

doi:10.3788/gzxb20124112.1479

# 基于波长扫描的差分吸收光纤煤矿瓦斯传感系统设计

肖尚辉<sup>1,2</sup>, 唐才杰<sup>3</sup>, 江毅<sup>3</sup>, 汤俊<sup>4</sup>

(1 电子科技大学 通信抗干扰重点实验室, 成都 611731)

(2 宜宾学院 物理与电子工程学院, 四川 宜宾 644007)

(3 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

(4 川煤集团芙蓉煤矿有限公司, 四川 宜宾 644002)

**摘 要:**以 1 330 nm 波段的超辐射发光二极管为光源, 利用可调谐光纤法珀滤波器为滤光元件, 设计了一套光纤煤矿瓦斯传感系统. 该系统采用了参考测量方法和差分吸收技术: 一路参考光被引出用以消除光源波动的影响; 扫描光纤法珀滤波器获得信号光波长和参考光波长, 在实现差分吸收测量的同时, 避免了不同滤光元件性能差异和中心波长漂移的影响. 实验结果表明, 所设计的光纤煤矿瓦斯传感系统的最低可探测甲烷浓度为 0.15%.

**关键词:**光纤元件; 甲烷传感; 差分吸收; 可调谐光纤法珀滤波器

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)12-1479-4

## 0 引言

瓦斯爆炸是煤矿最严重的灾难之一. 煤矿瓦斯的主要成分是甲烷, 甲烷是易燃、易爆气体, 在空气中的爆炸下限是 5.3%, 上限是 15%, 所以对煤矿瓦斯中的甲烷浓度进行安全、可靠、实时、在线监测对保障煤矿安全生产具有重要的意义. 光纤气体传感器具有阻燃、防爆、抗电磁干扰、不易中毒等优点, 可将传感头放置在易燃、易爆环境中实现远距离遥测, 因而得到广泛关注<sup>[1-2]</sup>.

吸收光谱法是检测气体的重要方法, 为了提高检测的灵敏度和稳定性, 出现了频率调制光谱法和差分吸收法<sup>[3]</sup>. 其中差分吸收法能够有效地消除由散射、气体波动、粉尘、水汽、连接光纤、传感头等带来的光强变化影响, 获得较高的灵敏度, 得到广泛的应用<sup>[4-7]</sup>. 用干涉滤光片<sup>[4-5]</sup>或光纤光栅<sup>[6]</sup>对宽带光源滤光可以获取差分吸收测量所需要信号光和参考光. 这种采用固定波长滤光元件的双波长差分吸收方法, 在没有被测气体的情况下测量信号光、参考光光强的比值作为测量的零基准, 没有考虑光源光谱波动带来的信号光、参考光光强比值变化的影响; 信号光和参考光来自不同的滤光元件, 没有考虑滤光元件性能变化差异带来的信号光、参考光光强比值变化的影响. 同时, 从甲烷的吸收光谱可以看出, 在吸收峰处, 吸收系数随波长变化显著, 采用固定波长滤波器, 中心波长的微小漂移都将带来较大的测量

误差, 这就对滤光元件的中心波长的准确度和稳定性提出了很高的要求. 针对这些问题, 本文以 1 330 nm 波段的超辐射发光二极管 (Super Luminescent Diode, SLD) 为光源, 利用可调谐光纤法珀滤波器 (Fiber Fabry-Perot Tunable Filter, FFP-TF) 为滤光元件, 设计了一套光纤煤矿瓦斯传感系统. 提出了基于波长扫描技术的参考测量法: 通过引出参考光路比较去除光源波动的影响, 通过扫描光纤法珀滤波器获取信号光波长和参考光波长进行差分吸收测量.

