

文章编号:1002-2082(2004)02-0044-04

# 一种基于谐波检测技术的光纤甲烷气体传感器

王书涛<sup>1</sup>, 刘瑾<sup>2</sup>, 车仁生<sup>1</sup>, 王玉田<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 燕山大学 电气工程学院 河北 秦皇岛 150001)

**摘要:** 甲烷是易燃易爆气体,是矿井瓦斯及天然气等多种气体燃料的主要成分。气体爆炸一直是困扰煤矿安全生产的重大难题,因此现场实时检测甲烷气体浓度对于工矿安全运行,人身安全有着至关重要的作用。基于甲烷气体近红外吸收的机理,研究了一种以DFB LD为光源的高灵敏度光谱吸收型光纤甲烷气体传感器。利用光源调制实现气体浓度的谐波检测,用二次谐波与一次谐波的比值来消除光路干扰。建立了谐波检测的数学模型,给出了甲烷气体的测量结果。利用光纤作为传光通道,使得探头可以与测量电路实现完全电隔离,增强了系统的安全性。

**关键词:** 气体传感器;甲烷;调制;谐波检测

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

## A Methane Gas Sensor with Optic Fiber Based on Frequency Harmonic Detection Technique

WANG Shu-tiao<sup>1</sup>, LIU Jin<sup>2</sup>, CHE Ren-sheng<sup>1</sup>, WANG Yu-tian<sup>2</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Methane is an inflammable and explosive gas and a major constituent of mine atmospheres, natural gas and gas fuels. Because gas explosion is a big problem in mining industry, real-time and on-line detection of methane has a critical function both for safety assessment and for control of combustion processes. Based on the mechanism near infrared spectral function both for safety assessment and for control of combustion processes. Based on the mechanism of near infrared spectral absorption of methane, a system using absorbent type optic-fiber for high sensitivity methane detection with DFB LD is demonstrated. Light source modulation harmonic measurement is presented in this paper. The ratio of the fundamental and second-harmonic signal presented can be used for eliminating optical interference. The mathematical model of gas concentration harmonic measurement is built up. The result of methane concentration is also shown. Optical fiber is used as transmission medium, thus the sensor part and measurement circuit can be isolated completely. The safety of the system is enhanced.

**Keywords:** gas sensor; methane; modulation; harmonic measurement

### 引言

甲烷是易燃易爆气体,是矿井瓦斯及天然气等多种气体燃料的主要成分。气体爆炸一直是困扰煤矿安全生产的重大难题,因此现场实时检测甲烷气体浓度对于工矿安全运行及人身安全有着至关重要的作用。

光纤气体传感器具有其他传感器无法比拟的优点,如灵敏度高,响应速度快,动态范围大,防电磁干扰,防燃防爆,不易中毒,适合于长距离在线测量。因此,近几年来,光纤甲烷气体传感器倍受关注<sup>[1~7]</sup>。

本文采用分布反馈式半导体激光器(DFB LD)作为光源,通过对光源的调制实现对甲烷气体的二次

谐波检测,克服了现有仪器受光路干扰较大的缺点,并且比以往采用LED作光源的差分检测方式<sup>[7]</sup>具有更高的灵敏度<sup>[3~5]</sup>。

### 1 基本原理

当一束光强为 $I_0$ 的输入平行光通过图1所示的充有甲烷与空气混合气体的气室时,如果光源光谱覆盖一个或多个气体吸收线,光通过气体时发生衰减。根据Beer-Lambert定律,输出光强 $I(t)$ 与输入光强 $I_0(t)$ 和气体浓度之间的关系为

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

收稿日期:2003-03-28

作者简介:王书涛(1978-),男,辽宁本溪人,哈尔滨工业大学博士,燕山大学教师,主要从事光电检测及光纤电传感方面的研究工作。

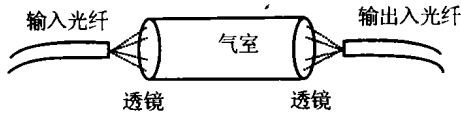


图1 气室结构

Fig. 1 Structure of gas chamber

式中,  $\alpha(\nu)$  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;  $C$  是气体浓度。如果光源谱分布带宽远远小于气体吸收线带宽, 通过对光源的注入电流进行正弦调制, 光源频率和输出光强也将受到相应调制:

