

# 光纤甲烷气体传感器的研究

褚衍平, 张景超, 管立君  
(燕山大学理学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**基于甲烷气体近红外吸收的机理,研究了一种高灵敏度易于实现的光纤甲烷气体传感器。分析了半导体激光器的调制特性和谐波检测的基本原理,建立了传感器的数学模型。系统采用分布反馈式半导体激光器做光源,气室采用小型渐变折射率透镜构成的气室,加入参考光路和参考气室,使光源输出的中心波长锁定在气体的吸收峰上,通过光源调制实现气体浓度的谐波检测,给出了甲烷气体测量的实验结果。

**关键词:**近红外吸收;谐波检测;气体传感器;甲烷

**中图分类号:**TP212.14 **文献标识码:**A

## Research on Fiber Methane Gas Sensor

CHU Yan-ping, ZHANG Jing-chao, GUAN Li-jun  
(College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** An easy-realizable fiber methane gas sensor with high sensitivity is demonstrated based on the near infrared spectral absorption of methane. The modulating characteristic of diode laser and the principle of harmonic detection are analysed. The mathematical model of sensor is built up. Distribute feed back laser diode is used as a light source. The gas cell used is made up with grin lens. The referenced optical path and referenced gas cell are appended so that the center wavelength of the diode laser is locked in the absorption peak of methane. Gas concentration harmonic detection is achieved by light source modulation. The experiment result of the methane detection system is shown.

**Key words:** near-infrared absorption; harmonic detection; gas sensor; methane

### 1 引言

甲烷是易燃易爆气体,是矿井中瓦斯和多种液体燃料的主要成分。瓦斯爆炸是煤矿安全的最大威胁,据统计,我国的瓦斯事故已占到煤矿事故的80%以上。瓦斯爆炸需要同时满足三个条件,即矿井中氧气浓度在18%以上,甲烷浓度在5%~15%范围之内,有明火存在。因此对甲烷气体浓度进行准确、快速实时监测和预警是治理瓦斯灾害的有效手段,对保障矿工的生命财产安全是至关重要的。目前,甲烷的监测还主要采用化学传感器,这类传感器由于采用的是化学敏感元件,容易受到表面污染,需要定期更换,而且易受其他气体的干扰,长时间工作时存在零点漂移和灵敏度变化,会直接影响监测系统的可靠性。

光纤气体检测技术是一种新兴的气体检测技术,随着低损耗光纤的实用化,它可以实现远距离传输信号,把气体敏感单元放在易燃、易爆、有毒、高温的环境中,在安全的地方进行信号处理,而且它还不受电磁干扰,测量灵敏度高,响应速度快,易于组成传感网络,已有众多学者投入到这方面的研究<sup>[1-4]</sup>。基于气体分子的近红外吸收特性的光纤气体传感技术是利用气体分子振动的倍频或合频吸收,与气体分子在中红外的本征吸收相比吸收非常弱,但近红外波段的半导体激光器由于光纤通信技术的发展价格越来越低,可以使检测系统具有较高的稳定性和

**作者简介:**褚衍平(1983-),男,硕士生,主要研究方向为光电检测及光纤气体传感技术。E-mail:yunzaifei520@163.com  
**收稿日期:**2008-03-31

性价比。利用波长调制技术(WMS)或频率调制技术(FMS)可以有效地检测此类微弱信号。本文在分析气体浓度谐波检测的基础上,基于甲烷气体在近红外波段的吸收特性,选择合适的半导体光源,设计出光纤甲烷气体检测系统,并采取稳频措施,对激光器输出的中心波长进行锁定。

## 2 基本原理

半导体激光器的注入电流受到一个余弦信号的调制,其注入电流可以表示为:

$$i(t) = i_0 + i_b \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

式中,  $i_0$  为激光器的偏置电流;  $i_b$  为调制电流的幅值;  $f$  为调制频率,由于激光器的输出频率随其注入电流变化,它的输出频率在某一时刻可以表示为:

$$\nu(t) = \nu_c + \nu_b \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

式中,  $\nu_c$  为激光器在偏置电流  $i_0$  时所对应的频率;  $\nu_b$  为频率调制幅度。

如果气体的吸收谱线在入射光谱的范围之内,那么光通过气体以后,在相应谱线处会发生光强的衰减,输出光强  $I(\nu)$ , 输入光强  $I_0(\nu)$  和气体浓度之间用比尔-朗伯定律表示:

