

文章编号: 0258-7025(2005)04-0549-04

光纤光栅滤波的瓦斯传感系统的研究

林 枫, 蔡海文, 夏志平, 耿健新, 陈 刚, 瞿荣辉, 方祖捷, 王向朝

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 差分吸收法在进行瓦斯远距离监测的重要方法, 根据瓦斯在近红外波段的吸收特性, 报道了一种新型的远距离光纤瓦斯传感系统。采用 $1.3 \mu\text{m}$ 超辐射发光二极管为光源, 利用光纤布拉格光栅 (FBG) 优良的窄带滤波特性实现了对瓦斯的差分吸收测量。和传统的干涉滤光片相比, 光纤光栅滤波器插入损耗低、制备简单。系统具有全光纤化、结构简单、工作距离远、稳定性好的特点。工作距离 10 km, 测量灵敏度为 0.1%, 是瓦斯爆炸极限的 2%。

关键词 光学器件; 瓦斯传感; 光纤光栅; 差分吸收

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Study on Fiber Methane Sensing System Using FBG Filters

LIN Feng, CAI Hai-wen, XIA Zhi-ping, GENG Jian-xin, CHEN Gang, QU Rong-hui,
FANG Zu-jie, WANG Xiang-zhao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Differential absorption method is an important method for methane remote monitoring. Based on the methane absorption spectrum in near-infrared region, a novel kind of fiber remote sensing system utilizing fiber Bragg grating (FBG) filters and $1.31 \mu\text{m}$ superradiance light-emitting diode (SLED) was developed for real time absorption measurement. The highly sensitive technique was achieved employing the two-wavelength differential absorption method. FBG has low insert loss and can be produced easily compared with dielectric interference filters. This system has a number of advantages such as all-fiber sensor, high sensibility, simply construct and long-distance measurement. The measurement sensitivity is 0.1%. It is 2% of the lower explosion limit of methane density in air.

Key words optical devices; methane sensing; fiber Bragg grating; differential absorption

1 引 言

瓦斯气体的主要成分是甲烷 (CH_4), 甲烷是易燃易爆气体, 是天然气、沼气和多种液体燃料的主要成分, 是重要的工业原料和日常生活的燃气, 在大气中爆炸的下限为 5.3%, 上限为 15%。瓦斯事故是煤矿安全生产的主要威胁之一。同时甲烷也被认为是温室效应最重要的气体之一。甲烷吸收红外线的能力是二氧化碳的 15 倍以上, 占据整个温室效应的 15%。因此开发一种安全可靠、高灵敏度的甲烷传感系统具有重大的社会意义和经济意义。

频率调制光谱法和差分吸收法是用于瓦斯远距离检测的两种主要方法^[1]。差分吸收法能够有效地消除由散射、气体波动和光路损耗带来的系统误差,

获得较高的灵敏度, 从而得到广泛的应用^[2~4]。差分吸收法需要对宽带光源进行滤波以提取不同频率成分的信号光和参考光, 干涉滤光片是以往工作中使用的滤波元件, 用于光纤中光信号滤波时要经过两次耦合, 光路复杂, 系统损耗大; 并且由于工艺水平的限制, 滤波带宽较宽, 使得气体浓度改变时信号变化极其微弱, 要使用锁相放大器才能达到较高的探测灵敏度。本文利用光纤布拉格光栅 (FBG) 优良的窄带滤波特性实现了对瓦斯的差分吸收测量, 同时用光纤通信领域成熟的光学器件实现了系统的全光纤化设计。

2 实验原理

由介质的吸收特性可知, 当光波通过介质时, 部

收稿日期: 2004-02-24; 收到修改稿日期: 2004-05-24

作者简介: 林 枫 (1979—), 男, 河南商丘市人, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 主要从事光纤光栅传感器方面的研究。E-mail: flin@mail.siom.ac.cn

分光被吸收,部分光被散射,余下的部分按原传播方向继续前进。由比尔(Beer)定律,透射光强 I 满足关系式

$$I = KI_0 \exp[-(\alpha cl + \beta l + \gamma l + \delta)], \quad (1)$$

其中, I_0 为入射光强, K 为光学系统的总效率, α 为一定波长下的单位浓度、单位长度介质的吸收系数; β 为瑞利散射系数; γ 为米氏散射系数; δ 为气体密度波动造成的吸收系数; l 为待测气体与光相互作用的长度; c 为待测气体浓度。用两个波长(λ_1, λ_2) 相隔很近但吸收系数有很大差别的单色光同时通过待测气体,由气体波动和散射对两束光产生的影响近似相同,则气体的浓度可以表示为

$$c = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]l} \ln \frac{K(\lambda_1)I_0(\lambda_1)I(\lambda_2)}{K(\lambda_2)I_0(\lambda_2)I(\lambda_1)}, \quad (2)$$

