

文章编号: 0253-2239(2010)02-0567-07

# 基于近红外光谱技术的多组分毒性气体检测研究

赵建华 赵崇文 魏周君 高明亮

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230027)

**摘要** 基于近红外波长调制光谱和谐波探测方法, 并采用时分复用方案, 建立了多组分毒性气体同时检测的实验系统。成功实现了对火灾产物中多组分毒性气体(包括 CO, CO<sub>2</sub>, HCN)浓度的同时检测, 并通过对三个通道的基频分量和二次谐波分量进行实时数据处理, 计算得到浓度结果。三种毒性气体各组分的满量程体积分数分别为  $4 \times 10^{-4}$ ,  $4 \times 10^{-4}$ ,  $3 \times 10^{-4}$ , 测量结果误差的最大值不超过满量程的 0.73%。实验结果表明, 该系统进行气体浓度检测具有较好的线性度, 并满足检测精度要求。

**关键词** 激光光学; 光检测技术; 波长调制光谱术; 多组分毒性气体; 时分复用

中图分类号 TN247; X924.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0567

## Study on Monitoring Multi-Component Toxic Gases Based on Near-Infrared Spectroscopic Method

Zhao Jianhua Zhao Chongwen Wei Zhoujun Gao Mingliang

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

**Abstract** An experimental system for detecting multi-component toxic gases, which is based on the near-infrared wavelength modulation spectroscopy and harmonic detection technology, is established by taking use of time division multiplexing method. Detecting multi-component toxic gases (CO<sub>2</sub>, CO, HCN) generated by a fire at one time is completed by this experiment. The full-scales of the three gases are  $400 \times 10^{-6}$ ,  $400 \times 10^{-6}$  and  $300 \times 10^{-6}$ . The data carried from the detector is processed simultaneously while the gases are being monitored. The results show that the error between the real gas concentration and the measured gas concentration is less than 0.73% of the full scale. Therefore, this system has a fine linearity and can reach sensitive level for gas detection.

**Key words** laser optics; optical detection technique; wavelength modulation spectroscopy; multi-component toxic gases; time division multiplexing

### 1 引 言

由于火灾中可燃物的种类繁多, 尤其是各种新型合成材料的大量使用, 加之燃烧状况千变万化, 因而可以生成多种有毒有害气体。相关研究表明<sup>[1~3]</sup>, 在火灾烟气的有毒有害气体中, CO 是头号杀手, 火灾中由 CO 致死的人数大约占死亡总人数的 40%, 火灾发生后 3 min 内 CO 的体积分数就有可能高达 7% 以上, 而人在含 CO 体积分数 0.8% 的环境中 3 min 内就会失去知觉; 而 CO<sub>2</sub> 是几乎所有材料的燃烧产物, 在浓度较高的情况下也会使人室

息; HCN 为剧毒气体, 其毒性为 CO 的 20~40 倍, 当环境中含有  $2 \times 10^{-4}$  体积分数的 HCN, 2 min 就会使人中毒昏迷, 火灾中有 30% 的遇难者是由于 HCN 中毒致死。

在气体分析检测方法中, 目前主要有基于电化学气体传感器和傅里叶变换红外光谱法 (FTIR) 进行气体分析的方法。其中, 基于电化学气体传感器的气体分析方法, 存在传感器寿命短 (约 12 个月)、交叉干扰严重、响应时间长等缺陷; FTIR 方法需要采用分光元件和扫描方式, 在很宽的红外波段, 对毒

收稿日期: 2009-02-10; 收到修改稿日期: 2009-03-27

基金项目: 安徽省自然科学基金 (070415221) 资助课题。

作者简介: 赵建华 (1957—), 男, 博士, 副教授, 主要从事火灾烟雾识别、多组分有毒有害气体定量分析和在线检测技术等方面的研究。E-mail: zhaojh@ustc.edu.cn

性气体浓度进行测量分析,虽然这种方法具有灵敏度高,能实现多种气体同时分析、测量,但需要对气体进行取样,只能在实验室进行气体测量分析,无法实现对火灾现场的气体进行在线实时检测。