## 1 煤矿瓦斯传感系统设计

煤矿瓦斯光纤传感测量系统的设计原理如图 1 所示. 超辐射发光二极管的输出光经过光纤可调谐法珀滤波器, 获得波长扫描窄带光, 窄带光经光纤耦合器 1 分成两路, 其中一路光进入测量光路, 经光纤

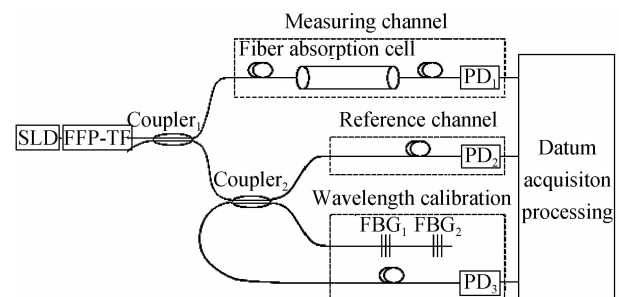


图 1 光纤煤矿瓦斯传感系统原理

Fig. 1 Diagram of the designed optic fiber methane sensing system

基金项目: 四川省科技厅科技支撑项目 (No. 2011GZ0254) 和宜宾市科技局重点科技项目 (No. 2010GY023) 资助

第一作者: 肖尚辉 (1973-), 教授, 博士研究生, 主要研究方向为通信与光纤传感信号处理、煤矿瓦斯监测. Email xiaosh73@163.com

收稿日期: 2012-06-04; 修回日期: 2012-08-08

传输进入吸收气室,获得测量信息,进入返回光纤. 光纤耦合器 1 的另一路输出光经光纤耦合器 2 分成 2 路,一路直接探测作为参考去除光源波动的影响;另一路接入 2 只波长稳定的光纤光栅,通过监测光纤光栅的反射光波长来进行波长标定. 3 路光分别经光电探测器转换为电信号,进入信号采集与处理系统,进行差分吸收测量.

光波通过介质时,部分被介质吸收和散射,余下的按原来传播的方向继续前进,由比尔(Beer)定律可知,透射光强  $I_{out}(\lambda)$  满足关系式<sup>[8]</sup>

$$I_{out}(\lambda) = I_{in}(\lambda) \exp \{ -[\alpha(\lambda)cl + \beta(\lambda)l + \gamma(\lambda)l + \delta] \} \quad (1)$$

式中,  $I_{in}(\lambda)$  为入射光强,  $\alpha(\lambda)$  为一定波长下单位浓度、单位作用长度介质的吸收系数,  $l$  为待测气体与光相互作用的长度,  $c$  为待测气体浓度,  $\beta(\lambda)$  是瑞利散射系数,  $\gamma(\lambda)$  是米氏散射系数,  $\delta$  是气体密度波动造成的吸收系数.

因此 PD<sub>1</sub> 探测到测量光路的输出光强为

$$I_1(\lambda) = I_0(\lambda) T_F(\lambda) a C_1 \exp \{ -[\alpha(\lambda)cl + \beta(\lambda)l + \gamma(\lambda)l + \delta] \} K_1(\lambda) \quad (2)$$

PD<sub>2</sub> 探测到参考光路的输出光强为

$$I_2(\lambda) = I_0(\lambda) T_F(\lambda) (1-a) b C_2 K_2(\lambda) \quad (3)$$

式中,  $I_0(\lambda)$  为 SLD 的输出光强,  $T_F(\lambda)$  为 FFP-TF 的传输函数;  $a$  为光纤耦合器 1 的输入端到测量光路的效率,  $b$  为光纤耦合器 2 的输入端到参考光路的效率;  $C_1$  为测量光路的效率(经过了光纤、接头、气室等损耗),  $C_2$  为参考光路的效率;  $K_1(\lambda)$ 、 $K_2(\lambda)$  分别为探测器 1、2 的光电转换效率.

根据式(2)、(3)可计算出气体浓度为

$$c = - \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]l} \ln \left[ \frac{K_1(\lambda_1) K_2(\lambda_2)}{K_2(\lambda_1) K_1(\lambda_2)} \right] \quad (4)$$

## 2 系统实验与测试结果

根据图 1 所示的方案构建了传感系统并进行了实验. 光源为一只 1 330 nm 波段的超辐射发光二极管, 谱宽 50 nm, 输出光功率 1 mW. 光纤可调谐滤波器的精细度  $F=308$ 、自由光谱区  $FSR=184.36$  GHz. 吸收气室的工作距离为 244 mm, 损耗为 5.4 dB. 耦合器 1 的分光比为 80 : 20, 80% 端接吸收气室, 耦合器 2 的分光比为 50 : 50. 光纤光栅的反射波长分别为 1 318.24 nm 和 1 333.44 nm. 由于安全要求, 未能获得高浓度甲烷气体; 同时受实验条件限制, 没有精密的配气系统, 所以实验中仅对 3.08% 的甲烷标准气体进行了测量.

