

基于法布里-珀罗腔的光纤瓦斯传感测量实验研究

闫海涛¹ 赵晓艳¹ 郝 辉³ 甄志强¹ 张 智¹ 李慧娟¹ 韩道福² 王 鸣³

¹河南科技大学物理与工程学院, 洛阳市光电功能材料重点实验室, 河南 洛阳 471003
²南昌大学物理实验中心, 江西 南昌 330031
³南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210046

摘要 研究了基于法布里-珀罗(F-P)腔的干涉光纤瓦斯传感系统。利用微电子机械系统(MEMS)技术在硅片上制作含笼形分子 A 的聚合物,然后与光纤端面构成 F-P 腔。基于笼形分子 A 的聚合物对瓦斯吸收和敏感的特性,通过分析干涉波长峰值的变化,获得浓度与波长的关系。从理论上分析了传感机理和通过瓦斯传感实验评价传感性能,以瓦斯气体样品验证其有效性。测量并对数据分析处理,解调出包含在干涉信号中的信息。实验结果表明,该传感器具有高的灵敏度和可靠性,并且该传感器具有较快的响应时间。

关键词 测量;光纤传感器;笼形分子 A;法布里-珀罗腔;干涉

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s208004

Optical Fiber Methane Gas Sensor Based on Fabry-Perot Cavity

Yan Haitao¹ Zhao Xiaoyan¹ Hao Hui³ Zhen Zhiqiang¹ Zhang Zhi¹

Li Huijuan¹ Han Daofu² Wang Ming³

¹Luoyang Key Laboratory of Photoelectric Functional Materials, College of Physics and Engineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang, Henan 471003, China

²China Physics Experiment Center, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China

³Jiangsu Key Lab on Opto-Electronic Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China

Abstract Based on Fabry-Perot (F-P) cavity interference, the fiber methane gas sensor system is studied. The micro-electromechanical systems (MEMS) technology is used to cladded cryptophane A polymer onto silicon-piece. The end faces of fiber constitute a F-P cavity. Based on the absorption of methane and gas-sensitive properties of cryptophane A polymer, by analyzing the interference peak wavelength changes, the relationship between concentration and wavelength is obtained. Sensing mechanism is analyzed theoretically and by sensing performance is evaluated by methane gas sensing experiment the validity of the methane gas is verified by methane gas samples. By measuring and analyzing data the information included in the interference signal is demodulated. The results show that, the sensor has high sensitivity and reliability, and the response time is faster.

Key words measurement; optical fiber sensor; cryptophane A; Fabry-Perot cavity; interference

OCIS codes 060.2370; 120.2230; 130.6010

1 引 言

瓦斯气体浓度的检测在煤炭、化工等行业,尤其在矿物的开采中具有极为重要的意义。瓦斯气体是一种可燃、可爆性气体,其爆炸上限和下限分别为

1.5%和5%(体积分数)。瓦斯爆炸引发的事故在矿山开采的历史中是最大的危害。因此,瓦斯的检测一直是各国科学工作者研究的重点内容。现有的气敏元件、热电阻瓦斯传感器、半导体气敏元件等都

收稿日期: 2012-06-10; **收到修改稿日期**: 2012-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(60808019)、河南省教育厅科学技术重点资助项目(12A510012)、河南科技大学创新基金(CX2011033)和江苏省光电重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 闫海涛(1978—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感与信息光学等方面的研究。

E-mail: yanhaitaoyht@163.com

在瓦斯浓度检测中起到了良好的作用^[1,2],大大降低了瓦斯事故的发生率。

近些年来,光纤传感技术在各个领域中得到了广泛的研究和应用,如温度、应力及形变等^[3~5],结合波分复用技术,形成光纤分布网络等。由于光纤传感器具有一些常规传感器无可比拟的优点,如灵敏度高、响应速度快、动态范围大、防电磁干扰、超高绝缘、无源性、阻燃防爆、适于远距离遥测、体积小、可灵活柔性挠曲等,适用于在恶劣和危险环境中应用。现在利用光学方法对瓦斯检测主要有两种,一是利用瓦斯气体的光谱吸收检测浓度;二是利用瓦斯浓度和材料折射率的关系测折射率,从而获得瓦斯浓度^[6~8]。但是光学探测瓦斯技术中依然存在一些问题,如其他气体引起的光谱与瓦斯光谱的重合,敏感膜的重复使用率低等。