近年来,随着半导体激光器的发展和激光光谱学研究的不断深入,基于近红外半导体激光吸收光谱的测量方法研究,引起了各国各领域研究学者的极大关注<sup>[4~11]</sup>。本文研究的火灾多组分毒性气体同时检测方法,采用基于近红外光谱分析的波长调制光谱技术,结合谐波检测技术实现了对火灾气体产物中的 CO, CO<sub>2</sub>, HCN 浓度的实时检测。

## 2 理论基础

当一束光强为  $I_0$  的输入平行光入射到待测气体中时,光通过气体发生衰减。根据朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律,输出光强  $I(t)$  为<sup>[3,12]</sup>

$$I(t) = I_0(t) \exp[-\alpha(\nu)CL], \quad (1)$$

式中  $I_0(t)$  为输入光强;  $\alpha(\nu)$  为气体吸收系数,即气体在一定频率  $\nu$  处的吸收线型;  $L$  是吸收路径的长度;  $C$  是待测气体的浓度。

若对半导体激光器的直流驱动电流上附加一个缓慢变化的锯齿波周期扫频电流和一个幅度较小的正弦调制电流,光源的频率和输出光强也受到相应调制<sup>[9]</sup>:

$$\nu = \nu_0 + \nu_m \sin \omega t, \quad (2)$$

$$I_0(t) = I_0[1 + \eta \sin \omega t], \quad (3)$$

式中  $\nu_0$  为光源未经调制时的中心频率;  $\nu_m$  为频率的调制幅度;  $\eta$  为光强调制系数;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为电流调制频率。将(2),(3)式代入(1)式,则有

$$I(t) = I_0(1 + \eta \sin \omega t) \exp[-\alpha(\nu_0 + \nu_m \sin \omega t)CL]. \quad (4)$$

在近红外波段,气体吸收系数很小,满足  $\alpha(\nu)CL \ll 1$ ,光源的调制幅度也很小,即  $\eta \ll 1$ ,这样(4)式可近似为

$$I(t) = I_0[1 + \eta \sin \omega t - \alpha(\nu_0 + \nu_m \sin \omega t)CL]. \quad (5)$$

由于实验是在大气压下进行,吸收线型可以用 Lorentz 线型来描述<sup>[13~15]</sup>:

$$\alpha(\nu) = \frac{\alpha_0}{1 + [(\nu - \nu_g)/\delta\nu]^2}, \quad (6)$$

式中  $\alpha_0$  为纯气体在吸收线中心的吸收系数;  $\nu_g$  和  $\delta\nu$  分别对应吸收的中心频率和吸收线半峰全宽。当光源输出中心波长被精确锁定在气体吸收峰上,即  $\nu_0 = \nu_g$  时,将(6)式代入(5)式,得

$$I(t) = I_0 \left( 1 + \eta \sin \omega t - \frac{\alpha_0 CL}{1 + x^2 \sin^2 \omega t} \right), \quad (7)$$

式中  $x = \nu_m/\delta\nu$ 。将(7)式展开为傅里叶级数序列,它的一次谐波和二次谐波的系数分别为

$$I_f = I_0 \eta, \quad (8)$$

$$I_{2f} = -k\alpha_0 CL I_0, \quad (9)$$

式中

$$k = \frac{2[2 + x^2 - (1 + x^2)^{1/2}]}{x^2(1 + x^2)^{1/2}}, \quad (10)$$

式中  $I_f$  与  $I_{2f}$  分量均可通过锁相放大器测得。 $I_{2f}$  分量与气体浓度成正比,利用  $(I_{2f}/I_f)$  作为实验系统输出,可以避免  $I_0$  波动干扰进行气体浓度的测量,通过标准气标定,可以获得待测气体的浓度。

