

# 基于中红外 LED 的 CO<sub>2</sub> 气体浓度检测系统研究

陈子聪,高致慧,曹志,杨勇,钟德辉  
(深圳大学电子科学与技术学院,广东深圳 518060)

**摘要:**介绍了基于中红外 LED 的 CO<sub>2</sub> 气体浓度检测系统。通过运用差分吸收和相关检测等手段提高系统灵敏度,系统在检测 0% ~ 10% CO<sub>2</sub> 浓度条件下,示值误差约为 ±0.9%。实验结果与理论数据得到良好的吻合,对 LED 实现气体检测提供了新思路。

**关键词:**气体浓度检测;红外吸收光谱;中红外 LED;CO<sub>2</sub>

**中图分类号:**TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.012

## Research on CO<sub>2</sub> gas concentration test system based on mid-infrared LED

CHEN Zi-cong, GAO Zhi-hui, CAO Zhi, YANG Yong, ZHONG De-hui

(Optics and Optoelectronic Technology Laboratory, ShenZhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** This paper presents a test system of CO<sub>2</sub> gas concentration using mid-infrared LED. Differential absorption method and coherent detecting technology are used to enhance sensitivity. The measurement precision of the system is about 1% SF on condition that the concentration of CO<sub>2</sub> is within the range of 0% to 10%. The experimental results conform to the theoretical analysis. This paper provides a new idea for LED-based gas detecting system.

**Key words:** gas concentration detection; infrared absorption spectrum; mid-infrared LED; CO<sub>2</sub>

### 1 引言

工业生产、制造加工、交通能源、城市建设与住宅建设等不可避免地产生了温室气体。随着经济发展,温室气体急速增加,各种反常气候变化和严峻的生态环境问题随之而来。二氧化碳(CO<sub>2</sub>)作为温室气体的主要组成气体,不但会引起地面温度增加,气候异常,海平面上升等温室效应并发症,而且大气中过多的 CO<sub>2</sub> 会使海洋 pH 值下降,破坏海洋生态环境;环境中浓度过高的 CO<sub>2</sub> 会导致人呼吸困难甚至窒息<sup>[1]</sup>,因此发展 CO<sub>2</sub> 监控手段和检测方法成为研究关注的课题。

红外吸收光谱法是近年来发展迅速的气体检测手段,得益于它不容易受到外部干扰,稳定性好,灵敏度高,响应速度快,选择性强,方便远程控制和适合在线检测<sup>[2]</sup>。其原理为不同气体对红外光有不同的特征吸收光谱。当用红外光照射待测气体时,根据光谱吸收,反演出气体浓度。根据检测方法可

分为谐波检测法和差分吸收法<sup>[3]</sup>。谐波检测法,是对窄带光源进行波长调制,再通过提取正比于气体浓度的二次谐波,达到消除干扰,提高信噪比的目的。其灵敏度高,寿命长,适合远距离检测<sup>[4]</sup>。差分吸收法,主要使用宽带光源,通过待测光路与参考光路的比值,消除光源波动与环境等因素影响。差分吸收法系统结构简单,成本相对低,有利于小型化与现场应用。本系统选用差分吸收方法。

本文对中红外 LED 作为检测光源的 CO<sub>2</sub> 气体浓度检测系统进行了研究。光源使用了低功耗,光谱能量集中的中红外 LED,并结合差分吸收法和相关检测技术,为提高检测系统的灵敏度提供了新思路。

**基金项目:**深圳市科技计划项目(No. SY200806270158A);深圳市微纳光子信息技术重点实验室开放基金项目(No. MN201105)资助。

**作者简介:**陈子聪(1986-),男,研究生,主要从事红外气体检测技术研究。E-mail: wowcong21@gmail.com

**收稿日期:**2012-03-19

## 2 检测原理

### 2.1 红外吸收光谱原理

不同气体对红外光有不同的特征吸收光谱,使用相应波段红外光源通过待测气体,根据探测光强的变化检测气体浓度。根据 Lambert-Beer 定律:

$$I = I_0 \exp[-\alpha(\lambda)CL] \quad (1)$$

式中,  $I$  为初始光强;  $I_0$  为经过待测气体后的光强;  $C$  是待测气体浓度(体积分数);  $L$  为光源与气体作用的有效长度;  $\alpha(\lambda)$  为介质的吸收系数, 则:

$$C = \frac{1}{-\alpha(\lambda)L} \ln \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

