

文章编号:1004-4213(2010)03-0481-4

基于腔衰荡技术的光纤双环路一氧化碳浓度监测系统研究*

李志全,朱国芳[†],陈曦,杨秋霞,刘世元,闫聚兵,李文超

(燕山大学 电气工程学院,河北 秦皇岛 066004)

摘 要:对光纤环形腔技术的传感原理进行了理论推导,并设计了一种双环路一氧化碳浓度测量系统.分析了掺铒光纤放大器在系统中的作用及其增益波动对系统的影响,通过对掺铒光纤放大器的增益进行反馈控制,进一步地提高了测量系统的稳定性和精确性.通过实验,得出了不同浓度的一氧化碳所对应的衰荡曲线.分析了不同浓度的气体对光的吸收特性及衰荡时间与浓度的关系,为实现气体浓度的高准确度在线测量提供了重要的依据.

关键词:光纤环形腔;衰荡时间;掺铒光纤放大器;增益控制;一氧化碳浓度

中图分类号:O433.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103903.0481

0 引言

一氧化碳(CO)是一种有毒气体,主要来源于煤炭、燃油等的不完全燃烧,是大气中的主要污染物之一.对CO浓度的在线测量,对人类健康、环境保护及资源的有效利用有十分重要的意义.已报道的气体浓度检测方法有气相色谱法、光干涉法、吸收光谱法等^[1-3].这些方法在不同程度上实现了浓度测量的要求,但存在系统不稳定、测量灵敏度低等问题.

1983年,Adnerosn等人首次提出了光腔衰荡光谱(Cavity Ring-Down Spectroscopy,CRDS)技术方案,通过测量光的衰荡时间实现了对腔镜反射率的测定^[4].此后一些学者对该方法进行了进一步研究与改进.1988年,O'keefe和Deacon成功发展了CRDS多次吸收技术,用于多种气体分子光谱的测量^[5].CRDS技术克服了传统吸收法易受光源波动影响的不足,且具有吸收光程长的优点,为痕量气体的检测提供了一种新的方法.2001年Atherton等人将光纤与CRDS技术结合起来,首次提出了光纤环形腔衰荡光谱(Fiber Loop Ring-Down Spectroscopy,FLRDS)技术^[6],设计了一种新的有源光纤环衰荡浓度测量系统^[7-10].该系统继承了CRDS技术的优点,并利用光纤技术降低了传统CRDS系统对光源脉冲宽度及对应高速信号接收仪的要求.但是系统中掺铒光纤放大器(Erbium-

Doped Fiber Amplifier,EDFA)的增益波动限制了测量准确度的提高,需要进一步的改进.

本文针对FLRDS技术存在的问题,提出了一种双环路CO浓度测量系统.通过对衰荡时间的测量来实现对CO浓度的检测,避免了光源光强波动的影响.采用全光增益控制系统对掺铒光纤放大器的增益进行锁定,克服了增益波动对系统测量准确度的影响,提高了气体检测的灵敏度和准确度.

1 FLRDS 技术及其传感原理

FLRDS技术是在CRDS技术的基础上发展而来的,利用两个2×2耦合器和一段单模光纤组成的环形腔来代替传统CRDS技术的两个高反射率腔镜构成衰荡腔,如图1.

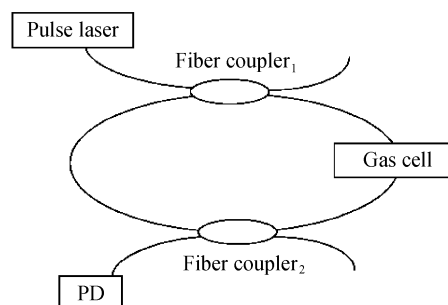


图1 光纤环形腔衰荡系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of FLRD system

环形腔中放置一个吸收气室,脉冲激光经耦合器进入光纤环形腔,在腔内循环.每循环一周输出的光强经由耦合器2进入光电探测器进行探测.因气体吸收、光纤和耦合器等导致的光损耗会使光强按指数形式衰减,可以通过对光衰荡时间的测量,得到气室中气体样品的浓度信息.计算方法与CRDS技

*国家自然科学基金(60877047)和河北自然科学基金(F2008000873)资助

[†]Email:zhuguofang5968@163.com

收稿日期:2009-06-18

修回日期:2009-08-31

术相似.