本文设计了干涉系统,利用光纤与硅片形成法布里-珀罗(F-P)腔,产生F-P腔多光束干涉。F-P腔为光纤传感中的经典结构^[9],具有条纹对比度高、分辨率及灵敏度高的特点。考虑到瓦斯的主要成份为甲烷,因此本文采用甲烷敏感的笼形分子有机材料^[10]。在硅片上通过甩胶的方式制作笼形分子A敏感膜,再与光纤的端面构成F-P腔,形成了F-P腔调制下的折射率传感测量。实验结果表明,该方法易行,具有较高的可靠性与灵敏度,且响应时间快、重复性好。

2 传感器原理

2.1 传感器设计

采用单模光纤(G. 652),用切割刀切割后,用研磨抛光机抛光其端面。选取硅片,在硅片上用甩胶机制备笼形分子A聚合物薄膜,笼形分子A具有吸附瓦斯气体的功能,并且笼形分子A聚合物薄膜的折射率会随吸附瓦斯气体的浓度变化。聚合物薄膜厚度为1 μm。然后固定硅片和光纤端面,形成有笼形分子A聚合物薄膜的F-P腔。图1为传感器的结构示意图,图2为笼形分子A结构示意图。

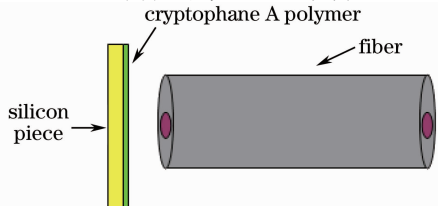


图1 传感器的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sensor

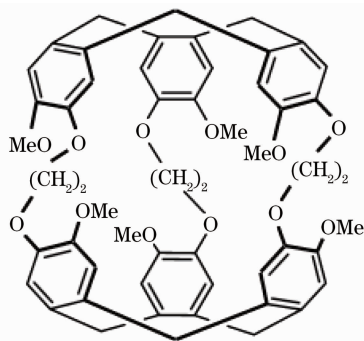


图2 笼形分子A的结构

Fig.2 Structure of cryptophane A

2.2 传感机理分析

当涂覆于硅片表面的聚合物敏感膜与瓦斯气体接触时,瓦斯气体分子扩散进入聚合物膜内部,并与具有空穴结构的笼形分子A发生非共价键相互作用,选择性地进入笼形分子A的空穴中,形成分子聚集体-超分子(笼形分子A为受体,瓦斯气体分子为给体),使敏感膜折射率发生变化,从而导致F-P腔的光学厚度发生改变,进而引起干涉峰值的改变。

F-P腔的多光束干涉,透射光强公式为^[9]

$$I_T = I_0 \frac{1}{1 + \frac{4r^2}{1-r^2} \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad (1)$$

式中 I_T 为透射光强, I_0 为入射光强, r 为反射率(硅片反射率约为 $r = 0.2$), δ 为相位差:

$$\delta = \frac{4\pi nt}{\lambda}, \quad (2)$$

式中 n 为F-P腔的折射率, t 为F-P腔腔长。光谱分析仪记录的为反射光强,因此,不考虑散射和吸收,反射光强为 $I_R = I_0 - I_T$,其表达式为

$$I_R = I_0 \frac{\frac{4r^2}{1-r^2} \sin^2 \frac{\delta}{2}}{1 + \frac{4r^2}{1-r^2} \sin^2 \frac{\delta}{2}}. \quad (3)$$

考虑到本文设计的传感器模型,空气折射率为 n_0 ,腔长为 t_0 ,笼形分子A薄膜折射率为 n_1 ,薄膜厚度为 t_1 ,因此(3)式变化为

$$I_R = I_0 \frac{\frac{4r^2}{1-r^2} \sin^2 \left\{ \frac{2\pi [n_0(t_0 - t_1) + n_1 t_1]}{\lambda} \right\}}{1 + \frac{4r^2}{1-r^2} \sin^2 \left\{ \frac{2\pi [n_0(t_0 - t_1) + n_1 t_1]}{\lambda} \right\}}. \quad (4)$$

