

文章编号: 0258-7025(2004)08-0979-04

基于光声光谱法的光纤气体传感器研究

王书涛¹, 车仁生¹, 王玉田², 田庆国²

(¹ 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001; ² 燕山大学科学仪器与工程系, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 论述了光声光谱信号的产生。提出用光纤相位传感器代替传统的微音器检测光声信号, 讨论了光纤中光波的相位变化与光声信号的关系。设计了光学长程结构, 有效增加了对光功率的吸收。用染料激光器作光源对 SO₂ 气体浓度进行测量。实验表明, 最低检测灵敏度可达 1.2×10^{-10} 。由于采用光谱技术与光纤技术相结合, 使研制的传感器具有较高的灵敏度, 信号的传输通道具有强的抗电磁干扰及防燃防爆能力。气体探头体积小, 响应速度较快。信号处理电路具有较强的抑制噪声干扰能力。该传感器及其系统在灵敏度、精度、响应时间等性能指标上达到了检测气体含量要求。

关键词 集成光学; 激光检测; 光纤气体传感器; 光声光谱; 相位调制

中图分类号 TN 247; TP 212.14 **文献标识码** A

Study on Optical Fiber Gas Sensor Based on Photoacoustic Effect

WANG Shu-tao¹, CHE Ren-sheng¹, WANG Yu-tian², TIAN Qing-guo²

¹Department of Automatic Measurement and Control,

Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

²Department of Science Instrument and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract The theory of photoacoustic spectrum is presented briefly in this paper. The optical fiber phase sensor is used to replaces traditional microphone, and the relationship between light phase and photoacoustic signal is discussed. Multiple-reflection system is used to enhance absorption effectively. The dye laser is used as light source to measure SO₂ gas concentration. It shows that the sensitivity of 1.2×10^{-10} can be obtained. The combination of spectrum technology and optical fiber technology provides higher sensitivity, stronger ability to resist electromagnetic interference, avoiding fire and explosion. The gas probe has small volume, relatively fast response speed. The signal processing circuit has high ability to suppress noise interference. The experiments show that the sensor and its system match the requests of sensitivity, accuracy, and response time in detecting the gas concentration.

Key words integrated optics; laser detection; optical fiber gas sensor; photoacoustic spectrum; phase modulation

1 引言

随着工业化的发展, 污染气体给人类健康及农作物生长造成极大的危害。因此, 对空气中污染气体的浓度进行实时监测对于控制污染物的排放, 改善环境有着重要的现实意义。

激光器的发明和高灵敏度的声波检测器的出

现, 使光声光谱方法^[1,2]得到重视。与传统的光谱检测方法不同, 光声方法是检测被物体吸收后转化为热能, 并以声压形式表现出来的那部分能量。即使在高反射弱吸收的情况下, 很小的吸收能也可以被检测出来。

本文把光声光谱法和光纤相位传感技术^[3]相结合, 用光纤相位传感器代替传统的微音器, 使光纤传

收稿日期: 2003-04-28; 收到修改稿日期: 2003-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60272027)资助项目。

作者简介: 王书涛(1978—), 男, 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系博士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。

E-mail: wangshu_tao@163.net

感器抗电磁干扰、灵敏度高、体积小、速度快的特点得到充分体现。采用锁相放大器检出相位信号并有效地滤除噪声。

2 光声光谱气体检测原理

当气体吸收频率为 ν 的光子后,部分气体分子会从基态 E_0 跃迁到激发态 E_1 。处于激发态的分子与处于基态的同类分子相碰撞,吸收的能量经无辐射弛豫过程转变为碰撞分子之间的平移动能,即加热。如果气体密闭于光声腔中,激励光源受到谐振频率 ω 的调制,那么加热过程将周期地变化。根据气体热力学定律,周期性的温度变化将产生同周期的压力信号。假设这种跃迁-弛豫过程处于非饱和状态,光声腔为圆柱形结构,光强度的调制频率等于光声腔的某一阶谐振频率 ω_j ,则光声信号可以表示为^[4]

$$A_j(\omega_j) = \frac{N\sigma\tau A_w E' Q_j (\gamma - 1)}{\Delta_j V \omega_j} \times \iiint_V p_j^*(\vec{r}) I(\vec{r}, \omega_j) dV \quad (1)$$