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu)LC] \quad (3)$$

式中,  $\alpha(\nu)$  为气体在某一频率处的吸收系数;  $C$  为气体浓度;  $L$  为光通过气体的长度。在理想情况下,认为激光器输出光强不随频率变化,经气室后光电探测器所接受到的光强为  $I_D$ , 则:

$$I_D(\nu_c, \nu_b, t) = TI_0 \exp[-\alpha(\nu_c + \nu_b \cos(2\pi ft)) \cdot LC] \quad (4)$$

式中,  $T$  为系统设备的光强传递函数,在频率变化不大时可认为是常数。由于  $\alpha(\nu)LC \ll 1$ , 则式(4)可以化简为:

$$I_D(\nu_c, \nu_b, t) = TI_0 [1 - \alpha(\nu_c + \nu_b \cos(2\pi ft))LC] \quad (5)$$

$I_D(\nu_c, \nu_b, t)$  是关于  $t$  的偶函数,进行傅里叶展开,得:

$$I_D(\nu_c, \nu_b, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(2\pi nft) \quad (6)$$

其中,对应于  $n > 1$  次傅里叶系数为:

$$A_n = -\frac{2}{\tau} TI_0 LC \times \int_0^{\tau} \alpha(\nu_c + \nu_b \cos(2\pi ft)) \cdot \cos(2\pi nft) dt \quad (7)$$

式中,  $\tau$  为半个余弦周期;积分项在  $\nu_c, \nu_b$  确定时为常数。

$I_D(\nu_c, \nu_b, t)$  的  $n$  次傅里叶系数  $A_n$  的幅值与待测气体的浓度成正比。经光电探测器把光信号转换为电信号,利用锁相放大器对其  $n$  次谐波进行检测。

气体压力接近一个标准大气压时,红外光谱的

碰撞展宽起主要作用,可用 Lorentz 曲线描述甲烷分子的吸收谱线型:

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

式中,  $\alpha_0$  表示纯气体在吸收线中心的吸收系数;  $\nu_g$  和  $\delta\nu$  分别对应吸收峰的中心频率和吸收线半宽,可见为一对称吸收线型。

对于对称的吸收线型来说,偶次谐波分量的最大值出现在中心波长处,奇次谐波分量的最大值相对中心波长有一个偏移,而且随着谐波次数的增加,其幅值逐渐降低,又由于低次谐波分量容易被锁相放大器检测,测量二次谐波信号能够非常有效地测得气体的浓度<sup>[5-7]</sup>,因此我们选用二次谐波信号作为气体浓度的测量信号。由式(7)可得:

$$A_2 = -\frac{2}{\tau} TI_0 LC \times \int_0^{\tau} \alpha(\nu_c + \nu_b \cos(2\pi ft)) \cdot \cos(4\pi ft) dt \quad (9)$$

如果在实验中能够取定  $\nu_c$  和  $\nu_b$  的值,则  $\int_0^{\tau} \alpha(\nu_c + \nu_b \cos(2\pi ft)) \cos(4\pi ft) dt = h$  为一常数,所以:

$$A_2 = -\frac{2}{\tau} TI_0 LC h \quad (10)$$

即通过测量二次谐波的强度就可以得到气体的浓度。

## 3 系统设计

### 3.1 光源的选择

光纤气体传感器所选用光源应满足的条件是:输出中心频率同气体的吸收谱线特征相吻合,与光纤的低损耗窗口相适应,温度特性良好。甲烷气体分子具有的4个基本振动所对应的波长分别为  $3.433\mu\text{m}$ ,  $6.522\mu\text{m}$ ,  $3.312\mu\text{m}$  和  $7.658\mu\text{m}$ , 这些波段位于适应光纤的高衰减区,且此波段的光源和探测器需要低温制冷,结构笨重,不能广泛应用于光纤气体传感器。甲烷气体分子在泛频带  $2\nu_3$  和组合频带  $\nu_2 + 2\nu_3$  有较强的吸收,波长分别为  $1.6\mu\text{m}$  和  $1.3\mu\text{m}$  左右,甲烷在  $1.66\mu\text{m}$  附近的精细结构谱图如图1所示。