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

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

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)式和(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, 气体的吸收系数很小, 满足  $\alpha(\nu) CL \ll 1$ , 光强的调制幅度也很小, 即  $\eta \ll 1$ , 这样就可以运用近似公式:

$$\exp[-\alpha(\nu) CL] = 1 - \alpha(\nu) CL \quad (5)$$

并且可以忽略高阶小项:

$$\eta \sin \omega t \times \alpha(\nu_0 + \nu_m \sin \omega t) CL \quad (6)$$

这时  $I(t)$  可近似为

$$I(t) = I_0 [1 + \eta \sin \omega t - \alpha(\nu_0 + \nu_m \sin \omega t) CL] \quad (7)$$

气体压力接近 1 个标准大气压时, 红外光谱的碰撞加宽起主要作用, 因此可以用 Lorentz 曲线描述  $\text{CH}_4$  分子的吸收谱线型:

$$\alpha(\nu) = \frac{\alpha_0}{1 + (\frac{\nu - \nu_g}{\delta\nu})^2} \quad (8)$$

式中,  $\alpha_0$  表示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宽, 于是(7)式变为

$$I(t) = I_0 [1 + \eta \sin \omega t - \frac{\alpha_0 CL}{1 + (\frac{\nu_0 - \nu_g + \nu_m \sin \omega t}{\delta\nu})^2}] \quad (9)$$

当光源输出中心波长被精确锁定在气体吸收峰上时,  $\nu_0 = \nu_g$ , 则

$$I(t) = I_0 [1 + \eta \sin \omega t - \frac{\alpha_0 CL}{1 + x^2 \sin^2 \omega t}] \quad (10)$$

定义  $x = x_m / \delta\nu$ , 将(10)式展开为傅立叶级数序列, 它的一次谐波( $f$ )和二次谐波( $2f$ )的系数分别为

$$I_f = I_0 \eta \quad (11)$$

$$I_{2f} = -k \alpha_0 CL I_0 \quad (12)$$

式中,

$$k = \frac{2[2 + x^2 - 2(1 + x^2)^{1/2}]}{x^2(1 + x^2)^{1/2}} \quad (13)$$

而二次谐波和一次谐波的比值不含有  $I_0$  项, 这样用其作为系统的输出可以消除光强波动等因素带来的干扰。其比值为

$$\frac{I_{2f}}{I_f} = -\frac{2k}{\eta} \alpha_0 CL \quad (14)$$

由此可见, 通过检测二次谐波可以获得气体浓度信息。一次谐波分量主要由强度调制引起, 幅度大小正比于光源的平均功率, 与气体浓度无关。用二次谐波和一次谐波的比值作为系统的输出, 可以消除光源波动等共模噪声。差分吸收法虽然也具有很强的克服光路干扰的能力, 但系统的固有噪声无法消除, 灵敏度不会达到很高。谐波检测可以消除各种有效系统噪声和各种干扰, 并且具有更高的灵敏度, 是一种较先进的气体浓度检测方法。

## 2 光源的选择

光源的选择包括以下几个方面: 输出中心频率同气体的吸收谱特性相吻合; 温度特性良好且与光纤的低损耗窗口相适应。

甲烷分子具有 4 个基本振动:  $\nu_1 = 2913.0 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_2 = 1533.3 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_3 = 3018.9 \text{ cm}^{-1}$  和  $\nu_4 = 1305.9 \text{ cm}^{-1}$ ; 对应的波长分别为  $3.433 \mu\text{m}$ ,  $6.522 \mu\text{m}$ ,  $3.312 \mu\text{m}$  和  $7.658 \mu\text{m}$ 。这些波长处于石英光纤的高衰减区, 光源和探测器都需要低温制冷, 并且结构笨重, 使用很不方便, 所以不能广泛应用于光纤气体传感。甲烷气体在泛频带  $2\nu_3$  和组合频带  $\nu_2 + 2\nu_3$  的波长分别为  $1.6 \mu\text{m}$  和  $1.3 \mu\text{m}$ 。由于吸收谱宽仅为几个纳米, 一般用于气体探测的发光二极管的带宽为  $20 \sim 100 \text{ nm}$ , 气体吸收仅占光源光强的几千分之一, 比光源光强的变化还要小, 测量的灵敏度很低, 并且多纵模吸收的灵敏度远小于单纵模吸收的灵敏度以及光源参数的限制, 所以选用峰值波长为  $1.331 \mu\text{m}$  的 DEF LD 作为光源。甲烷在  $1.3 \mu\text{m}$  附近的精细结构谱图如图 2 所示。