## 3 实验系统

### 3.1 实验样本

实验中所用的不同浓度的多组分气体样本由标准气体通过动态多组分配气装置得到。其中每组样本均为一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、氰化氢(HCN)的混合气体。标准气体是购买的三种“国家一级标准气”——CO<sub>2</sub>, CO, HCN 标准气体。每种标准气体由氮气稀释到一定体积分数,装在铝合金气瓶中。每种气体的体积分数分别为 CO 1.03%, CO<sub>2</sub> 4.92%, HCN  $9.98 \times 10^{-4}$ 。研究中设定检测量程为: CO<sub>2</sub> 满量程  $4 \times 10^{-4}$ , CO 满量程  $4 \times 10^{-4}$ , HCN 满量程  $3 \times 10^{-4}$ 。然后,在量程范围内,利用动态多组分配气系统配置四种气样:

$$1) 4 \times 10^{-4} \text{CO}_2 + 4 \times 10^{-4} \text{CO} + 3 \times 10^{-4} \text{HCN},$$

$$2) 1.5 \times 10^{-4} \text{CO}_2 + 2 \times 10^{-4} \text{CO} + 1 \times 10^{-4}$$

HCN,

$$3) 0.8 \times 10^{-4} \text{CO}_2 + 0.8 \times 10^{-4} \text{CO} + 0.5 \times 10^{-4}$$

HCN,

$$4) 0.5 \times 10^{-4} \text{CO}_2 + 0.5 \times 10^{-4} \text{CO} + 0.1 \times 10^{-4}$$

HCN。

### 3.2 实验系统组成

实验系统组成如图 1 所示,主要由多路激光光控制器、三只近红外分布反馈(DFB)激光器、合波器、光纤准直器、吸收池、光电探测器、锁相放大器、多路数据采集卡及计算机(PC)等组成。

系统采用时分复用的方式,三种波长的激光复用一根光纤、一个吸收池、一只光电探测器,实现对 CO, CO<sub>2</sub>, HCN 气体浓度的实时检测。在进行气体浓度检测时,由多路激光控制器发送选通指令,控制三只激光器按时序轮流工作。

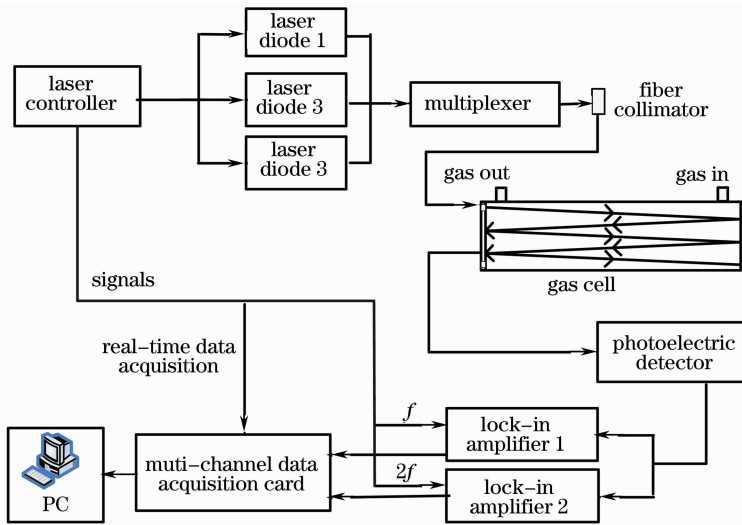


图 1 实验系统组成图

Fig. 1 Sketch of experimental system

合波器将多路激光控制器输出的三路激光合为一路,经光纤准直器准直后送入吸收池中对待测多组分气体进行探测,光电探测器接收经吸收池多次反射和吸收的激光光强,转化为电信号分两路送给锁相放大器 1 和 2,然后输入多路数据采集卡进行 A/D 转换,分别获得基频( $f$ )和二次谐波( $2f$ )分量。PC 机对采集到的三个通道的基频分量和二次谐波分量进行实时数据处理,得到三种待测气体的浓度。

激光控制器的锯齿波扫频电流的频率为 5~30 Hz 可调。实验时,选择扫频频率为 8 Hz,系统每 0.375 s 就可以完成三只激光器的一个时分复用检测周期,计算机对采集到的三个通道的二次谐波谱

线进行数据处理,并同时给出  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCN}$  的浓度,从而实现了多组分毒性气体浓度的同时检测。

### 3.3 时分复用的实现

为了实现多组分毒性气体浓度的同时检测,实验系统采用时分复用方案,实现在很短的检测周期内,按照时分复用的方式使用三只激光器轮流对三种待测气体进行检测。研究中设计了多路激光控制器来实现对三只激光器的时分复用,主要由单片机、波长扫描和波长调制电路、以及三块 LDX 激光二极管电流控制卡组成,另外还实现对激光器稳定的温度控制。多路激光控制器的电流驱动方案示意图如图 2 所示。