光脉冲信号在环形腔中可近似为遵从单指数衰减规律,假设腔内的入射光脉冲的强度为 I_0 ,且腔内没有吸收物质,则光强随时间的变化为^[10]

$$\frac{dI}{dt} = -IA_s c_0 / L \quad (1)$$

式中, L 为光纤环的长度, c_0 为光在纤芯中的传播速度, A_s 表示光纤环形腔中光纤吸收、元器件插入和耦合损失等对光强的影响因子.

对式(1)积分可得,光脉冲在环形腔循环 n 周后,光强 I_n 为

$$I_n = I_0 \exp(-A_s c_0 t / L) = I_0 \exp(-nA_s) \quad (2)$$

定义光强度衰减到 I_0 的 $1/e$ 所用的时间为衰荡时间 τ_0 ,则

$$\tau_0 = L / A_s c_0 \quad (3)$$

光脉冲的循环周期 $T = L / c_0$,故式(3)可改写为

$$\tau_0 = T / A_s \quad (4)$$

如果在气室中充入待测气体,令

$$A_g = \alpha C d \quad (5)$$

式中, α 为某种气体对输入某峰值波长的光的吸收系数, C 为气室中被测气体的浓度, d 为气室的长度. 则式(1)改写为

$$\frac{dI}{dt} = -I(A_s + \alpha C d) c_0 / L \quad (6)$$

此时的衰荡时间 τ 为

$$\tau = T / (A_s + \alpha C d) \quad (7)$$

利用式(3)和式(7),可得被测气体的浓度为

$$C = \frac{L}{\alpha d c_0} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \quad (8)$$

由式(8)可知,分别测得气室中有无气体时的衰荡时间 τ 和 τ_0 ,就可以求出被测气体的浓度. 对于长度确定的光纤环, T 为定值,对式(7)微分,得

$$\frac{\Delta(A_s + A_g)}{A_s + A_g} = \frac{\Delta\tau}{\tau} \quad (9)$$

由式(9)可见,气体浓度的变化会引起系统总损耗的变化,且浓度的变化可以通过对衰荡时间变化量的测量来求得.

由式(5)、(7)、(9)可得

$$\Delta C = \frac{1}{\alpha d} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\Delta\tau}{\tau} \quad (10)$$

由式(10)可见,浓度的变化量 ΔC 与在衰荡时间 τ 内光脉冲的循环次数 τ / T 成反比,与衰荡时间测量的相对准确度 $\Delta\tau / \tau$ 成正比.

2 测量系统的设计与分析

气体浓度测量系统结构如图 2. 该系统由两个

环路组成,环路 1 是用于气体浓度测量的主环路,环路 2 为掺铒光纤放大器的全光自动增益锁定系统.

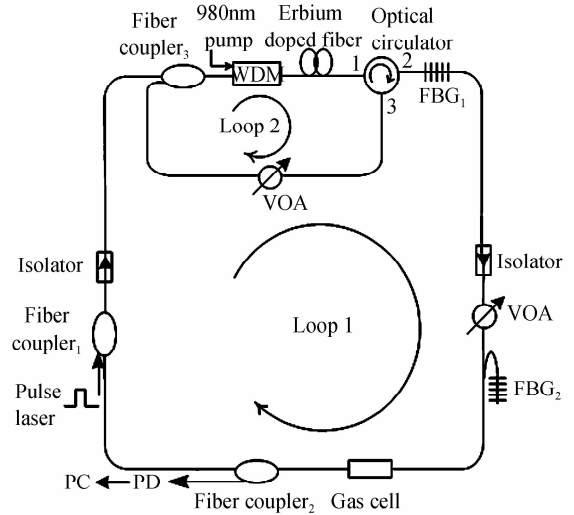


图 2 光纤双环路 CO 浓度测量系统结构
Fig. 2 Schematic diagram of dual-loop CO concentration sensing system

环路 1 中,由光源发出的脉冲激光由光纤耦合器 1 耦合至光纤环形腔中,增益为 G 的掺铒光纤放大器对信号进行放大,以提高系统的信噪比. 放大后的光信号通过可调光衰减器 (Variable optical attenuator, VOA) 和 FBG_2 后进入微型吸收气室. 环路中应用 FBG_2 反射谱的带通特性可以有效地滤除部分 EDFA 工作时产生的自发辐射噪音以及其他背景噪音. 分光比为 1 : 99 的耦合器 2 将 99% 的光耦合回环路中进行循环衰荡,剩余 1% 的光由耦合器输出,被光电探测器接收送入 PC 机进行处理. 环路中的两个光隔离器用来消除环路中的反向光,抑制光路系统中产生的自耦合效应及反射噪音对系统的影响.

