 41 cm,经过多次反射后有效光程可达 30 m。选用 Thorlabs 公司的高速光电探测器 DET08CFC 完成待测光信号的接收转换,可以与检测系统通过 FC/PC 光纤接口连接,使用方便。

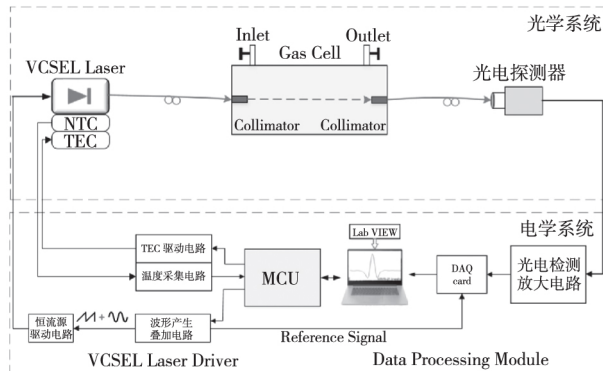


图3 VCSEL型CO<sub>2</sub>气体检测系统整体框图

电学系统主要完成激光器的温度控制、锯齿波叠加正弦波的调制电流驱动、光电信号的检测放大以及待测信号的数据处理等功能。主要由自主研制的基于双核 ARM 控制器(NXP,LPC54102)的主控模块、VCSEL 激光器温度控制模块、压控恒流源模块、波形叠加调制驱动模块、光电检测放大电路、数据采集卡(NI,USB6211)以及上位机等组成。

## 5 实验结果与分析

### 5.1 标定实验

通过配气系统,对所设计 CO<sub>2</sub> 气体检测系统进行标定实验,标定范围为  $50 \times 10^{-6}$  至  $1\,000 \times 10^{-6}$ 。在 1atm 大气压和室温的测试环境下,将标定范围分为 11 组进行测量,每种浓度对应的二次谐波信号幅值按照 1 s 记录一次,每组记录 5 分钟得到 300 个数据,测量得到的具体实验数据如图 4 所示。

根据实验数据,计算每种浓度下的二次谐波幅值的平均值,与标准 CO<sub>2</sub> 气体浓度进行数据拟合可以得到图 5。CO<sub>2</sub> 气体浓度与 2f 平均幅值呈线性关系,通过 Origin 软件进行线性化拟合,得到公式:

$$C = \frac{Amp(2f) - 15.6}{1.17844} \quad (10)$$

式中  $C$  为待测气体浓度,  $1 \times 10^{-6}$ ;  $Amp(2f)$  为测

量得到的电压幅值,  $\mu V$ 。

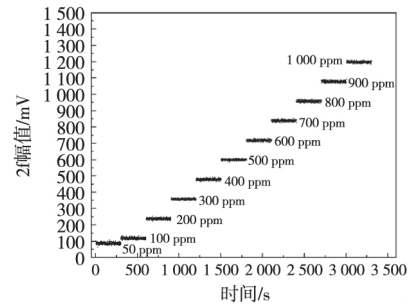


图4 CO<sub>2</sub>浓度标定实验数据图

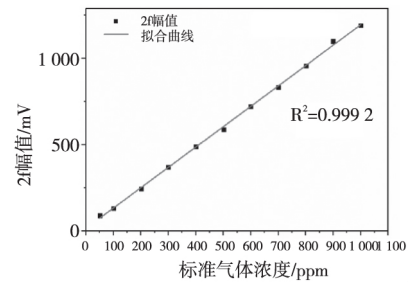


图5 CO<sub>2</sub>气体浓度与2f幅值关系

### 5.2 检测下限

为了测量所设计 CO<sub>2</sub> 气体检测系统的最低检测下限,从  $0 \times 10^{-6}$  开始,逐步增加气体浓度,注入系统 30 m 光程的气室中。直到注入气体的浓度引起的电压幅值明显高于  $0 \times 10^{-6}$  时的电压,可以被分辨时,此时的气体浓度即为所设计检测系统的最低检测下限<sup>[16-18]</sup>。测量时以  $10 \times 10^{-6}$  为步进,测量结果如图 6 所示。当浓度高于  $90 \times 10^{-6}$  时,可以明显辨认电压幅值的变化。因此,认为所设计二氧化碳气体检测系统的最低检测下限为  $90 \times 10^{-6}$ 。

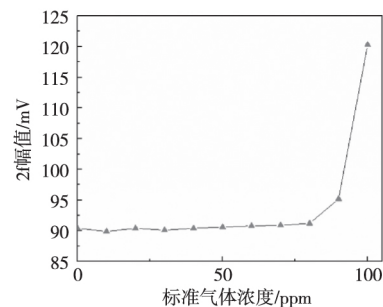


图6 最低检测下限实验

### 5.3 检测精度

对 10 种不同浓度的标准 CO<sub>2</sub> 气体进行浓度检测实验,测试所设计 CO<sub>2</sub> 气体检测系统的测量精度。实验过程中,每一分钟记录一次数据,每组至少记录 6 次,11 组不同浓度的 CO<sub>2</sub> 气体的相对测量误差如图 7 所示。可以看出:当标准气体的浓度为  $100 \times 10^{-6}$  时,所设计气体检测系统的最大相对误差为 7.3%;当二氧化碳气体浓度超过  $350 \times 10^{-6}$  时,相对测量误差将在  $-1.77\% \sim +1.6\%$  之间。