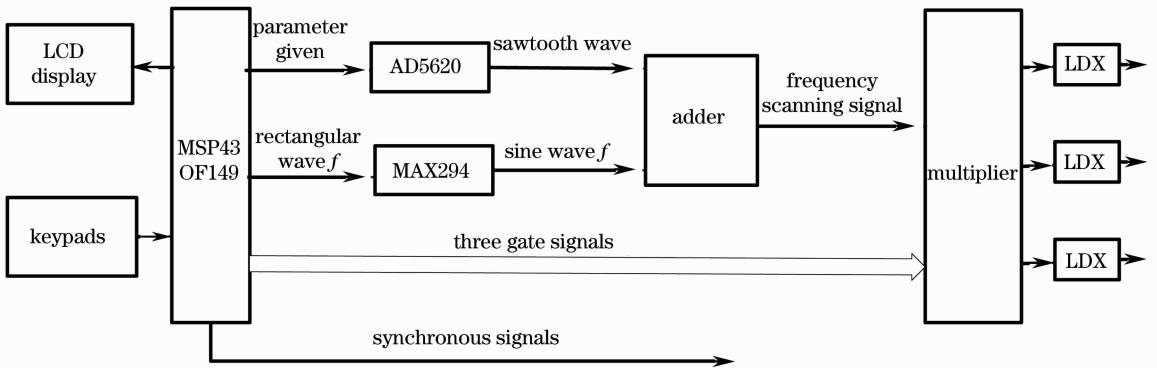


图 2 激光控制器组成示意图

Fig. 2 Sketch of laser controller system

激光控制器工作时,通过 LCD 显示器和薄膜按键组成人机界面,输入激光器工作参数,经单片机以及内部电路一系列处理后,输出三路激光器的驱动电流。系统使用 MSP430F149 单片机作为控制处理器。工作时,由 MSP430 单片机通过 I/O 口模拟

SPI 总线向数模转换芯片 AD5620 发送设定的参数数据(格式为从低到高的一系列数,即各通道的锯齿波电流最小值和电流最大值),由 AD5620 产生周期性的锯齿波系列。单片机产生按照设定的调制频率  $f$  产生方波,通过 MAX294 芯片产生正弦波,然后

与 AD5620 产生的锯齿波系列相加,得到三通道的扫描电流与调制电流的叠加波形,称为扫频信号。同时,MSP430 单片机按照设定时序产生三路选通信号,扫频信号与这三路选通信号分别相乘,得到各个通路的扫频信号,分别送入三块 LDX 激光二极管电流控制卡,对三只激光器进行分时驱动。

另外,多路激光控制器还负责向锁相放大器提供波长调制信号的基频以及二次谐波的同步信号,以及向数据采集卡提供数采同步信号。

### 3.4 光学部分

实验中,系统选用三只近红外分布反馈(DFB)半导体激光器。为避免不同气体组分之间的相互干扰,确保所选的气体吸收线能避开干扰线,经综合考虑,所选择的激光器中心波长分别为 1573 nm(用于  $\text{CO}_2$  浓度的检测),1567 nm(用于 CO 浓度的检测),1550 nm(用于 HCN 浓度的检测)。系统使用了 CWDM 合波模块,三只激光器的输出按照多路激光控制器给定的选通时序,通过时分复用的方式经光纤耦合,轮流送入合波器,合波器将三只激光器的入射激光合为一束,再通过一根光纤输出,经准直后送入吸收池。

系统使用长程吸收池作为检测气室,检测激光入射后会在吸收池两端的反射镜间进行多次反射,大大提高了光程长度,从而加强了待测烟气对入射光的吸收。

光电探测器采用 InGaAs 材料制作的半导体光电探测器,能对 900~1700 nm 范围内的红外光作出响应,满足实验需求。

### 3.5 锁相放大器和数据采集模块

由于气体分子对近红外波段激光的吸收谱线强度相对较弱,需要采用精密的锁相放大器对光电探测器接收到的信号进行放大。实验中使用的锁相放大器是两台 LIA-150 模块,其锁相放大工作频率范围为 10~45000 Hz,能够满足实验需求。