由式(10)可以看出,对于固定的气体吸收峰、气室和相对时间测量准确度,通过尽量减少空腔的损耗可使系统的衰荡时间增大,从而使光脉冲在环路中的循环次数增加,有利于提高测量的灵敏度. 环路 1 中,系统总的损耗 Γ (单位为 dB) 可以表示为^[8]: $\Gamma =$ 光纤吸收损耗 + 元器件插入损耗 + 耦合损耗 + 气体吸收损耗 + 可调光衰减器损耗 - 掺铒光纤放大器增益.

由此可见,掺铒光纤放大器的使用可以补偿环形腔的损耗,使衰荡时间大大延长,从而可以有效地提高系统的测量灵敏度.

光纤环形腔的衰荡时间大小可以通过调节掺铒光纤放大器和可调衰减器来改变. 该系统中气体浓度测量的准确度不受光源光强波动的影响,但掺铒光纤放大器增益的稳定性会影响系统总损耗的大

小,从而直接影响浓度的测量准确度.当掺铒光纤的增益波动超过气体浓度变化所引起的系统损耗变化量时,甚至会导致测量结果严重偏离气体的实际浓度.因此,对掺铒光纤放大器的增益进行锁定控制,对提高测量系统的稳定性和精确性是十分重要的.

环路 2 为全光增益控制掺铒光纤放大器的基本结构.放大器采用 980 nm 激光源单向泵浦,用 WDM 将输入信号光耦合至掺铒光纤中.信号光经环形器端口 1 输入,进入端口 2,利用 FBG₁ 的反射谱特性选定其反射谱带宽内的光再次进入环形器,经过可调衰减器、耦合器 3 反馈到 EDFA 的输入端,形成一个反馈环路.采用环形器使用于传感的信号光和用来实现增益控制的信号光传输方向相反,因此增益控制光不会在信号输出端出现. FBG₁ 的反射光作为控制光和信号光共同分享上能级铒粒子数,使粒子数反转保持在固定水平.控制光与信号光功率的变化趋势相反,此消彼长,从而达到使信号光增益在一定动态范围内保持恒定.在输入信号光功率不足以破坏激光阈值条件的情况下,EDFA 的增益将保持不变.反馈环中的可调衰减器用来调节环路内的损耗,控制放大器的增益水平.

设稳态时 EDFA 增益为 G ,可调衰减器的衰减值为 β .输入信号的功率为 P_i ,经 EDFA 放大后功率为 P_o .FBG₁ 中心波长处的光经反射后进入反馈环路,则反馈到 EDFA 输入端的光信号功率约为 βP_o .达到稳定振荡时,有 $(\beta P_o + P_i) \cdot G = P_o$ ^[11],得 $G = P_o / (\beta P_o + P_i)$.由于 $\beta P_o \gg P_i$,所以 $G = 1/\beta$.由此可见,稳态时 EDFA 的增益是 β 的函数,EDFA 的增益被锁定在一个固定的数值.

3 CO 浓度测量的研究与分析

CO 在中红外区的 4.65 μm 处和近红外的 1.567 μm 处都有吸收峰.在中红外区,光源和探测器的发展还不成熟,且石英光纤的损耗太大,不利于浓度传感.CO 在 1.567 μm 处有较强的吸收,吸收系数为 $0.002 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$,在该处光纤的损耗小,可用作传感波长.所以在本系统的设计中选择 1.567 μm 波段的近红外光对 CO 气体进行传感.