笼形分子薄膜吸附瓦斯气体,会导致折射率 n_1 的改变,引起F-P腔调制的波长峰值发生改变,通过测量峰值获得瓦斯浓度。

3 实验装置及结果分析

3.1 实验装置

测试光路由分布反馈(DFB)光纤激光器、光谱分析仪、3 dB耦合器及光纤传感器构成。DFB发出的激光经过3 dB耦合器,其中一个分束入射至光纤传感器,经过光纤端面的F-P腔干涉,反射光沿原光路传播,传播至3 dB耦合器,再分束传播至光谱分析仪,光谱分析仪记录下F-P腔干涉的信号,F-P腔长为0.1 mm。实验装置如图3所示。将光纤传感器放置在一个瓦斯气体测试装置中,充入氮气和瓦斯的混合气体,分别控制氮气和瓦斯的充入速率。然后通过氮气和瓦斯的充入比例确定瓦斯的浓度。瓦斯气体来自洛阳某煤矿。

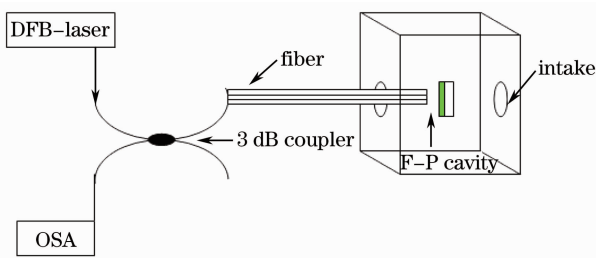


图3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

3.2 实验结果及分析

光纤端面与硅片的折射率都为1.5,因此在对空气界面的反射率为0.2左右。笼形分子A薄膜的折射率为1.56,对空气界面的反射率为0.22。通过改变瓦斯和氮气的比例来控制瓦斯的浓度,图4给出了在不同瓦斯浓度(体积分数,下同)下干涉峰值波长的变化,在瓦斯浓度从0增加至4%时,干涉峰值的波长变化明显,图中实线为没有瓦斯气体时

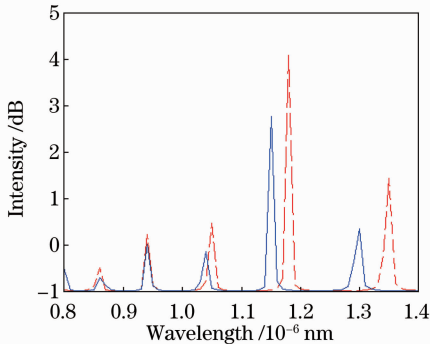


图4 浓度分别为0和4%时干涉条纹的波长与峰值强度(相对值)曲线

Fig. 4 Curve of the interference fringes in the wavelength and peak intensity (relative value) with concentrations of 0 and 4%

的干涉条纹,虚线为瓦斯浓度为4%的干涉条纹。选取峰值最强的位置,当浓度为零时,强度的峰值在1140 nm处,浓度增加至4%,强度的峰值移至1180 nm的位置。灵敏度大约改变每1%浓度,波长改变约10 nm。因此该传感系统有很高的灵敏度。在光谱中,两次强度最小值均为-1 dB,说明敏感膜存在一定的光强吸收。

根据上面的实验结果,选取中心波长为1160 nm,改变瓦斯浓度(0~8%),结果如图5所示,该处波长的强度与瓦斯浓度呈较好的线性关系,随浓度的增加,强度增加。只是在浓度为5.5%以下时,线性关系约为每1%浓度0.005 dB,而在浓度为5.5%以上时,线性关系约为每1%浓度0.025 dB。

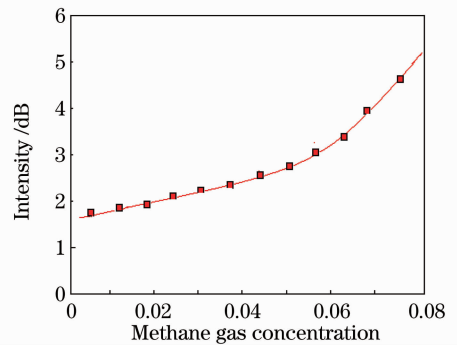


图5 传感器不同浓度下1160 nm波长的强度峰值曲线

Fig. 5 Curve of the intensity of peak at 1160 nm wavelength with the different concentrations of the sensor