由于光纤可调谐法珀滤波器存在压电陶瓷产生的波长非线性响应、材料的温度系数带来的波长漂

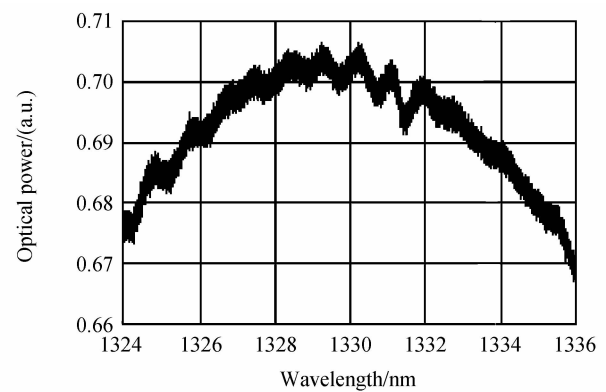
移, 为了标定系统的波长, 两只已知波长的光纤作为波长参考被接入系统. 光纤可调谐法珀滤波器由锯齿波扫描, 测量在锯齿波的上升沿完成. 系统波长标定的方法如下: 三路信号被采集输入计算机; 通过判断波长参考信号通道的峰值点位置, 获得了光纤光栅的中心波长  $\lambda_{FBG1}$ 、 $\lambda_{FBG2}$  对应的采样点  $N_1$ 、 $N_2$ , 则采集信号的相邻数据点的波长步长和第  $N$  采样点对应的波长为<sup>[9]</sup>

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{FBG1} - \lambda_{FBG2}}{N_1 - N_2} \quad (5)$$

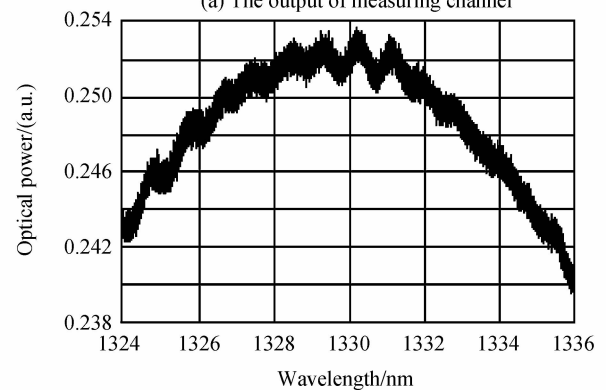
$$\lambda = \lambda_{FBG1} + \Delta\lambda(N - N_1) \quad (6)$$

从而实现了波长的大致标定.

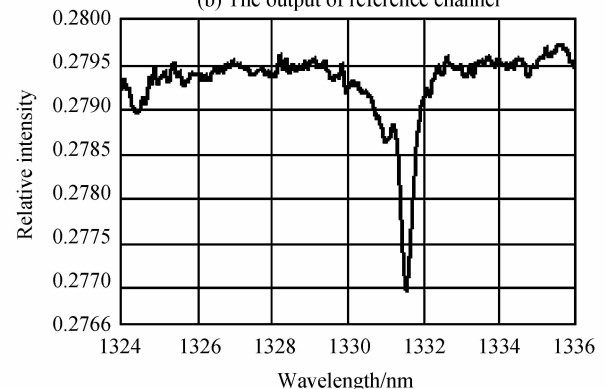
测量通道的输出信号如图 2(a) 所示, 图中噪音



(a) The output of measuring channel



(b) The output of reference channel



(c) Relative intensity of the output of the measuring channel to that of the reference channel

图 2 实验系统信号处理过程的测量结果  
Fig. 2 The measurement results of signal processing for systems