式中, N 为气体的分子浓度; σ 为分子的吸光截面积; τ 为激发态分子的寿命,它与激发态辐射跃迁几率 A_r 和无辐射跃迁几率 A_w 的关系为: $\tau = 1/(A_r + A_w)$; $E' = E_1 - E_0 = h\nu$, 为两能级之间的能量差; Q_j 为光声腔在谐振频率 ω_j 下的品质因子; $\gamma = C_p/C_v$ 为热容比; Δ_j 由下式给出: $\Delta_j = \frac{1}{V} \iiint_V p_j^2(\vec{r}) dV$; V 为光声腔的体积; $p_j^*(\vec{r})$ 为简正模式 $p_j(\vec{r})$ 的复数共轭模式; $I(\vec{r}, \omega_j)$ 为受频率 ω_j 调制的激励光源强度。

从式(1)可以看出,当入射光束的频率为 ν 时,对于特定的气体, $\sigma, \tau, A_w, E', \gamma$ 都是确定值。当光声腔工作在第 j 阶谐振模式下,并且 $p(\vec{r}, t)$ 和 $I(\vec{r}, t)$ 的耦合方式给定,则 Q_j, Δ_j 和定积分 $\iiint_V p_j^*(\vec{r}) I(\vec{r}, \omega_j) dV$ 也成为已知。这样,光声信号 $A_j(\omega_j)$ 就和气体的浓度成唯一确定的关系,通过检测 $A_j(\omega_j)$ 就可以测量气体的分子浓度 N 。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示。

激励光源选用染料激光器,经过斩波器调制后入射到光声腔,激发出声波信号。光声腔的设计主要考虑光的有效吸收长度,且要保证光束与径向声

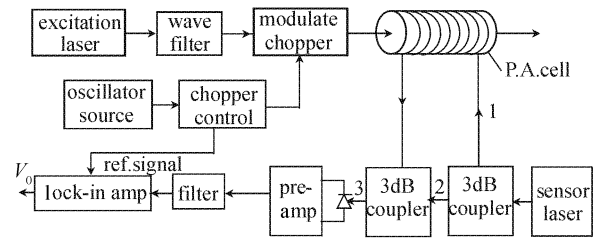


图 1 实验装置示意图

1: 信号光纤; 2: 参考光纤; 3: 光电管

Fig. 1 Schematic of experimental equipment

1: signal optical fiber; 2: reference optical fiber;

3: photoelectric diode

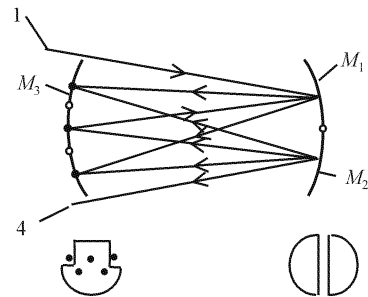


图 2 光学长程装置原理图

(反射镜的曲率半径均为光声腔的长度 L)

Fig. 2 Illustration of the multiple reflection system

(curvatures of all reflectors are equal to L)

学模的耦合效率。这就要求在光声腔长度一定的情况下,光束在腔内能多次反射并且靠近轴线。所以,本文选用 White 型结构^[5],如图 2 所示。

三个凹面反光镜 M_1, M_2 和 M_3 的曲率半径都等于镜间距,即腔长 L 。多次反射的光束分布在两个平面上,这两个平面在 M_1, M_2 上相交,在 M_3 上略微分开。光束对称于轴线且相互靠近,在腔内反射几十次。反射镜镀金,反射率达到 95%,腔内有效光强是入射光的 20 倍。

传感光源用激光二极管。光束经耦合器分成两束,一束作为信号,另一束作为参考。光纤用单模光纤,由于光声腔的周期性变化,信号光纤中的光波相对于参考光纤产生一光程差,即相位差。

信号光纤和参考光纤重新耦合在一起,光电二极管将光信号转变为电信号。前置放大和滤波后用锁相放大器检出相位信号并有效地滤除噪声^[6]。锁相放大器选用美国 PARC 公司生产的 PARC 124A。