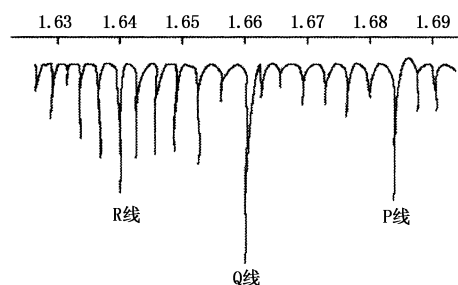


图1 甲烷分子在  $1.66\mu\text{m}$  附近的吸收谱

可见,甲烷气体在  $1.66\mu\text{m}$  有比较明显的吸收,因此,实验选用中心波长为  $1.66\mu\text{m}$  的分布反馈式半导体激光器(DFB LD)作为光源。

分布反馈式(DFB)半导体激光器是将光栅放在半导体激光器的有源区内代替反射面进行反射,由于光栅只反射一定波长的光波,所以在多个频谱中选取了与光栅固有波长相同的光震荡,具有谱线窄、功率大、单纵模运行等特点,并且可以通过调制温度和注入电流来粗调和精调其输出波长。分布反馈式半导体激光器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有诸多优点,是光纤气体传感器的首选光源。

### 3.2 气室的选择

气室选用特殊设计的小型渐变折射率透镜构成的开放式气室,通光的中心波长为  $1665\text{nm}$ ,带宽约为  $20\text{nm}$ ,满足系统中所选光源的要求,插入损耗小于等于  $0.05\text{dB}$ ,气室长度  $50\text{mm}$ ,气室结构如图2所示。

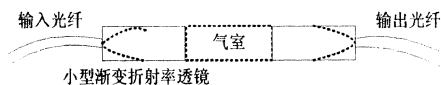


图2 气室结构

小型渐变折射率透镜可以设计带尾纤,能够与光纤很好地耦合,用这种器件构成的气室耦合损耗小,易准直,温度稳定性,抗震性都远远超过分立元件组成的气室。

### 3.3 系统的组成

光纤甲烷传感系统框图如图3所示,主要由光源部分、测量光路、参考光路、调制电路、光电转换和信号处理部分组成。信号发生电路产生正弦波,通过调节激光器的注入电流对其输出波长进行调制,使其扫描的范围正好覆盖气体的某一个吸收峰。从DFB LD出射的激光经光隔离器到50:50的光纤耦合器,一部分光到测量气室,另外一部分到达参考气室,参考气室装有100%的纯甲烷气体,从参考气室输出的光经光电探测器转化为电信号,由锁相放大器提取其一次谐波信号经积分器作为反馈信号使激光器的输出波长精确地锁定在气体的吸收峰上,使原理部分提到的  $\nu_0$  等于气体的吸收峰。从测量气室输出的光经光电探测器转化为电信号,用锁相放大器提取其二次谐波信号,然后通过计算机进行数据采集与处理。