调节光学系统使 $K(\lambda_1)I_0(\lambda_1) = K(\lambda_2)I_0(\lambda_2)$, (2) 式可以简化为

$$c = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]l} \ln \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)}, \quad (3)$$

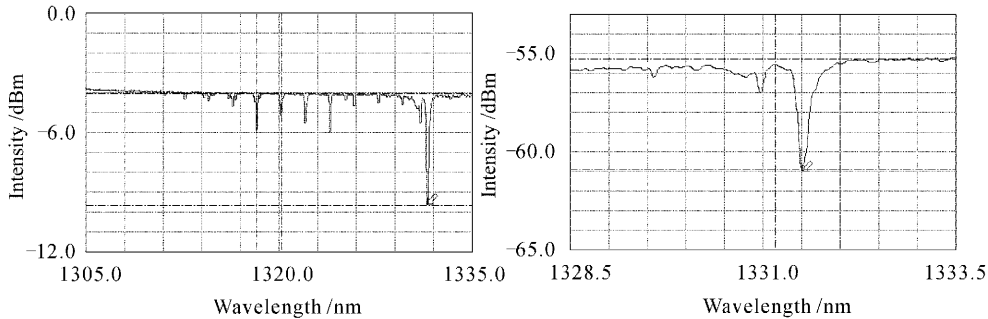


图1 瓦斯在 $1.3 \mu\text{m}$ 波段的吸收谱

Fig. 1 Absorption spectrum of methane at $1.3 \mu\text{m}$

光纤布拉格光栅是光纤的纤芯折射率沿光纤的轴向具有周期性变化的一种光纤器件,广泛用于通信和传感领域^[6,7],光纤布拉格光栅的基本光学特性就是以共振波长为中心的窄带光学滤波器,它满足如下布拉格方程

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Delta, \quad (4)$$

当宽带光在光纤布拉格光栅中传输时,产生模式耦合,满足布拉格条件的光被反射,其中, λ 为布拉格波长,即向后反射波长; n_{eff} 为光纤模式的有效折射率; Δ 为光栅周期。这样用不同周期的相位版就可以制作出不同共振波长的光纤光栅,以满足实际需要。

3 实验方案及测试结果

3.1 实验方案

实验中采用了如图2所示的实验装置。系统为

系统确定后, $\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)$, l 就可以确定,这样通过测量两束光功率的相对变化 $I(\lambda_2)/I(\lambda_1)$ 就可以得到瓦斯的浓度。

瓦斯气体的本征吸收谱在 $\lambda_1 = 3.432 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 6.78 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 3.31 \mu\text{m}$, $\lambda_4 = 7.66 \mu\text{m}$ 处,为了实现瓦斯的远距离监测可以利用这些波长的混频带和谐波带波长为 $1.3 \mu\text{m}$, $1.6 \mu\text{m}$ 处的吸收峰,对应光纤传输的低损耗区,选用 $1.3 \mu\text{m}$ 波段进行瓦斯浓度的检测。图1是瓦斯在 $1.3 \mu\text{m}$ 波段的吸收光谱,为了保证波长的准确性,用乙炔的吸收谱对光谱仪进行了校正^[5],光谱仪分辨率为 0.07 nm 。可以看到瓦斯在 1331.5 nm 处有一较强的吸收峰,峰值位置的吸收为 5.64 dB ,短波方向还有一系列较弱的吸收。而在 1318.26 nm 和 1320.18 nm 之间瓦斯对光几乎不吸收。可以选用这两个波段作为 λ_1, λ_2 实现对瓦斯的检测,同时 λ_2 的选取避免了大气中其他分子(NH_3 等)的吸收。

全光纤结构,主要由两部分组成:终端控制室和传感探头,两部分之间有 10 km 光纤相连。以 $1.3 \mu\text{m}$ 的超辐射发光二极管(SLED)为光源,经过长距离光纤传输后到达传感头,光信号返回控制室之后经光纤光栅滤波分为两束,分别由光电二极管探测接收,电信号放大后由数据采集卡进行采集,再由计算机处理。