基于以上结果,本文进一步测试了传感器的响应时间,结果如图6所示。图6给出了传感器与瓦斯气体接触时的响应曲线。从变化趋势来看,环境中只有N₂而无瓦斯气体时,传感器信号在0附近;当通入浓度为2%的瓦斯气体时,传感器信号快速增加到0.02并趋于升高,其响应时间约100 s。

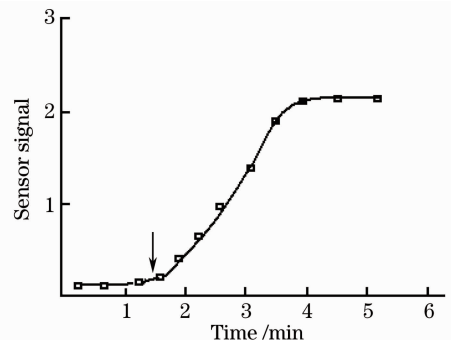


图6 甲烷气体传感器的响应时间曲线

Fig. 6 Response curve of the sensor time methane gas

4 结 论

基于在硅片上通过甩胶的方式制作笼形分子 A 瓦斯敏感膜,再与光纤的端面构成 F-P 腔,形成了光纤瓦斯传感器。测试了瓦斯在浓度变化时的光信号的波长和强度变化,并测试了传感器的响应曲线。结果表明,该光纤瓦斯传感器灵敏度高,每百分浓度引起峰值波长改变为 10 nm,中心强度变化约 1 dB。在浓度为 5.5% 以下时,线性关系约为每 1% 浓度 0.005 dB,而在浓度为 5.5% 以上时,线性关系约为每 1% 浓度 0.025 dB。并测试了响应时间,约为 100 s。因此该传感器具有较高的灵敏度、线性关系和较快的响应时间。

参 考 文 献

- 1 T. M. Monro, D. J. Richardson, P. J. Bennett. Developing holey fibers for evanescent field devices[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14): 1188~1189
- 2 Tong Minming. Catalytic Sensor and Application Technology [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2002. 1~6
童敏明. 催化传感器的研究与应用技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002. 1~6
- 3 P. Kronenbery, P. K. Rastogi, P. Griaccari *et al.*. Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(16): 1385~1387
- 4 T. L. Yeo, T. Sun, K. T. V. Grattan *et al.*. Characterization of a polymer-coated fiber Bragg grating sensor for relative humidity sensing [J]. *Sens. Actuators B*, 2005, **110**(1): 148~155
- 5 N. D. Rees, S. W. James, R. P. Tatam *et al.*. Optical fiber long-period gratings with Langmuir Blodgett thin-film overlays [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 686~688
- 6 T. Ritari, J. Tuominen, H. Ludvigsen *et al.*. Gas sensing using air-guiding photonic band gap fibers[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17): 4080~4087
- 7 J. M. Lazaro, A. M. Cubillas, M. Silva-Lopez *et al.*. Methane sensing using multiple-coupling gaps in hollow-core photonic band gap fibers[C]. Perth: in 19th Int. Conf. Optical Fiber Sensors, 2008
- 8 A. M. Cubillas, M. Silva-Lopez, J. M. Lazaro *et al.*. Methane detection at 1670-nm band using a hollow-core photonic band gap fiber and a multiline algorithm[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 17570~17576
- 9 Zhang Guiju, Yu Qingxu, Song Shide. Fiber optic temperature sensor based on F-P cavity interferometer/intensity modulation mechanism[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 228~231
张桂菊, 于清旭, 宋世德. 基于 F-P 腔的干涉/强度调制型光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 228~231
- 10 Yang Jianchun, Xu Longjun, Chen Weimin. Optical fiber methane gas sensor based on refractive index change of sensing film[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, **35**(3): 420~423
杨建春, 徐龙君, 陈伟民. 基于敏感膜折射率变化的光纤甲烷传感器[J]. *煤炭学报*, 2010, **35**(3): 420~423

栏目编辑:何卓铭