光波的相位变化主要由于光声腔的直径变化使缠绕在其上的光纤产生径向应变。光声腔和光纤的受力是轴对称的,所以可以在垂直光声腔轴线的截

面上取出一圆环,圆环高度为光纤的直径,如图 3 所示。其中内圆为光声腔,直径为 $2d$,厚度为 t ;外圆为光纤,直径为 $2a$ 。设光声腔的应力分布为正应力 σ'_r 和环应力 σ'_θ ,径向位移 u'_r ;光纤的应力分布为正应力 σ_r 和环应力 σ_θ ,径向位移 u_r 。由弹性力学原理^[7]分析可得,它们满足的边界条件为: $\sigma'_r|_d = p, \sigma'_r|_{d+t} = \sigma_r|_{d+t}, u'_r|_{d+t} = u_r|_{d+t}$ 。根据这些边界条件可以求出光纤的应力表达式

$$\sigma_r = -\sigma_\theta = -A_j(\omega_j) \times \frac{2(1-\mu')n \frac{(d+t)^2}{r^2}}{[1+(1-2\mu')n] \frac{(d+t)^2}{d^2} - (1-n)} \quad (2)$$

式中, r 的取值范围为 $[d+t, d+t+a]$, $n = \frac{K(1+\mu')}{K'(1+\mu)}$, K', μ', K, μ 分别为光声腔材料和光纤材料的弹性系数和泊松比。

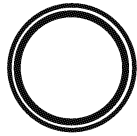


图 3 光声腔和传感光纤结构的截面图

Fig. 3 Section of optical fiber and photoacoustic cell

在平面应变条件下,光纤的环向应变 ϵ_θ 和应力的关系为

$$\epsilon_\theta = \frac{1-\mu^2}{K} \left(\sigma_\theta - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_r \right) \quad (3)$$

光纤相位和应变的关系^[8]为

$$\Delta\phi = nk_0 l \left\{ 1 - \frac{1}{2} n^2 [(1-\mu)p_{12} - \mu p_{11}] \right\} \epsilon_\theta - la\mu \frac{\partial\beta}{\partial a} \epsilon_\theta \quad (4)$$

式中, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, 为光波在真空中的波数, λ_0 为光波在真空中的波长; n 为光纤折射率; l 为光纤的长度; p_{11} 和 p_{12} 分别为光纤的光弹系数; $\frac{\partial\beta}{\partial a}$ 为传播常数的应变因子, $\frac{\partial\beta}{\partial a} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{m\lambda}{4a} \right)^2 \frac{1}{[1 - \left(\frac{m\lambda}{4a} \right)^2]^{1/2}} \frac{1}{2a}$,

因为是单模光纤,因此 $m = 1$ 。联立公式(1)~(4)就可以求出相位差 $\Delta\phi$ 和光声信号 $A_j(\omega_j)$ 之间的关系。

4 实验结果与分析

因为 SO_2 是主要的大气污染物,所以选择 SO_2

为实验气体。将一定体积的高纯度 SO_2 气体缓慢释放入光声腔,然后往光声腔中充以对光吸收不敏感的 Ar 气体作为缓冲介质,使光声腔中的压力稳定在一个标准大气压,从而在光声腔中得到不同浓度的 SO_2 气体。因为 SO_2 对波长为 302 nm 的光谱有极大的吸收,所以染料激光器的输出波长选为 302 nm,光束被斩波器调制为光声腔的第一谐振频率 ω_1 。

图 4 和图 5 是实验得到的数据。可以看出,在气体浓度一个很大的变化范围内,光声信号都和它保持线性关系。并且,当气体浓度保持不变的情况下,光声信号和激励源的光功率也成线性关系,这和式(1)相吻合。但是,当激励源光功率太大时式(1)将不满足(光声腔工作在饱和吸收状态)。图中检测灵敏度大约为 1.2×10^{-10} 。影响检测灵敏度的因素

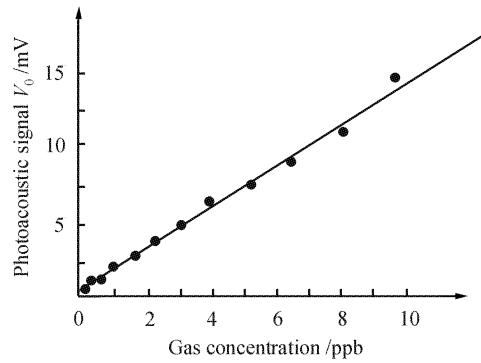


图 4 光声信号随气体浓度的变化情况 (激励源功率恒定,温度 $T = 298 \text{ K}$)