根据瓦斯的吸收谱制备了合适的光纤光栅,光栅的反射光谱如图3所示。

FBG1的布拉格波长为 1331.5 nm , 3 dB 带宽 0.95 nm ,对应瓦斯的吸收峰的位置作为信号光;FBG2的布拉格波长为 1318.45 nm , 3 dB 带宽为 0.45 nm ,作为参考光。两光栅带宽不同,信号光带宽较宽,可以使瓦斯得到充分吸收;参考光为避免受到短波长较弱的吸收干扰,带宽做得较窄。根据两束光不同的吸收特性就可以实现对瓦斯的差分吸收检测。

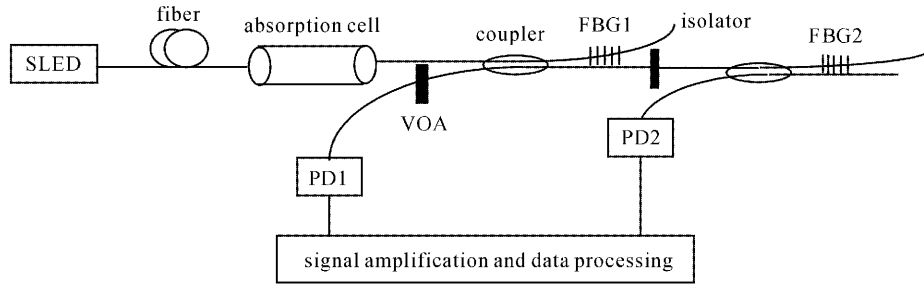


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental set-up

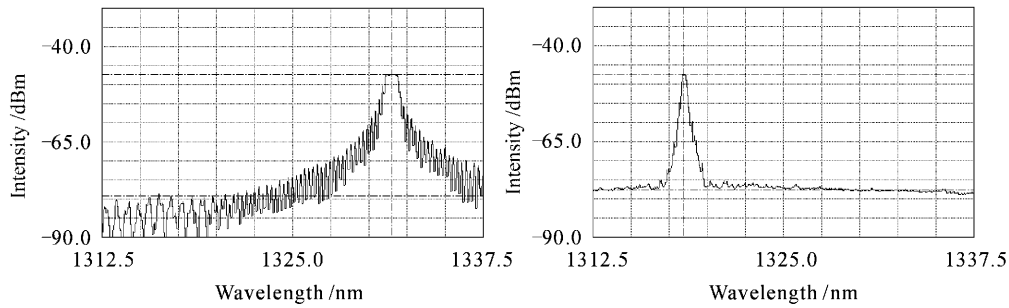


图 3 光纤布拉格光栅的反射谱

Fig. 3 Reflection spectra of two FBGs

3.2 测试结果

实验中光源的调制频率为 1 kHz, 占空比为 1:1, 探头的工作距离为 60 cm, 插损 2 dB. 用数据采集卡进行数据采集, 采样频率为 40 kHz, 用同步累计平均的方法进行数据处理。没有瓦斯气体时调节光路使两束光强相等, 从而使(3)式成立。实验中测得

$$\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2) = 0.402 \times 10^{-6} / \text{m}.$$

测试中, 探头中充入不同比例的氮气和瓦斯的混合气体。测试结果如图 4 所示。

在瓦斯浓度为 5.0% 的时候进行了系统重复性的测试, 结果如表 1 所示。

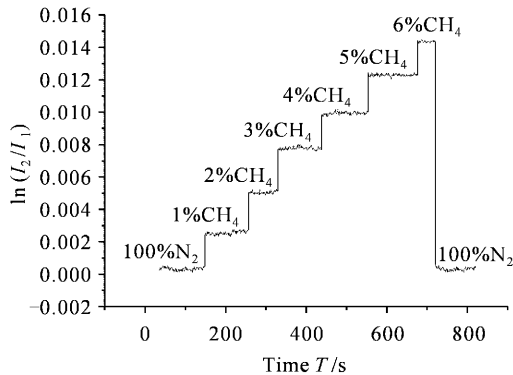


图 4 瓦斯传感系统的响应曲线

Fig. 4 Response curve of methane sensing system

表 1 瓦斯浓度为 5.0% 时系统测试结果

Table 1 Testing results while methane density is 5.0%

	Measurement / %
First time	5.0
Second time	4.9
Third time	5.0
Forth time	5.0
Fifth time	5.1