大的原因主要是由于光源功率低、气室损耗大造成的。噪音可以通过增加光源强度,减小气室损耗,改进电路和信号处理等得到抑制。信号中还携带了明显的纹波,这种纹波是由于 SLD 本身带来的。由于 SLD 的光学腔中有一个面镀了高反射膜,使得 SLD 输出光谱中带有明显的纹波(ripple)。参考通道的输出信号同样存在很大的噪音和波纹,如图 2(b)所示。将测量通道的输出信号除以参考信号,去除了光源光谱的影响,再通过数字低通滤波器滤除噪音和纹波。数字低通滤波器使用 FIR 滤波器,它具有线性相位响应,不会使滤波后的信号光谱产生变化。实验结果表明,数字低通 FIR 滤波器有效地滤除了高频噪音和纹波,同时保存了瓦斯吸收峰,得到的归一化光谱如图 2(c)所示。

在 1 331.5 nm 附近判断甲烷透射光谱的最小值,获得了吸收波长  $\lambda_1$  和对应的相对光强  $f(\lambda_1)$ 。考波长  $\lambda_2$  的相对光强  $f(\lambda_2)$  在 1 328~1 329 nm<sup>[10]</sup> 做了平均,这样可以减少噪音。通过式(4),则可计算出甲烷浓度  $c$ 。

向吸收气室充入 3.08% 的甲烷标准气体连续测量 5 min,光纤可调谐法珀滤波器完成一次扫描测量的时间约 3 s,测量结果如图 3 所示。通过计算得到测量浓度的标准差为  $\sigma=0.118\%$ ,平均值为

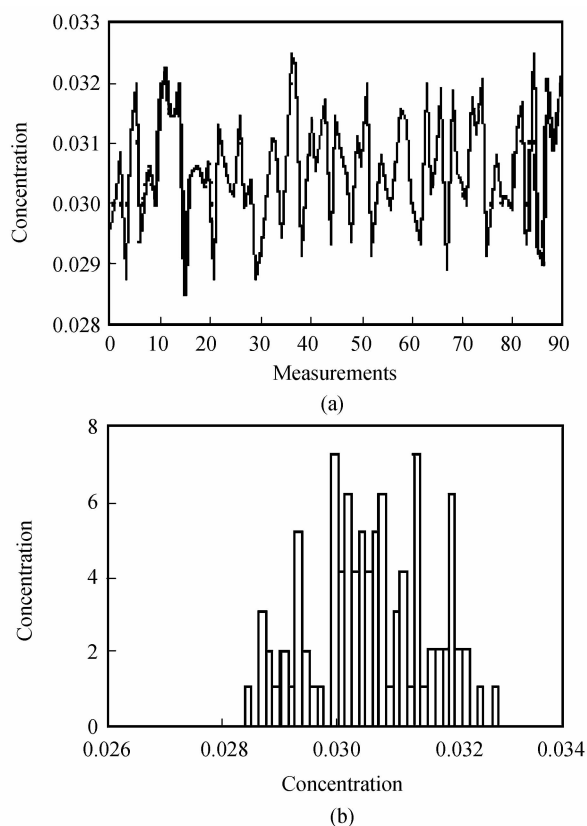


图 3 连续测量 5 min 的波形图以及统计图  
Fig. 3 Waveform chart and histograms of the measurements over a 5-minute period for the standard gas

$u=3.07\%$ 。测量结果的信噪比 SNR 可以近似表示为  $SNR=u/\sigma=26$ 。把  $SNR=1$  作为探测极限,则最小可探测甲烷浓度为:  $c_{\min}=c/SNR=3.08\%/26\leq 0.15\%$ ,为甲烷在空气中的爆炸下限的 3%。

### 3 结论

利用 1 330 nm 的超辐射发光二极管作光源,可调谐光纤法珀滤波器作滤光元件,设计和实现了煤矿瓦斯的全光纤差分吸收测量系统。测量系统引入了参考光路,利用相对光强而不是原始探测光强做差分吸收测量,消除了光源波动的影响。差分吸收测量的信号光和参考光来自同一滤波器,消除了双滤光元件性能差异的影响。通过扫描可调谐光纤法珀滤波器、波长标定和信号处理获得差分吸收波长,不受滤光元件中心波长漂移的影响。

