基于可调谐光纤激光器的 С н 气体光声光谱检测

彭 勇^{1,2},于清旭¹

1. 大连理工大学光电工程学院, 辽宁 大连 116023

2. 大连海事大学物理系, 辽宁大连 116026

摘 要 研制了基于可调谐掺 Er 光纤激光器的共振式光声光谱乙炔气体检测系统,结合波长调制和锁相放 大器的二次谐波信号检测技术,有效地消除了光声池窗片和池壁吸收入射光而引起的背景噪声,通过对该 系统的光学、声学和电子检测系统的优化,实现了低浓度乙炔气体的流动式检测。实验结果证明,当气体浓 度较低时,二次谐波振幅与气体浓度成正比,其线性响应相关度达到 0.999 53。在常温常压和 3.5 mW 平均 光功率以及 100 ms 锁相积分时间条件下,乙炔气体的极限检测灵敏度达到了 0.3 ppm(1 ppm = 1 µg · mL⁻¹)(SNR = 1 时),系统用可调谐掺 Er 光纤激光器代替半导体激光器作光源,降低了成本,为发展低成 本、实用、便携式微量气体光谱检测仪器奠定了基础。若采用多光程光声池,或者采用 EDFA 提高激光功 率,可大幅度提高信噪比,将极限检测灵敏度提高至 ppb(1 ppb = 1 ng ·mL⁻¹)量级。

关键词 波长调制光声光谱; 共振式光声池; 可调谐掺 Er 光纤激光器; 二次谐波检测; 乙炔 中图分类号: TH744.1 文献标识码: A DOI: 10. 3964/j. issn. 1000-0593 (2009) 08-2030-04

引 言

7

乙炔气体极易燃烧、分解和爆炸,在空气中的爆炸范围 为 2.5%~80%。同时,乙炔作为大型电力变压器油中故障 特征气体之一,是变压器内部故障类别判断和故障程度的重 要标志。因此,准确检测乙炔气体的浓度对保障生产、生活 的安全具有十分重要的意义[1]。随着光纤传感技术的发展, 光纤气体检测技术得到了广泛研究。其中,基于可调谐半导 体激光器的气体吸收光谱检测技术较为成熟^[2-5]。但吸收光 谱检测技术是在较大的背景信号上检测一个小的变化量,通 常其检测灵敏度、分辨率较低,测量极限在 ppm 量级。同时 可调谐半导体激光器较高的成本也限制了光谱检测技术的推 广。相对吸收光谱技术,光声光谱属于一种无背景的光谱测 量技术, 1971 年 Kreuzer 从理论上论证了用激光作光源的光 声光谱测量微量气体的灵敏度可达到 0.1 ppt 数量级 (10-13)。由于光声光谱技术检测灵敏度高,且能实现实时自 动测量,因此,在工业、农业以及医疗等行业的微量气体检 测方面得到广泛应用^[68]。本研究首次采用可调谐掺 Er 光纤 激光器(TEDFL)为光源^[9],利用单次反射共振式光声池,结 合波长调制和锁相放大器的二次谐波信号检测技术,构建了 光声光谱微量气体检测系统。通过对该系统的光学、声学和 电子检测系统的理论及实验条件优化的研究,实现了对 C₂ H₂ 气体的较高灵敏度的检测。

1 光声光谱与谐波检测原理

光声光谱是利用光声现象检测吸收物质浓度的一种光谱 技术。光声池内的气体分子吸收入射光能被激发到高能态, 通过自发辐射跃迁与无辐射跃迁回到低能态。在后一个过程 中,能量转化为气体分子的平动和转动动能,导致了气体温 度的升高。在气体体积一定的条件下,温度升高,气体压力 会增大。如果对入射光进行调制(强度调制或频率调制),光 声池内的气体温度便会呈现与调制频率相同的变化,进而导 致压强的变化。当调制频率在声频范围内时,便产生光声信 号。光声信号与激发光功率及气体浓度之间的关系由(1)式 给出

$$S = S_{\rm m} PF c \tag{1}$$

式中 F为光声池常数,单位 Pa · cm · W⁻¹; P 是入射光功 率,单位 W; 是气体分子在激光频率处的吸收系数,单位 cm⁻¹; S_m 是麦克风的灵敏度,单位 V · Pa⁻¹; c 是气体浓 度。

波长调制是通过控制激光波长以某一波长为中心,并以 一定频率 f 作正弦振荡实现的。激光波长的变化可以由(2)

e-mail:pengting25 @163. com

作者简介: 彭 勇, 1965 年生, 大连理工大学光电工程学院博士研究生

收稿日期: 2008-05-28,修订日期: 2008-08-29

基金项目:国家自然科学基金项目(60677010)资助

式描述

$$i(t) = c + a\cos(2 f t)$$
 (2)