光纤环的长度为 60 m,气室的有效光程为 5 cm,光源为分布反馈式(Distributed Feedback, DFB)半导体激光器,脉冲信号发生器对 DFB 光源的输入电流进行调制,激光器输出脉宽为 200 ns 的光脉冲. FBG₁ 的中心波长为 1.567 μm ,带宽为 0.2 nm, FBG₂ 的中心波长为 1.567 μm ,带宽为 0.2 nm.气室分别充入浓度为 100 ppm、500 ppm 和 1 000 ppm 的 CO 气体,不同浓度的气体对光的吸收

程度分别对应于图 3 中的三条拟合指数曲线.从图中可以看出,气体浓度越大,对光的吸收能力就越强.对于同一浓度的气体,光在环形腔中循环的前几个周期单位时间内气体对光的吸收程度比较大,随着光强的不断衰减,气体的吸收程度也逐渐减弱.

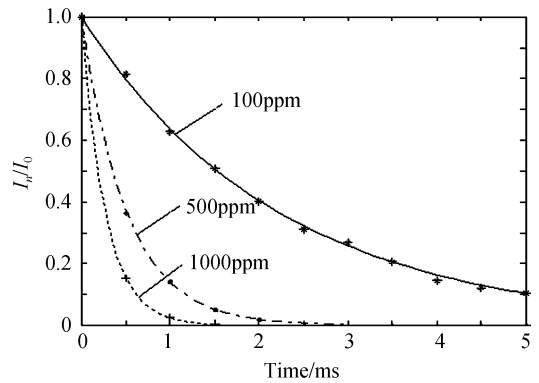


图 3 不同浓度的 CO 气体对光的吸收特性曲线

Fig. 3 Absorption characteristics of light with different CO concentrations

图 4 给出了衰荡时间与 CO 气体浓度关系的拟合曲线,从图中可以清楚的看到,随着气体浓度的增大,衰荡时间逐渐减小.图 5 分别给出了 CO 浓度为 500 ppm 时理论的对数衰荡曲线和实验所得的对数衰荡曲线图,实验衰荡时间与理论衰荡时间的差值

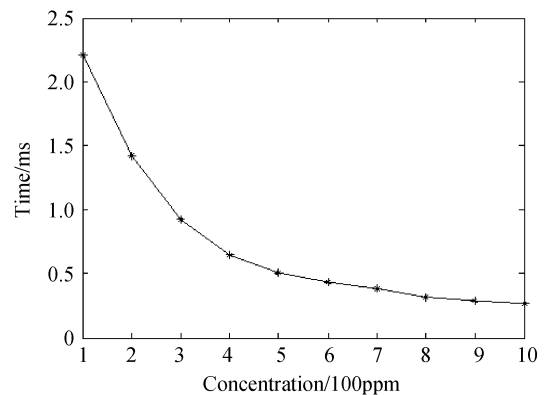


图 4 衰荡时间和 CO 气体浓度的关系

Fig. 4 Relationship between ring-down time and CO concentration

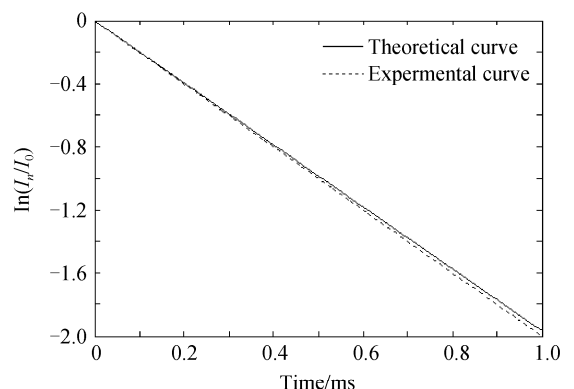


图 5 CO 浓度为 500 ppm 时的理论和实验对数衰荡曲线

Fig. 5 Logarithmic ring-down curves of theory and experiment with a concentration of 500 ppm

为 0.008 7 ms. 可以看出该测量系统可以跟随 CO 浓度的变化较为准确测得相应浓度下的衰荡时间, 有效地避免了由 EDFA 增益波动引起的测量误差.