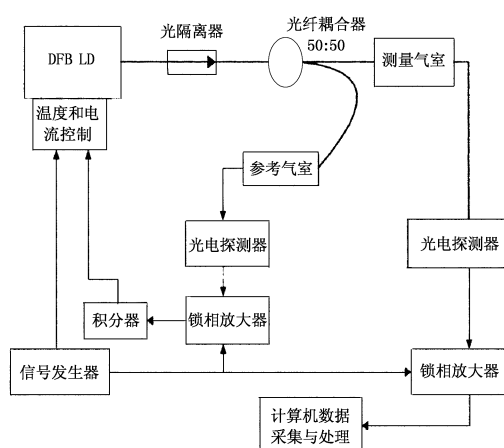


图3 采取稳频措施的光纤甲烷气体检测系统框图

## 4 实验及结果

采用图3所示的系统进行实验,选用  $2\text{km}$  的  $9/125\mu\text{m}$  单模光纤,在  $1.6\mu\text{m}$  波长左右的传输损耗低于  $1\text{dB/km}$ ;选用低噪声,高灵敏度的 InGaAs PIN 光电二极管作为光电探测器,其波长响应范围在  $850 \sim 1700\text{nm}$ ;选用 SR830 型号的数字锁相放大器,选择其灵敏度为  $1\text{V}$ ,时间常数为  $100\text{ms}$ 。参考气室中装有100%的纯甲烷气体。测量气室与外界之间用微孔滤膜隔开,消除外界干扰气体的影响。首先利用氮气对气室进行“冲洗”,即可认为气室中没有待测气体,这时系统的输出就是“零点”。将不同浓度的甲烷标准气体通入气室进行测量,为了抑制气室中由于光反射而产生的干涉噪声,选择合适的调制信号频率幅度,使干涉噪声最小,记下不同浓度时的二次谐波信号强度。根据测量结果对在不同浓度时的二次谐波信号幅值与气体浓度进行线性拟合,如图4所示,表明二次谐波信号的幅值与气体浓度之间具有非常好的线性关系。

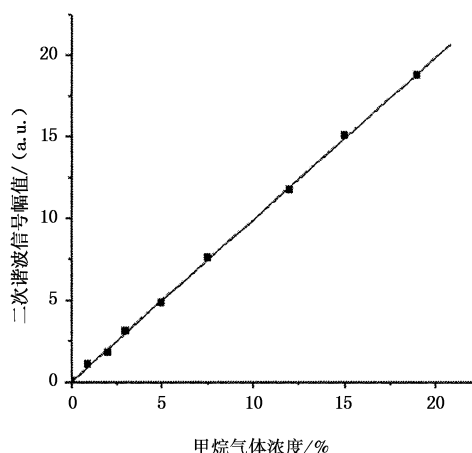


图4 甲烷气体浓度检测实验曲线

在相同条件下,经过多次测试,信号间的最大偏差小于  $0.2\%$ ,其重复性稳定性良好。同时实验测得甲烷浓度为  $0.04\%$  时的信噪比约等于  $2$ ,与没有

加参考气室和运用分立元件构成的气室的传感系统相比,其测量灵敏度和稳定性有很大提高,表明此传感器完全能满足甲烷浓度的实时检测。

## 5 结 论

理论和实验研究了基于近红外吸收和谐波检测原理的光纤甲烷气体传感器,采用小型渐变折射率构成的气室,加入参考光路和参考气室,使系统具有较高的测量精度和稳定性。该传感器能够广泛应用于矿井、天然气站等领域对甲烷气体进行实时监测,与传统监测技术相比有许多优点,它利用光纤作为传输通道,不受电磁干扰,而且近红外波段光纤损耗比较低,可以实现远距离测量。另外,更换其他波长的激光器,用同样的方法可以实现对在近红外有泛频或合频吸收的其他气体进行检测,比如测量一氧化碳、二氧化碳、甲醛、乙炔等气体。

## 参考文献:

- [1] B Culshaw, G Stewart, F Dong, et al. Fiber optic techniques for spectroscopic methane detection-concept to system realization [J]. Sensors and Actuators B, 1998, 51:

25 - 37.

- [2] Uehara K, Tai H. Remote detection of methane using a diode laser [J]. Appl. Opt., 1992, 31: 809 - 814.  
 [3] 王书涛, 车仁生. 光谱吸收式光纤甲烷气体传感器及其信号处理方法 [J]. 光电工程, 2006, 33 (1): 112 - 115.  
 [4] G Whitenett, G Stewart, et al. Optical fiber instrumentation for environmental monitoring application [J]. J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 2003, 5: 140 - 145.  
 [5] R Engelbrecht. A compact NIR fiber-optic diode laser spectrometer for CO and CO<sub>2</sub>: analysis of observed 2f wavelength modulation spectroscopy line shapes [J]. Spectrochimica Acta Part A, 2004, 60: 3291 - 3298.  
 [6] David S Bomse, Alan C Stanton, Joel A Silver. Frequency modulation and wavelength modulation spectroscopies: comparison of experimental methods using a lead-salt diode laser [J]. Applied Optics, 1992, 31 (6): 718 - 731.  
 [7] Min Zhang, D N Wang, Wei Jin, et al. Wavelength modulation technique for intra-cavity absorption gas sensor [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2004, 53 (1): 136 - 139.