系统最小可探测气体浓度 0.15%,这个指标和已发表的双滤波器差分测量方法相比还存在差距。系统的最小可探测气体浓度受差分吸收系数、气室长度、探测光强和探测噪音的影响。由于测量通道的透射光强今约为  $1 \mu W$ ,光源的谱宽为 50 nm,测量只用了其中一部分光谱,因此所得到信号的信噪比低。通过减小气室损耗,增大光源功率,同时改进光电检测电路和信号处理方法,能够大大减小信号的噪音,提高传感器系统的测量分辨率。

#### 参考文献

- [1] WANG Zhuo, CAO Jia-nian, ZHANG Ke-ke, *et al.* Optical low-concentration methane gas sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 255-258.  
王琢,曹家年,张可可,等. 光学式低浓度甲烷气体传感器的研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 255-258.
- [2] LIU Xiao-hui, WANG Chang, LIU Tong-yu, *et al.* Fiber grating water pressure sensor and system for mine [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 112-114.  
刘小会,王昌,刘统玉,等. 矿井下用光纤光栅水压传感器及系统[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 112-114.
- [3] CULSHAW B, STEWART G, DONG F, *et al.* Fibre optic techniques for remote spectroscopic methane detection-from concept to system realization [J]. *Sensors and Actuators B*, 1998, **51**(1-3): 25-37.
- [4] CHAN K, ITO H, INABA H. Remote sensing system for near-infrared differential absorption of  $CH_4$  gas using low-loss optical fiber link [J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(19): 3415-3420.
- [5] WANG Yu-tian, GUO Zeng-jun, WANG Li-tian. Study on difference absorption optical fiber  $CH_4$  sensor [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(7): 675-678.  
王玉田,郭增军,王莉田. 差分吸收式光纤甲烷气体传感器的研究[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(7): 675-678.
- [6] LIN Feng, CAI Hai-wen, XIA Zhi-ping. Study on fiber methane sensing system using FBG filters [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **4**(32): 549-552.  
林枫,蔡海文,夏志平. 光纤光栅滤波的瓦斯传感系统的研究[J]. *中国激光*, 2005, **4**(32): 549-552.
- [7] PFEIFFER P, MEYRUEIS P, PATILLON D. Limiting

- sensitivity of a differential absorption spectrometer with direct detection in the  $2\nu_3$  and  $\nu_2 + 2\nu_3$  vibration bands [J]. *Instrumentation and Measurement*, 2004, **53**(1): 45-50.
- [8] KUNTZ M, HOPFNER M. Efficient line-by-line calculation of absorption coefficients [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1999, **63**(1): 97-114.
- [9] MILLER C M. Characteristics and applications of high performance, tunable, fiber Fabry-Perot filters [C]. Proceedings of 41st Electronic Components and Technology Conference, 1991: 489-492.
- [10] ROTHMAN L S, JACQUEMARTA D, BARBE A. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, **96**(2): 139-204.

## Design on Optical Fiber Methane Sensing Systems Employing Wavelength-Scanning Based Differential Absorption Techniques

XIAO Shang-hui<sup>1,2</sup>, TANG Cai-jie<sup>3</sup>, JIANG Yi<sup>3</sup>, TANG Jun<sup>4</sup>

(1 National Key Lab of Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

(2 School of Physics and Electronic Engineering, Yibin University, Yibin, Sichuan 644007, China)

(3 School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(4 Sichuan Coal Group Furong Company, Yibin, Sichuan 644002, China)

**Abstract:** Utilizing a super-luminescent diode (SLD) in 1 330 nm band and a fiber Fabry-Perot tunable filter (FFP-TF), an optical fiber methane sensing system is experimentally demonstrated. The differential absorption technique and a reference method are employed; a reference channel is introduced to eliminate the fluctuation of light source spectrum, and the two wavelengths are acquired by tuning the FFP-TF. The influence of the light source, loss of leading fiber, and the filters' variations are all avoided. A minimum detectable methane concentration of 0.15% achieved.

**Key words:** Fiber optic sensor; Methane sensing; Differential absorption; Fiber Fabry-Perot tunable filter