可见, 甲烷气体在  $1.331 \mu\text{m}$  处有比较强的吸收, 且其他气体如二氧化碳和水蒸气等在此处无明显吸收, 不会产生交叉传感问题。

分布反馈式半导体激光器 (DFB LD) 是一种内含介质光栅结构和具有优良选频特性的单纵模激光

器。本文所用光源采用高精度的自动功率控制 APC 和自动温度控制(ATC)技术,有很高的短期稳定性和长期稳定性,并具有连续光、内调制和外调制三种工作方式,光谱宽度  $\Delta\lambda \leq 1 \text{ nm}$ , 输出光功率  $\geq 1 \text{ mW}$ , 短期稳定度(dB/15min)和长期稳定度(dB/

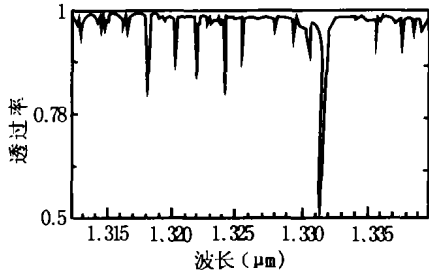


图2 甲烷气体在1.3 μm附近的吸收光谱

Fig. 2 The absorption spectrum of methane at 1.3 μm (8h)分别为  $\pm 0.005$  和  $\pm 0.03$ 。光源的原理框图如图3所示。光功率控制电路通过激光器组件内的激光器和光电探测器形成功率控制环路,使激光器工作在衰减电路设定功率的工作点上,达到自动功率控制的目的。当处于连续光方式时,激光器输出连续光;当处于

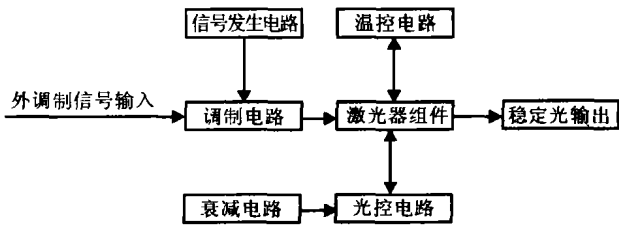


图3 光源的原理框图

Fig. 3 The principle diagram of light source

内调制方式时,由信号发生电路产生方波信号调制激光器,使激光器输出调制光;当处于外调制方式时,外部输入信号调制激光器,使激光器输出调制光。衰减电路只在连续光和数字内调制方式下对输出光起衰减作用。

DFB LD 与普通的LED相比具有谱线窄、功率大和单纵模运行等特点,并且可以通过调整温度和注入电流来粗调和精调其输出波长。以DFB LD作为光源的气体传感技术在灵敏度、选择性、动态范围、信噪比和响应时间等方面比传统方法具有诸多优点,因此是光纤气体传感器的首选光源。

### 3 系统的实现

谐波检测甲烷气体浓度的原理框图如图4所示。它是一种采用稳频措施的半导体激光器气体检测系统。光纤可以将激光器发出的光传输到很远的距离,所以在设计时可把光源及电路处理单元均安装于矿

井外,气室置于井内,避免由于电子元件而引发的危险,特别适用于环境条件恶劣的矿井瓦斯气体在线遥测。

该系统采用的DFB LD前后两面均发射激光,利用后向激光穿过参考气室(参考气室内装有已知浓度的甲烷气体)检测一次谐波,利用反馈信号对激光器

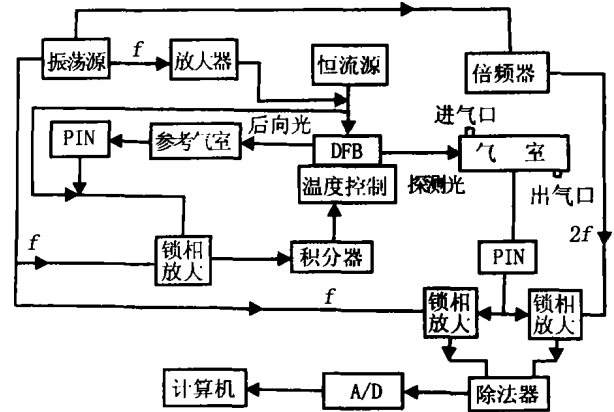


图4 谐波检测甲烷气体浓度原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the system of harmonic detection for methane