4 结论

本文对光纤环形腔衰荡技术的气体浓度传感原理进行了理论推导, 论证了掺铒光纤放大器的使用对提高测量准确度的作用以及 EDFA 的增益稳定性对系统的影响. 设计和构造了光纤双环路 CO 浓度监测系统, 采用全光增益控制法对掺铒光纤放大器的增益进行锁定, 有利于提高系统的稳定性和测量的精确性. 通过分析得出了不同浓度的 CO 气体对光的吸收特性以及衰荡时间与气体浓度的关系. 实验结果表明气体浓度与衰荡时间的曲线与理论分析相符.

参考文献

- [1] YANG Cheng, MENG Xiao-hong, LIU Yu-xia. Evaluation on measurement uncertainty of detector device for light interference methane measuring meter [J]. *Coal Science Engineering*, 2004, **32**(4): 67-65.
杨诚, 孟小红, 刘玉霞. 光干涉式甲烷测定器检定装置测量不确定度评定[J]. *煤炭科学技术*, 2004, **32**(4): 67-65.
- [2] HE Gui-ying, CHEN Zhang-yue. Gas chroma to graphic determination of benzene and its homologues in atmosphere and in gas from pollution source[J]. *PTCA(PARTB; CHEM ANAL)*, 2005, **41**(7): 479-481.
何桂英, 陈章跃. 大气及污染源排放气体中苯系物气相色谱测定[J]. *理化检验-化学分册*, 2005, **41**(7): 479-481.
- [3] WEI Wei, SU Bin, GAO Ai-hua, *et al.* Decomposition of methane in plasma based on infrared absorption spectroscopy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 144-146.
卫伟, 苏斌, 高爱华, 等. 红外吸收光谱法研究等离子体甲烷裂解规律[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 144-146.
- [4] ANDERSON D Z, FRISCH J C, MASSER C S. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time [J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(8): 1238-1245.
- [5] O'KEEFE A, DEACON D A G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. *Rev Sci Instrum*, 1988, **59**(12): 2544-2550.
- [6] STEWARD G, ATHERTON K, *et al.* Fiber optic intra-cavity spectroscopy: combined ring-down and ICLAS architectures using fiber lasers [C]. *SPIE*, 2001, **4204**: 124-130.
- [7] STEWARD G, WHITENETT G, CULSHAW B, *et al.* Design of fiber laser and sensor systems for gas spectroscopy in the near-IR [C]. *SPIE*, 2004, **5272**(1): 172-180.
- [8] WHITENETT G, STEWARD G, ATHERTON K, *et al.* Optical fiber instrumentation for environmental monitoring applications [J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2004, **5**(4): 140-145.
- [9] WHITENETT G, STEWARD G, YU Hong-bo, *et al.* Investigation of a tuneable mode-locked fiber laser for application to multipoint gas spectroscopy [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(3): 813-818.
- [10] BROWN R S, KOZIN I. Fiber-loop ring-down spectroscopy [J]. *Chem Phys*, 2002, **117**(23): 10444-10447.
- [11] GENG Jian, ZHANG Ming-de, SUN Xiao-han. Gain locking of erbium optical fiber amplifiers [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2002, **25**(4): 453-457.
耿健, 张明德, 孙小菡. 掺铒光纤放大器的增益锁定 [J]. *电子器件*, 2002, **25**(4): 453-457.

Dual-loop Carbon Monoxide Concentration Measurement System Based on Cavity Ring-down Technology

LI Zhi-quan, ZHU Guo-fang, CHEN Xi, YANG Qiu-xia, LIU Shi-yuan, YAN Ju-bing, LI Wen-chao
(Instrument Science and Engineering Department, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: The dual-loop carbon monoxide concentration measurement system is introduced based on the sensing principle of fiber loop ring-down spectroscopy technology. The important role of erbium fiber amplifier and the influence of its gain fluctuation on the system are analysed. According to the feedback gain control of the erbium fiber amplifier, stability and precision of the system are further enhanced. The ring-down curves corresponding to different CO concentrations are obtained through experiments. Then, the absorption characteristics of different concentrations and the relationship between ring-down time and concentration are also analysed, all of which provide an important reference for the high accuracy gas concentration on-line measurement.

Key words: Fiber loop cavity; Ring-down time; Erbium-doped fiber amplifier; Gain control; Carbon monoxide concentration



LI Zhi-quan was born in 1954. He received the Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2000. Now he is a doctoral tutor and engaged in the research on nonlinear photoelectric sensing.