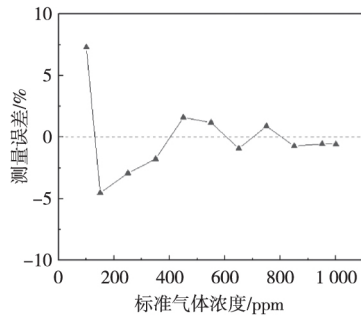


图 7 相对误差测量

#### 5.4 长期稳定性

为了测试检测系统的长期稳定性,对  $500 \times 10^{-6}$  浓度的二氧化碳气体进行了长达 1 小时的连续测量。设置采样时间为 1 s,测量得到的  $\text{CO}_2$  气体浓度变化如图 8 所示。在  $500 \times 10^{-6}$  的标准  $\text{CO}_2$  气体长时间测量数据中,所测得的  $\text{CO}_2$  气体浓度的变化在  $488 \times 10^{-6}$  至  $513 \times 10^{-6}$  以内,可以得到浓度的波动范围是  $25 \times 10^{-6}$  相对变化量小于 2.6%。

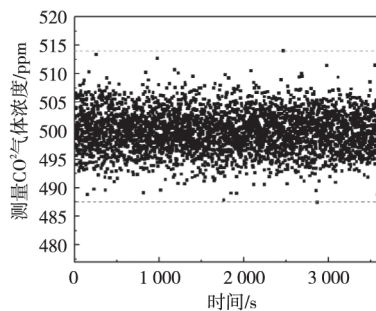


图 8 长期稳定性测试

## 6 结论

二氧化碳气体检测在环境监测、农业生产等多个领域均具有重要研究意义。针对传统 TDLAS 气体检测技术激光光源成本高、功耗大等问题,基于激光吸收光谱技术,采用中心波长在 1 581 nm 的新型 VCSEL 激光器,研制了一套  $\text{CO}_2$  气体检测系统。采用 30 m 光程气室,通过自主研制的 VCSEL 激光器温控、驱动电路板以及基于 LabVIEW 的软件锁相数据处理平台,达到了降低检测系统成本、缩小系统体积的项目预期。结果表明,系统的最低检测下限为  $90 \times 10^{-6}$ 。当标准  $\text{CO}_2$  气体的浓度为  $100 \times 10^{-6}$  时,所设计气体检测系统的最大相对测量误差为 7.3%;当二氧化碳气体浓度在  $350 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}$  时,系统相对测量误差在  $-1.77\% \sim +1.6\%$  之间。对  $500 \times 10^{-6}$  浓度  $\text{CO}_2$  进行了长达 1 h 时间的测量,检测结果相对变化量小于 2.6%,系统具有较好的稳定性。所设计  $\text{CO}_2$  气体检测系统性能指标能够达到项目预期,满足系统应用需求,具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] 赵斌.基于 RBF 网络的北方温室温湿度控制机理的研究 [D].哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [2] 焦键.基于单片机的设施农业控制系统 [D].成都:电子科技大学,2012.
- [3] 张赫,乔川,匡海鹏.基于激光测距的机载光电成像系统目标定位.光学精密工程,2019,27(1):8-16.
- [4] WANG C, MBI A, SHEPHERD M. A Study on Breath Acetone in Diabetic Patients Using a Cavity Ringdown Breath Analyzer: Exploring Correlations of Breath Acetone With Blood Glucose and Glycohemoglobin A1C [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(1): 54-63.
- [5] 严雪飞,朱长青,石科仁,等.脉冲电场测试中的激光供电技术 [J].发光学报,2019,40(2): 264-271.
- [6] 鹿洪飞,王彪,范兴龙,等.TDLAS 氨气检测系统 VCSEL 激光器驱动电路设计 [J].激光杂志,2019,40(01): 26-29.
- [7] 贾良权,祁亨年,胡文军,等.种子呼吸  $\text{CO}_2$  浓度检测系统 [J].光学精密工程,2019,27(06): 1397-1404.
- [8] 王彩霞,何智武,吴龙国,等.高光谱技术结合特征波长筛选的牛肉品种多波段识别 [J].发光学报,2019,40(4): 520-527.
- [9] 李峥辉,姚顺春,卢伟业,等.TDLAS 测量  $\text{CO}_2$  的温度影响修正方法研究 [J].光谱学与光谱分析,2018,38(07): 2048-2053.
- [10] 季文海,宋迪,吕晓翠,等.通过标气校验和支持向量机提高光谱保真度的应用.光学精密工程,2019,27(10): 2144-2153.
- [11] WANG Jianing, NIU Xintao, ZHENG Lingjiao, et al. Wireless Mid-Infrared Spectroscopy Sensor Network for Automatic Carbon Dioxide Fertilization in a Greenhouse Environment [J]. Sensors, 2016, 16(11): 1941-1960.
- [12] 桂淮濛,施卫.不同激光能量涨落对 GaAs 光电导开关时间抖动的影响 [J].发光学报,2019,40(6): 803-807.
- [13] 宋楠,隋越,董明,等.基于虚拟锁相放大器的中红外  $\text{CO}$  检测系统 [J].光电子·激光,2014,25(12): 2343-2349.
- [14] 刘盼,张天舒,范广强,等.气体受激拉曼散射系统的分析与优化.光学精密工程,2019,27(12): 2509-2516.
- [15] 许毅钦,陈志涛,袁涛,等.室内可见光通信高精度定位系统设计 [J].发光学报,2019,40(1): 106-114.
- [16] KRZEMPEK K, JAHJAH M, LEWICKI R, et al. CW DFB RT diode laser-based sensor for trace-gas detection of ethane using a novel compact multipass gas absorption cell [J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2013, 112(4): 461-465.
- [17] 张国军,王彪,李奥奇,等.用于  $\text{H}_2\text{S}$  气体检测的 TDLAS 型程控数据采集系统的设计 [J].激光杂志,2018,39(12): 15-18.
- [18] 魏丽.基于光谱吸收的  $\text{CO}_2$  浓度检测系统的理论与实验研究 [D].河北:燕山大学,2006.