系统采用 ADLINK 公司的 PXI-2005 高速数据采集卡,能够实现同时对多路信号进行高速 A/D 转换和数据采集。通过采集两只锁相放大器的输出信号,使用背景扣除和最小二乘法等方法进行数据处理,然后经计算可获得待测气体的浓度。

## 4 实验与分析

### 4.1 实验步骤

实验时,调节多路激光控制器的激光驱动电流,

将三只 DFB 半导体激光器的输出波长分别调制在三种待测气体的吸收线上。通过数据采集系统采集锁相放大器输出的二次谐波信号。

1) 测量背景谱线。将怀特池抽真空,冲入一个大气压的高纯氮气,测量该情况下的背景谱线 100 次后平均。

2) 获得待测样品气的浓度谱线。在一个大气压下,冲入样品气,测量当前样品气的谱线 100 次平均得到待测样品谱线。

3) 将待测样品谱线(1~4 号样气)进行背景扣除,由向量  $L_i$  表示( $i=1,2,3,4$ )。利用最小二乘法计算待测样品中各组分的浓度。

### 4.2 实验结果分析

在波长调制光谱技术中,影响检测精度的因素很多,J. Gustafsson 等<sup>[16]</sup>通过试验,总结了波长调制光谱技术中  $2f$  等谐波谱线中的各种背景噪声谱线来源及其影响。其研究发现,对于  $2f$  谐波谱线来说,其背景噪声谱线主要由标准具条纹构成,其幅度比其他噪声谱线高一个数量级。其他噪声谱线主要由激光器剩余幅度调制效应和系统信号链中电子设备的非线性造成,激光器  $1/f$  噪声可以通过提高锁相放大器积分时间减弱约一个数量级,与上述噪声源相比可以忽略。

由于标准具效应是影响系统检测精度的主要因素,针对此问题的研究很多,也提出了很多解决方案。本文通过对光检测信号的后期处理来消除光学条纹:采用背景扣除的方法,通入高纯氮气测得系统响应作为零背景,对测量得到的谱线数据进行背景扣除,可以达到较好的效果。图 3~6 分别为对测量到的 4 组二次谐波谱线进行背景扣除后获得的谱线。

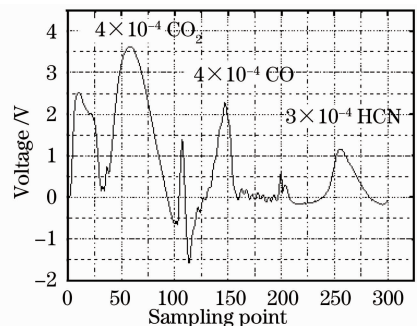


图 3 第一组气样扣除背景后的二次谐波谱线  
Fig. 3 Second harmonic spectral data by deducting the background for the first sample

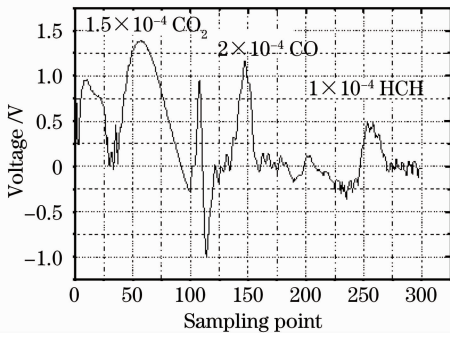


图 4 第二组气样扣除背景后的二次谐波谱线

Fig. 4 Second harmonic spectral data by deducting the background for the second sample

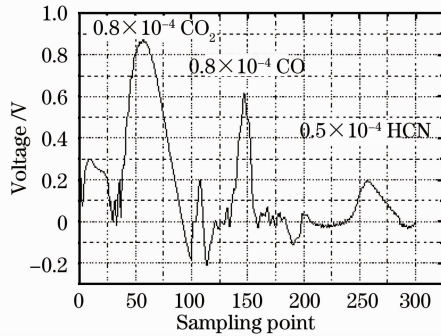


图 5 第三组气样扣除背景后的二次谐波谱线

Fig. 5 Second harmonic spectral data by deducting the background for the third sample