对于确定系统,  $-\alpha(\lambda)L$  是一个定量, 只要得出  $I$  与  $I_0$  的比值即可求出浓度值  $C$ 。

### 2.2 差分吸收法

在实际系统中, 光源波动以及光路上粉尘颗粒等都会影响系统检测精度和准确度, 本文引入差分吸收法消除光源与环境干扰。在单光路系统, 在气室中分别充入待测气体和背景气体, 探测器检测到的信号分别为:

$$U_1 = K_1 I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)CL] \quad (3)$$

$$U_2 = K_1 I_0(\lambda) \quad (4)$$

其中,  $U_1$  为待测信号电压;  $U_2$  为背景信号电压。因为相同环境因素下, 调整系数为相同常数  $K_1$ , 式(3)、式(4)相除, 可得:

$$\frac{U_1}{U_2} = \exp[-\alpha(\lambda)CL] \quad (5)$$

则:

$$C = \frac{\ln U_1 - \ln U_2}{-\alpha(\lambda)L} \quad (6)$$

式中,  $\ln U_1 - \ln U_2$  为变量, 设  $\ln U_1 - \ln U_2$  为  $x$ ;  $C$  为  $y$ ;  $\frac{1}{-\alpha(\lambda)L}$  为常数  $A$ , 则式(7)转化为:

$$y = Ax \quad (7)$$

得到一个浓度相关线性函数, 通过定标可以求出常数  $A$ , 则待测气体浓度可以通过该方程式求出。

本系统中使用了分时差分的方法<sup>[5]</sup>。以纯氮气为背景气体得到背景信号电压, 然后依次以不同浓度的  $\text{CO}_2$  作为待测信号电压, 根据式(3)、式(4)作差分处理。

### 2.3 相关检测原理

除了光路上的干扰外, 还有电路本身产生的各种噪声, 诸如光电探测器的  $1/f$  噪声、复合噪声、热噪声和其他随机噪声因素, 在系统探测信号较为微弱的时候, 会影响系统的性能。本文研究中加入了

相关检测技术消除噪声, 提高系统信噪比。

相关检测主要是利用信号频率与噪声随机频率的不同, 通过相关运算, 达到从噪声中提取有用信号的目的。

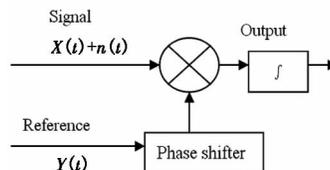


图1 相关检测原理图

待测信号中的有用信号  $X(t)$  与参考信号  $Y(t)$  互相关, 通过乘法运算和积分平均后, 得到有效数值, 图中的移相器使其输出为直流信号。反之, 待测信号中的噪声  $n(t)$  与参考信号  $Y(t)$  不相关, 最终输出为 0。系统中把光源调制成交变信号, 并予以参考信号, 通过这一检测手段, 能有效提高系统的信噪比。

在实际电路中, 这一检测方法可以通过锁相放大器实现, 相关检测部分主要通过乘法器与低通滤波器组合而成。

## 3 检测系统

根据 HITRAN 数据库,  $\text{CO}_2$  分子在  $1.57 \mu\text{m}$ ,  $2.0 \mu\text{m}$ ,  $4.26 \mu\text{m}$ ,  $7.2 \mu\text{m}$  处均有吸收峰<sup>[6]</sup>。其中在近红外  $1.57 \mu\text{m}$  波段, 气体的吸收线强度仅有  $10^{-23} \text{ cm}^{-1}/(\text{molecule} \times \text{cm}^{-2})$ ; 在  $2.0 \mu\text{m}$  波段, 气体吸收线强度有  $10^{-21} \text{ cm}^{-1}/(\text{molecule} \times \text{cm}^{-2})$ ; 在中红外以  $4.26 \mu\text{m}$  为中心的左右吸收带, 气体吸收线强度达到  $10^{-18} \text{ cm}^{-1}/(\text{molecule} \times \text{cm}^{-2})$ 。中红外吸收线强度比近红外大 4~5 个数量级, 因此本文选用了  $4.26 \mu\text{m}$  左右处作为系统的工作波长, 如图 2 所示。