Fig. 4 Relationship between photoacoustic signal and gas density (power of excitation source unchanged, Temperature $T = 298 \text{ K}$)

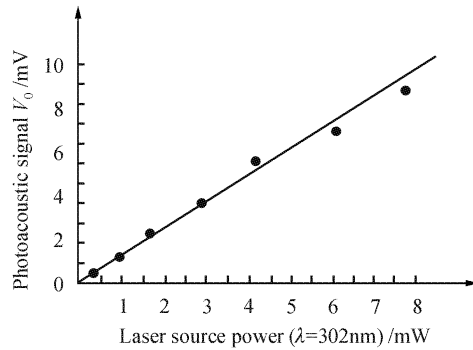


图 5 光声信号随激励源功率的变化情况 (被测气体浓度保持不变,温度 $T = 298 \text{ K}$)

Fig. 5 Relationship between photoacoustic signal and the power of incentive source (gas concentration unchanged, temperature $T = 298 \text{ K}$)

主要有:1) 光声腔中光功率吸收情况。实验表明,光声腔中的有效吸收长度越长越好,但光束的传输方向还应该和光声信号的简正模式保持垂直;2) 传感光纤的长度。光纤缠绕在光声腔上,可以增长光纤的有效长度,有效地提高检测灵敏度。

5 结 论

理论分析和实验结果表明,光纤光声方法对气体浓度进行测量具有灵敏度高,抗干扰能力强,线性好的特点。尤其是在光吸收非常弱,透射信号几乎不衰减时,这种方法更是有效的检测手段。

参 考 文 献

- 1 Yan Fengxia, Wang Xiaomin. Introduction of Optical Instrument Analysis [M]. 1st edition, Shanghai: East China Normal University Press, 1992. 303~307
严凤霞,王筱敏 编著. 现代光学仪器分析选论[M]. 第一版,上海:华东师范大学出版社,1992. 303~307
- 2 Lu Ming-gang, Lü Xiao-hu. New Methods of Molecule Spectrum Analysis [M]. 1st edition, Hefei: China Science and Technology University Press, 1993. 117~122
陆明刚,吕小虎 编著. 分子光谱分析新法引论[M]. 第一版,合肥:中国科学技术大学出版社,1993. 117~122
- 3 Wang Hui-wen. The Technologies and Applications of Optical Fiber Sensing [M]. 1st edition, Beijing: National Defense Industry Press, 2001. 40~60
王惠文 主编. 光纤传感技术与应用[M]. 第一版,北京:国防工业出版社,2001. 40~60
- 4 Yin Qing-ru, Wang Tong, Qian Meng-lu. Photoacoustic and Photothermal Technique and Application [M]. 1st edition, Beijing: Science Press, 1991. 13~18
殷庆瑞,王 桐,钱梦驷 著. 光声光热技术及其应用[M]. 第一版,北京:科学出版社,1991. 13~18
- 5 Hao Lu-yuan, Han Jia-xiang, Shi Qiang *et al.*. A highly sensitive Doppler limited photoacoustic overtone spectrometer with a Ti³⁺ sapphire ring laser—optical multipass and acoustic resonance [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(1):16~22
郝绿原,韩家祥,史 强 等. 高灵敏高分辨钛宝石激光光声光谱仪——光学长程+声学共振[J]. 中国激光, 2000, **A27**(1):16~22
- 6 Chen Jia-jia. Weak Signal Detection [M]. 1st edition, Beijing: Central Broadcast and TV University Press, 1987. 61~78
陈佳佳 编著. 微弱信号检测[M]. 第一版,北京:中央广播电视大学出版社,1987. 61~78
- 7 Xu Zhi-lun. Elasticity Mechanics [M]. Book 2, 3rd edition, Beijing: Higher Education Press, 1990. 250~252
徐芝纶 编著. 弹性力学,下册[M]. 第三版,北京:高等教育出版社,1990. 250~252
- 8 Sun Sheng-he, Wang Ting-yun, Xu Ying. Optical Fiber Measuring and Sensing Technology [M]. 1st edition, Harbin: Harbin Industry University Press, 2000. 106~110
孙圣和,王廷云,徐 颖 编著. 光纤测量与传感技术[M]. 第一版,哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000. 106~110