图中横坐标为采样点数,1~100 点为 CO<sub>2</sub> 检测通道的谱线,101~200 点为 CO 检测通道的谱线,201~300 点为 HCN 检测通道的谱线;纵坐标为采集到的电压。

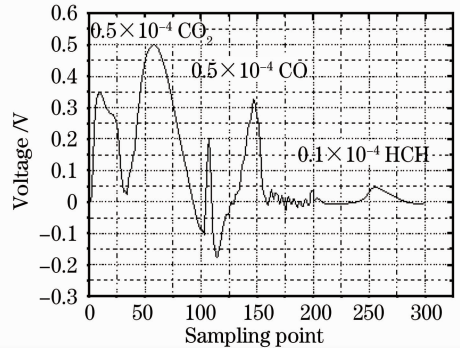


图 6 第四组气样扣除背景后的二次谐波谱线

Fig. 6 Second harmonic spectral data by deducting the background for the fourth sample

对 4 组二次谐波谱线分别以行向量  $L_1[300]$ ,  $L_2[300]$ ,  $L_3[300]$ ,  $L_4[300]$  表示(方括号中的 300 代表采用点数)。在对第  $i$  组谱线  $L_i$  进行数据处理时,对每一个激光器气体检测通道,选取  $L_{i-1}$  作为标准已知浓度的谱线,以  $L_i$  作为待测浓度谱线与  $L_{i-1}$  进行拟合,如下式:

$$C_i = R_{i-1}(L_i \cdot L'_{i-1}) / (L_{i-1} \cdot L'_{i-1}), \quad (i = 2, 3, 4) \quad (11)$$

式中  $C_i$  为第  $i$  号气样的测量浓度,  $R_{i-1}$  为第  $i-1$  号气样的配置的标准浓度(该浓度已知)。在数据分析时,实际计算了三组数据(2~4 号气样),一号气样的测量谱图用作二号气样的标准谱图,二号气样的测量谱图用作三号气样的标准谱图,三号气样的测量谱图用作四号气样的标准谱图。分别对 3 个气体检测通道应用(11)式,计算得到测量结果如表 1 所示。

表 1 四组多组分气体浓度测量实验结果

Table 1 Experimental result of multi-component toxic gases concentration detection

	Standard concentration			Detecting concentration			Measuring error /%		
	/10 <sup>-4</sup>			/10 <sup>-4</sup>					
	CO <sub>2</sub>	CO	HCN	CO <sub>2</sub>	CO	HCN	CO <sub>2</sub>	CO	HCN
1	0.4	4	3	4	4	3	0	0	0
2	0.15	2	1	1.5220	1.9724	0.9939	+0.55	-0.69	-0.20
3	0.8	0.8	0.5	0.8291	0.8267	0.5211	+0.73	+0.67	+0.70
4	0.5	0.5	0.1	0.4899	0.4774	0.1105	-0.25	-0.57	+0.35

通过配置的标准气体样品浓度与实验得到测量浓度结果比较,并利用最小二乘拟合计算出实验测量系统的非线性度:

$$Z = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{\sigma(X)} \sqrt{\sigma(Y)}}, \quad (12)$$

式中  $Z$  为非线性度,  $X$  为气样标准浓度,  $Y$  为气样系统

测量浓度,  $\sigma$  表示求方差,  $E$  表示求期望值。

系统对二氧化碳测量的非线性度为 0.75,对一氧化碳测量的非线性度为 0.7499,对氰化氢测量的非线性度为 0.75。非线性度参数  $Z$  总是在 0 和 1 之间。越接近于 1,数据的线性越好。本实验中  $Z$  值与 1 比较接近,这表明各数据点基本在拟合直线附近波动,



实验测量系统线性较好,如图 7~9 所示。

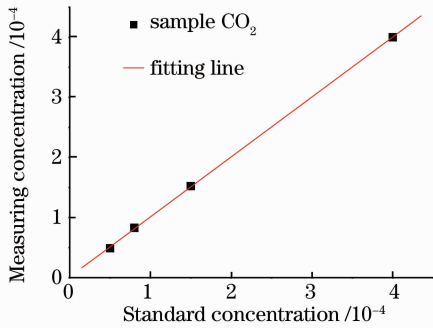


图 7 多组分气体检测中二氧化碳的测量浓度值

Fig. 7 Concentration of the CO<sub>2</sub> in multi-component toxic gases detection