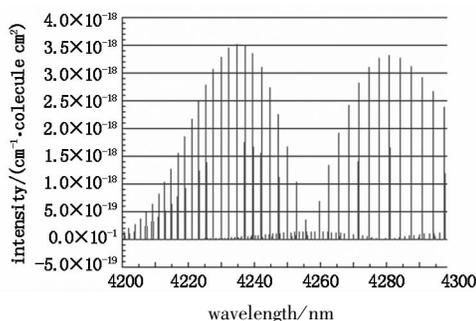


图2 中红外  $4.26 \mu\text{m}$  左右的  $\text{CO}_2$  吸收光谱

在传统的  $\text{CO}_2$  检测仪器或系统中一般用宽带热红外源作为探测光源, 它发出的光从可见波段到中红外波段, 有良好的选择性, 但是发热量大, 能量利用率低, 响应慢; 中红外激光器, 光束集中能量大,

探测灵敏度高,但是价格昂贵<sup>[7]</sup>。随着新技术出现和工艺水平不断提高,中红外 LED 渐渐应用到气体检测领域中。本系统探测光源选取了 4.26 μm 中红外 LED 为探测光源。主要由于 LED 光源光谱能量集中,价格低廉,稳定性好,便于电调制,可用于本系统选用的相关检测方法,有推广应用价值。图 3 为本系统选用的中红外 LED 光谱图。

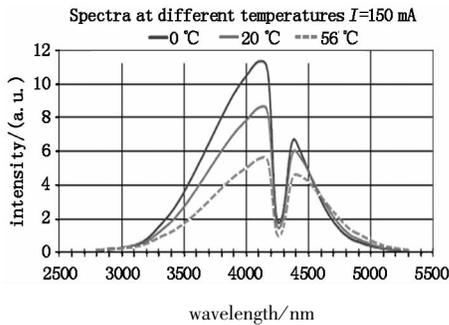


图 3 中红外 4.26 μm LED 光谱

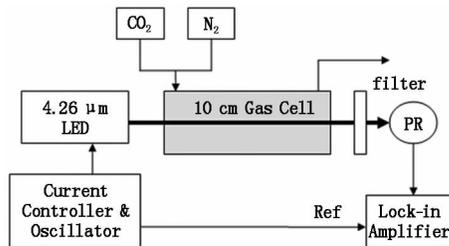


图 4 CO<sub>2</sub> 气体浓度检测系统简图

系统结构如图 4 所示。探测光源选用的中红外 LED 波长覆盖主要从 3.5 ~ 4.5 μm,很好地满足了 CO<sub>2</sub> 在 4.26 μm 左右处的强吸收带。LED 驱动通过电流控制和振荡电路,把光源调制成 8 kHz 高频调制光信号,同时为锁相放大器提供相同频率的参考信号。

气室长 10 cm,连通配气系统,配气系统主要由高纯 CO<sub>2</sub> 气体、纯氮、真空压力表和真空抽气泵组成,准确地配比一定浓度 CO<sub>2</sub> 气体。

探测端用性价比比较高的光敏电阻,探测的光谱范围能从 1 ~ 4.5 μm,探测器前加入窄带滤光片。探测信号与参考信号进入数字锁相放大器进行相关检测。

4 实验结果

如图 5 所示,当探测端不加入滤光片,在 CO<sub>2</sub> 浓度为 10% 的条件下,红外光吸收率只有 15.45%。为了提高探测灵敏度和精度,在光敏电阻 PR 前加入针对只对 4.26 μm 通过了窄带滤波片,红外光的吸收率在同等条件下(CO<sub>2</sub> 浓度为 10%),提升到了 49.38%。