进行温度控制,并把该波长精确锁定在吸收峰上。DFB LD前向发出经过调制的光且经光纤传输到测量气室与甲烷气体发生相互作用,然后将携带有用信息的光信号传输到PIN光探测器并转换成电信号,送入锁相放大器。检出两个调制频率的一次和二次谐波分量(二次谐波分量含有浓度信息,一次谐波分量主要由强度调制引起,幅度大小正比于光源的平均功率)。用二次谐波和一次谐波的比值作为系统的输出,消除了激光器光强波动等共模噪声和其它同性干扰的影响,单值表征被测气体浓度。随后再经过低噪声、高灵敏度的低通滤波电路消除背景光的交流漂移和PIN的暗电流,并滤除信号中的高频噪声。经过上述处理的反映气体浓度的信号被送入A/D转换器,转换成数字量后送入计算机进行处理、显示并打印。

### 4 实验及结果

采用图4所示的系统进行实验。实验采用的气室长度为50 cm,光纤为1 km长的9/125 μm单模光纤(在1.3~1.5 μm波长范围内的传输损耗低于1 dB/km),选择低噪声、高灵敏度的PIN光电二极管作为光电探测器,其波长响应范围在1000~1700 nm。从调整电路各参数可以看出,通入气体前后测量通道的信号波形如图5所示。这说明甲烷气体与光能作用后产生了谐波信号。当气室中没有待测气

体时,二次频输出信号为零,基频输出一个固定不变的电压值,此时除法器的输出为零。当有气体逐渐流入气室时,浓度与信号幅度的关系如图6所示。

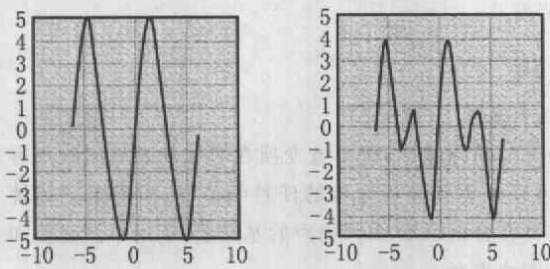


图5 注气前后输出波形的变化

Fig. 5 The signal variation before and after injecting methane into the gas chamber

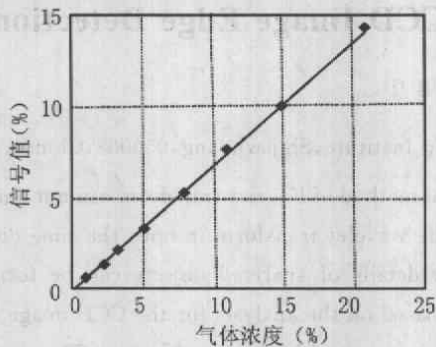


图6 甲烷气体浓度曲线

Fig. 6 Curve of methane concentration versus signal amplitude

从图中可以看出,传感器的响应值与甲烷气体的浓度近似呈线性关系。在相同条件下,经多次测试,信号间最大偏差小于2%,其重复性和稳定性能均良好。

## 5 结论

理论与实验表明,采用DFB LD调制技术实现甲烷气体浓度的谐波检测,灵敏度和稳定性明显提高,

可以检测的灵敏度达 $10 \times 10^{-6}$ ,为甲烷爆炸下限的0.02%。甲烷气体谐波检测系统可广泛应用于煤矿和天然气站等领域进行现场实时监测,它具有测量方便,灵敏度高,重复性好等优点。其它环境污染气体的浓度也可用类似的方法测量。

### 参考文献:

- [1] 叶险峰,汤伟中.  $\text{CH}_4$  气体光纤传感器的研究[J]. 半导体光电, 2000, 21(6): 218-220.
- [2] 王莉田,史锦珊,王玉田. 吸收式环境气体传感器[J]. 传感器技术, 1996, 6(6): 28-30.
- [3] K Unhara, H Tai. Remote detection of methane using a 1.66  $\mu\text{m}$  diode laser[J]. Appl Opt, 1992, 31(6): 809-814.
- [4] K Yamamoto H Tai and M Uchida. Long distance simultaneous detection of methane and acetylene by using diode lasers in combination with optical fibers [M]. Monterey: Calif, 1992, 333-336.
- [5] V Weldon, P Phelan, J Hegarty. Methane and carbon dioxide sensing using a DFB laser diode operating at 1.64  $\mu\text{m}$ [J]. Electron Letter, 1993, 29, 560-561.
- [6] Y Shimose, T Okamoto, A Maruyama. Remote sensing of methane gas by differential absorption measurement using a wavelength-tunable DFB LD[J]. IEEE Photon. Technol Lett. 1991, 3(1): 386-87.
- [7] K Chan, H Ito, H Inaba. Remote sensing system for near-infrared differential absorption of  $\text{CH}_4$  gas using low-loss optical fiber link [J]. Appl Opt, 1984, 23 (19): 3415-3419.