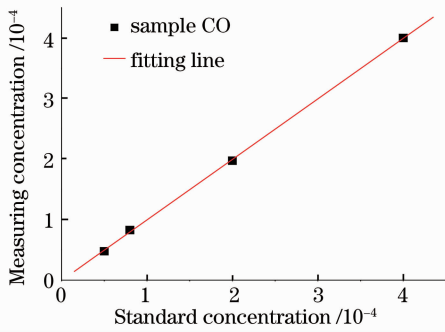


图 8 多组分气体检测中一氧化碳的测量浓度值

Fig. 8 Concentration of the CO in multi-component toxic gases detection

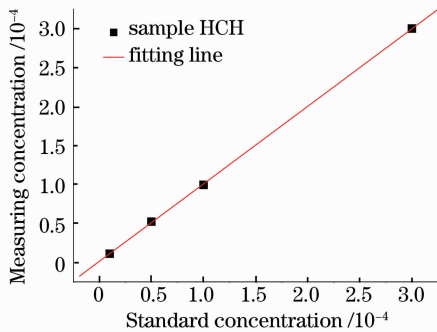


图 9 多组分气体检测中氰化氢的测量浓度值

Fig. 9 Concentration of the HCN in multi-component toxic gases detection

## 5 结 论

采用了近红外波长调制光谱技术,将激光器输出的波长调制到气体分子吸收谱线附近,利用长程吸收池、谐波探测和锁相放大等技术,能有效地提高信噪比和测量灵敏度。通过合理高效的实验系统光路和硬件设计,采用时分复用方法,大大缩短了检测周期,每 0.375 s 便可完成一次对多组分毒性气体

浓度的检测。通过采用背景扣除方法,对采集到的三种气体的二次谐波谱线进行拟合处理和计算,同时获得了多组分毒性气体(包括 CO, CO<sub>2</sub>, HCN)的浓度。实验表明,通过采用背景扣除方法对实验数据进行处理,能够较好的抑制系统背景噪声的影响,可以实现多组分气体的同时浓度检测。由测量结果可以看出,浓度测量线性程度较好,且测量误差的最大值不超过满量程的 0.73%。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Longbiao, Yuan Hongyong. Fire Detecting and Controlling Engineering[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999
- 2 吴龙标, 袁宏永. 火灾探测与控制工程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999
- 3 D. Rohr. An update to what's burning in home fires [J]. *Fire and Materials*, 2001, **25**: 43~48
- 4 Zhang Xiaohua, Zhang Rencheng, Gong Xue *et al.*. Detection and estimation of early fires' process character by using infrared spectrum[J]. *J. Infrared Millim. W.*, 2006, **25**(5): 382~385
- 5 张晓华, 张认成, 龚雪等. 火灾早期过程特征的红外光谱探测和诊断[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(5): 382~385
- 6 Shen Yi, Zhou Bin, Wang Shanshan *et al.*. Measurement of NO<sub>2</sub> in cigarette main smoke by differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1934~1937
- 7 沈轶, 周斌, 王珊珊等. 差分光学吸收光谱法研究卷烟主流烟气 NO<sub>2</sub>[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1934~1937
- 8 Bao Jian. Research on Key Technology about Early Fire Sensing Using Near Infrared Diode Laser Absorption Spectroscopy[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2004
- 9 鲍健. 近红外二极管激光火灾预警光学传感器关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004
- 10 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Infrared absorption spectrometer of monitoring ambient methane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 67~70
- 11 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧等. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷监测仪[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 67~70
- 12 Gao Xiaoming, Huang Wei, Li Ziyao *et al.*. Sensitivity detection of CO<sub>2</sub> molecule using near infrared diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 609~611
- 13 高晓明, 黄伟, 李子尧等. CO<sub>2</sub> 分子的近红外二极管激光吸收光谱灵敏探测[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 609~611
- 14 Chen Jiuying, Liu Jianguo, Zhang Yujun *et al.*. Autobalanced detection based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 350~353
- 15 陈玖英, 刘建国, 张玉钧等. 调谐半导体激光吸收光谱自平衡检测方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 350~353
- 16 Wang Shutao, Liu Jin, Che Rensheng *et al.*. A methane gas sensor with optic fiber based on frequency harmonic detection technique[J]. *J. Appl. Opt.*, 2004, **25**(2): 44~47
- 17 王书涛, 刘瑾, 车仁生等. 一种基于谐波检测技术的光纤甲烷气体传感器[J]. *应用光学*, 2004, **25**(2): 44~47
- 18 Liu Yande, Chen Xingmiao, Ouyang Aiguo. Non-destructive measurement of soluble solid content in gannan navel oranges by visible/near-infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 478~481
- 19 刘燕德, 陈兴苗, 欧阳爱国. 可见/近红外光谱法无损检测赣南脐橙可溶性固形物[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 478~481
- 20 Liu Zhouyi, Zhu Tuo, Gu Endong *et al.*. Acid orange II detection by fluorescence spectra[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008,