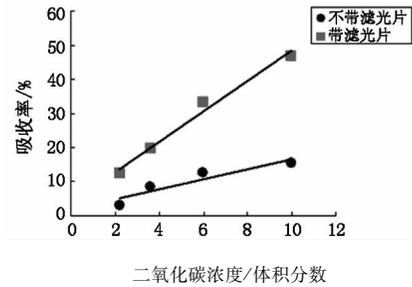


图 5 二氧化碳浓度与吸收率的关系图

分别在气室中对 0% ~ 10% 的 CO<sub>2</sub> 气体浓度进行检测。以纯氮气为背景气体和参考电压,与检测不同浓度 CO<sub>2</sub> (10%, 6%, 3.6%, 2.2%, 1.3%, 0.8%, 0.48%) 所输出的电压相比,求对数得到 CO<sub>2</sub> 浓度(体积分数)与信号比的对数值关系,如表 1 所示。

表 1 二氧化碳浓度与信号比的对数值关系

CO <sub>2</sub> 实际浓度 (体积分数)/%	10	6	3.6	2.2	1.3	0.8	0.48
信号比的对数值	0.6332	0.4054	0.2200	0.1317	0.0637	0.0377	0.0250

通过计算可得到拟合函数关系式:

$$y = 15.198x + 0.19 \tag{8}$$

其中,y 为 CO<sub>2</sub> 浓度;x 为信号比的对数值。得到二氧化碳浓度拟合直线如图 6 所示。

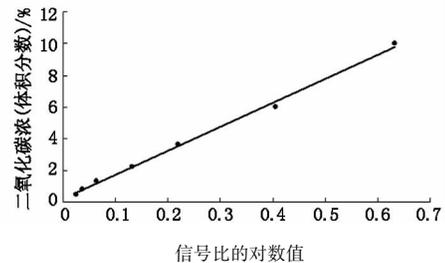


图 6 二氧化碳浓度拟合直线图

用氮气对气室冲洗,再次充入不同浓度的 CO<sub>2</sub>,并逐次稀释其浓度,得到数据通过式(8)计算。实验数据分析如表 2 所示。

表 2 误差分析数据

CO <sub>2</sub> 实际浓度 (体积分数)/%	10	7	4.9	2.94	2.06	1.44
信号比的对数值	0.6398	0.4443	0.3132	0.1802	0.1215	0.0833
计算所得浓度值/%	9.91	6.94	4.95	2.93	2.04	1.45
示值误差/% =  实测值 - 实际值  / 量程	0.9	0.6	0.5	0.1	0.2	0.1

## 5 总结

本文主要分析讨论了基于中红外 LED 的 CO<sub>2</sub> 气体浓度检测系统,检测浓度范围从 0% ~ 10%。光源选用便于光调制和价格低廉的 4.26 μm 中红外 LED,运用差分吸收法,通过相关检测和理论拟合,得到了良好的实验结果,系统的示值误差约为 ±0.9%。

实验研究表明通过改进气室结构、增加会聚透镜约束 LED 光路和双光路差分等可以进一步提高系统的检测精度和稳定性。

### 参考文献:

- [1] Han Xiangyu, Lu Zhaofang. Greenhouse effect and greenhouse gases monitoring [J]. Analytical Instrumentation, 2011, 6: 72 - 74. (in Chinese)  
韩香玉, 卢照方. 温室效应和温室气体监测 [J]. 分析仪器, 2011, 6: 72 - 74.
- [2] He Rui. Design and experiment research of carbon dioxide detection based on infrared spectrum absorption theory [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)  
何睿. 基于红外光谱吸收原理的二氧化碳气体检测系统的设计与实验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [3] Xu Zhenfeng. Research on related technologies of methane concentration second harmonic detection [D]. Taiyuan: North University of China, 2007. (in Chinese)  
徐振峰. 瓦斯浓度二次谐波检测相关技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2007.
- [4] Daisuke Sakaizawa, Shuji Kawakami, et al. Path-averaged atmospheric CO<sub>2</sub> measurement using a 1.57 μm active remote sensor compared with multi-positioned in situ sensors [J]. Proc. of SPIE, 7460, 746006 - 1.
- [5] H Okajima, S Kakumal, et al. Measurement of methane gas concentration using an infrared LED [C]. SICE-ICASE International Joint Conference, 2006.
- [6] [http://savi.weber.edu/hi\\_plot/](http://savi.weber.edu/hi_plot/). Hitran Database.
- [7] S D Smith, A Vass, P Bramley, et al. Comparison of IR LED gas sensors with thermal source products [J]. IEEE Proc-Optoelectron, 1997, 144(5): 266 - 270.