(上接第 667 页)

式中,

$$\Gamma_h = \frac{\begin{vmatrix} K_0\left(\frac{R_1}{L_h}\right) & K_1\left(\frac{r_N}{L_h}\right) \\ I_0\left(\frac{R_1}{L_h}\right) & -I_1\left(\frac{r_N}{L_h}\right) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} K_0\left(\frac{R_1}{L_h}\right) & K_0\left(\frac{R_2 - r_N}{L_h}\right) \\ I_0\left(\frac{R_1}{L_h}\right) & I_0\left(\frac{R_2 r_N}{L_h}\right) \end{vmatrix}}, \quad (13)$$

$$\Gamma_e = \frac{\begin{vmatrix} K_0\left(\frac{R_3}{L_e}\right) & K_1\left(\frac{r_P}{L_e}\right) \\ I_0\left(\frac{R_3}{L_e}\right) & -I_1\left(\frac{r_P}{L_e}\right) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} K_0\left(\frac{R_3}{L_e}\right) & K_0\left(\frac{R_2 - r_P}{L_e}\right) \\ I_0\left(\frac{R_3}{L_e}\right) & I_0\left(\frac{R_2 + r_P}{L_e}\right) \end{vmatrix}}$$

其中,  $I_0()$  和  $I_1()$  分别为零阶和一阶的第一类修正贝塞尔函数;  $K_0()$  和  $K_1()$  分别为零阶和一阶的第二类修正贝塞尔函数。

## 3 结 论

比较平面 PN 结和环孔 PN 结的  $I-V$  关系式 (11) 和式 (12) 可以看到, 环孔 PN 结的  $I-V$  方程中多了如式 (13) 所示的  $\Gamma_h, \Gamma_e$  两项, 其中涉及  $r_N$  和  $r_P$

两个量, 它们确定了环孔 PN 结耗尽区的宽度, 可以通过求解泊松方程得到其具体数值<sup>[4]</sup>。

即使从直观上判断, 由于几何结构上的不同, 平面 PN 结的  $I-V$  关系与环孔 PN 结的  $I-V$  关系也应该有所差异。从具体表达式来看, 这种差异就在于环孔 PN 结的表达式中引入了贝塞尔函数项。文献 [5] 中从平面 PN 结的连续性方程推导出环孔 PN 结的结果, 这种处理方法在逻辑上值得商榷。

当器件的工艺参数确定以后, 不管是式 (11) 还是式 (12),  $f(V)$  前面的诸项最终都可以归结为一个常数。这一点反映在实际测试中, 就是一般并没有刻意区分是环孔 PN 结还是平面 PN 结, 处理方法上往往是一样的。换言之, 可以认为环孔 PN 结又被等效为一个平面 PN 结。

## 参考文献:

- [1] Mohamed Henini, Manijeh Razeghi. Handbook of Infrared Detection Technologies [M]. Elsevier Science Ltd., 2002.  
 [2] Robert F. Pierret. 半导体器件基础 [M]. 黄如, 王漪, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2004, 11.  
 [3] E B Magrab, et al. MATLAB 原理与工程应用 [M]. 高会生, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002.  
 [4] 王忆锋, 庄继胜. 反向偏置下砷镓汞环孔 PN 结耗尽区电容的计算 [J]. 激光与红外, 2006, 36 (12): 1139 - 1141.  
 [5] 邢素霞, 蔡毅, 常本康. 环孔 p-n 结理论分析 [J]. 红外技术, 2002, 24 (1): 27 - 29.