28(6): 1106~1110

刘周忆, 朱拓, 顾恩东等. 荧光光谱检测的酸性橙 II 的研究 [J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1106~1110

12 Zhao Jianhua. Modern Safety Monitoring Technology [M]. Heifei: University of Science and Technology of China Press, 2006

赵建华. 现代安全监测技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006

13 E. D. Hinkley. Laser Monitoring of the Atmosphere: Topics in Applied Physics [M]. New York: Springer-Verlag, 1976. 14: 29~41, 237~295

14 J. Reid, D. Labrie. Second-harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory [J]. *Appl. Phys. B*, 1981, 26: 203~210

15 D. T. Cassidy, J. Reid. Harmonic detection with tunable diode lasers-two-tone modulation [J]. *Appl. Phys. B*, 1982, 29(4): 279~285

16 J. Gustafsson, N. Chekalin, O. Axner. Characterization of 2f-, 4f-, and 6f-background signals in wavelength modulation diode laser absorption spectrometry in graphite furnaces [J]. *Spectrochim. Acta. B*, 2003, 58(1): 123~141

## 《光学学报》“发光材料”专题 征 稿 启 事

近年来,发光材料以其独特的优越性,已成为我国光学材料研究领域的的主流方向之一,被广泛应用于显示、通信、卫星、生物、光学计算机等高科技领域。发光材料作为一门发展十分迅速的新兴技术科学,所提出的新原理、新方法和新技术已取得多项重大研究成果。《光学学报》计划于 2010 年 7 月正刊(EI 核心收录)上推出“发光材料”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“发光材料”方面原创性的研究论文,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 光致发光材料: 灯用材料、长余辉材料、紫外发光材料、红外线发光材料、荧光染料、颜料材料等;
- 电致发光材料: 高场发光材料(直流粉末 DCEL,交流粉末 ACEL,薄膜发光,厚膜发光,有机发光)、低场发光材料(发光二极管(LED),有机发光(OEL-OLED),硅基发光,半导体激光)等;
- 阴极射线发光材料: 彩色电视发光材料、黑白电视发光材料、像素管材料、低压荧光材料、超短余辉材料等;
- 辐射发光材料:  $\alpha$  射线发光材料、 $\beta$  射线发光材料、 $\gamma$  射线发光材料、氡放射发光材料、闪烁晶体材料、X 射线发光材料、X 射线存储发光材料、X 射线增感发光材料、CT 扫描发光材料等;
- 摩擦发光材料: 单晶发光材料、微晶发光材料等;
- 化学发光材料: 有机化合物发光材料(荧光染料)、液体发光材料、有机稀土发光材料等;
- 生物发光材料: 酶发光材料,有机发光材料等;
- 反射发光(几何光学)材料: 光学镀膜反射材料、玻璃微珠反射材料等;
- 其他

特邀组稿专家: 郭太良 教授 福州大学

截稿日期: 2010 年 4 月 20 日

投稿方式以及格式: 可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“发光材料”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/gxxb.htm>。本专题投稿文体为中文,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话: 021-69918427。

《光学学报》编辑部