测量的均方根误差为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \delta_i^2 / 5} = 0.063\%.$$

从测试结果可以看出, 系统具有良好的稳定性, 灵敏度达到 0.1%, 测量范围大于 5.0%, 能对瓦斯爆炸起到有效的报警作用。

4 讨 论

利用光纤光栅的窄带滤波特性实现了瓦斯的远距离差分吸收测量, 测量距离 10 km, 灵敏度为 0.1%。Kinpui 等^[2]用锁相放大器得到了 0.04% 的灵敏度, 在这个方面我们还存在一定的差距, 目前正通过检测方法和放大电路等方面的改进以进一步提高系统灵敏度。

参 考 文 献

1 B. Culshaw, G. Stewart, F. Dong *et al.*. Fibre optic techniques for

- remote spectroscopic methane detection—from concept to system realisation [J]. *Sensors and Actuators*, 1998, **B51**: 25~37
- 2 Kinpui Chan, Hiromasa Ito, Humio Inaba. Remote sensing system for near-infrared differential absorption of CH₄ gas using low-loss optical fiber link[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(19): 3415~3420
 - 3 David Jacob, Nam Huu Tran, Fabien Bretenaker *et al.*. Differential absorption measurement of methane with two spatially resolved laser lines[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3261~3264
 - 4 Wang Yutian, Guo Zengjun, Wang Litian. Study on difference absorption optical fiber CH₄ sensor [J]. *J. 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
 - 5 K. Nakagawa, M. de Labachellerie, Y. Awaji *et al.*. Accurate optical frequency atlas of the 1.5- μ m bands of acetylene [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(12): 2708~2714
 - 6 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Zhao Qida *et al.*. Linearly torsion sensor of fiber grating with temperature-independent [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 83~87
张伟刚, 开桂云, 赵启大等. 免受温度影响的光纤光栅线性扭转传感器 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 83~87
 - 7 Huang Yonglin, Li Jie, Kai Guiyun *et al.*. Temperature compensation for fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 677~678
黄勇林, 李 杰, 开桂云等. 光纤光栅的温度补偿 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 677~678

双包层光纤放大器获得 133 W 高平均功率脉冲激光输出

双包层光纤激光器是国际上新近发展的一种高功率激光器件, 由于其具有光束质量好、效率高、易于散热和易于实现高功率等特点, 发展十分迅速, 已成为高精度激光加工、激光雷达系统等领域中相干光源的重要候选者, 在军事和航天上也有着广泛的应用。

近年来, 单根光纤激光器的连续输出功率提升很快, 国际上已经达到千瓦水平, 中国科学院上海光学精密机械研究所采用国产光纤, 也获得了 444 W 的激光输出。但从应用目标出发时, 连续工作的光纤激光能提供的靶面功率密度较低, 脉冲工作的光纤激光将更受欢迎。从连续光纤激光向高功率脉冲光纤激光发展, 是国际上该领域发展的趋势。由于光纤激光器的介质是细长的光纤, 较难在激光振荡器中实现高平均功率的脉冲输出, 且会受到非线性和端面损伤等的限制, 进展不是很快。最近, 我们采用主振荡放大(MOPA)的方式, 以双包层光纤为放大介质, 获得了 133 W 的高平均功率脉冲激光输出。

在主振荡放大(MOPA)式脉冲光纤激光器中,

双包层光纤的一端用于种子光注入(种子光源的波长为 1064 nm, 重复频率 20~100 kHz), 采用特殊设计的缩束和短焦距透镜, 使得种子光可以高效地耦合入纤芯中。另一端用于抽运光的注入和放大信号光的输出, 并通过一 45° 的双色镜(对抽运光高透, 信号光高反)将放大的信号光导出。为了降低受激自发辐射和非线性效应对脉冲放大的影响, 采用了高掺杂浓度的双包层光纤(和烽火通信科技股份有限公司合作), 光纤长度为 4 m。采用上述装置, 我们在 1064 nm 获得了的高功率脉冲放大激光输出, 并由上海测试技术研究所进行了测试。脉冲激光平均功率最高达 133 W, 重复频率在 20~100 kHz 可调, 在 60 kHz 时, 典型的脉冲宽度为 30 ns。

中国科学院上海光学精密机械研究所,
上海 201800
楼祺洪, 朱健强, 周 军, 孔令峰, 薛 冬,
董景星, 魏运荣, 王之江
收稿日期: 2005-03-17