其中 i(*t*) 是瞬时的激光波长, 。是激光调制的中心波长, *a* 是调制深度, *f* 是正弦调制频率。当以恒定的速度做波长扫描时, 利用锁相放大器即可以将光声信号的 2*f* 分量(即二次谐波)检测出来, 从而得到气体浓度的大小^[10,11]。

光声光谱测量的本底噪声主要来源于光声池窗片和池壁 的吸收引起的与调制频率同频的相干背景噪声。由于波长调 制的频率为 f, 而光声池共振频率为 2f, 这样对光声信号进 行二次谐波(2f) 探测可以有效的抑制由窗片和池壁吸收产 生的本底噪声^[12], 从而提高信噪比(SNR)和极限检测灵敏 度。

2 系统设计

乙炔分子所具有的五种简正振动模式所对应的基频吸收 都不在光纤低损耗波长范围之内,而乙炔分子 1+3 泛频吸 收带恰好位于石英光纤的低损耗窗口和掺 Er 光纤激光器的 工作波段范围。同时考虑到可调谐掺 Er 光纤激光器的增益 平坦范围,我们选择乙炔 P9(1 530.37 nm)峰作为待测吸收 峰,其他气体,如二氧化碳、水蒸汽等在此处无明显吸收, 不会产生交叉干扰,提高了系统选择性^[13]。

系统采用的可调谐掺 Er 光纤激光器(TEDFL)的结构如 图 1 所示。环形腔掺 Er 光纤激光器的泵浦源为 980 nm 半导 体激光器(DL),增益介质为掺 Er 光纤(EDF)。在环形腔掺 Er 光纤激光器中串入可调谐 Fabry-Perot 滤波器(FFP-TF2, Micron Optics 公司生产),通过改变施加到滤波器上的驱动 电压,实现激光波长的调谐。该激光器的光谱范围覆盖 C 波 段(1 510~1 565 nm),输出激光线宽小于 0.1 nm,平均光功 率为 3.5 mW。



Fig 1 Schematic configuration of the tunable erbium doped fiber laser

光声信号检测系统结构如图 2 所示。由锁相放大器给出 的正弦调制信号与锯齿波波长扫描信号通过加法电路叠加后 输出,驱动可调谐滤波器,实现对激光输出中心波长的扫描 和正弦调制。输出激光由 1 99 耦合器实现分路。其中 99 % 的激光经光纤准直器入射到光声池,用于激励乙炔气体光声 信号; 1 %的激光通过氢化氰气体参考池,作为波长参考。由 麦克风探测到的光声信号传送至锁相放大器,锁相放大器将 提取的二次谐波信号通过 GPIB 通信总线传送给计算机,由 计算机进行气体浓度的计算。此外,计算机还负责生成锯齿 波信号和接收波长参考光谱信号。为实现乙炔与合成空气两 种标准气体的精确配比,对光声检测系统进行标定,设计了 安装有质量流量控制器的配气系统,为光声池输送所需浓度 的乙炔气体-合成空气混合气体。



Fig. 2 Schematic configuration of the system

系统采用一阶纵向单次反射共振式光声池,其剖面图如 图 3。共振管两端是两个缓冲室,缓冲室长度为声共振管的 二分之一,是声波波长的四分之一。根据理论分析结果,长 度为 1/4 声波波长的缓冲室对来自窗片的噪声有最好的隔离 效果^[14]。缓冲室两端分别安置了石英窗片和镀金反射镜,以 实现激光在腔内的一次反射,相当于将激光功率提高一倍, 从而提高了系统灵敏度。麦克风(EK-3303)置于腔体的中央。 气体入口设在共振管的中央,由于气孔的直径仅有 0.4 mm, 对光声池的 Q 值影响很小,但可以大幅度提高系统的响应时 间。该光声池一阶共振模式频率为 1 630 Hz。激光波长的调 制频率设为光声池共振频率的 1/2,即 f = 815 Hz。锁相放 大器(SR830)的二次谐波为 2f = 1 630 Hz(由光声池的共振 频率决定),锁相放大器的时间常数选定为 100 ms。



Fig. 3 Profile drawing of the PA cell

3 实验及结果



2032



根据以上测量结果,我们可以估算系统的极限检测灵敏 度。如图 6 所示,在常温常压下 20 ppm 乙炔气体 P9 吸收峰 的二次谐波峰值为 8.52 μV,在 P9 峰附近选取一段无吸收 的本底噪声,其标准差为 0.138 μV,经计算可得,信噪比为 65。若以信噪比等于 1 作为极限检测灵敏度的话,则极限检 测灵敏度为 0.3 ppm。

由理论分析可知,当气体浓度较低时,二次谐波振幅与 气体浓度成正比^[10,11]。我们实验结果验证了这一理论的正 确性。实验选定乙炔气体浓度在 10~80 ppm 范围内,每隔 10 ppm 测量一个数据点,每个点的数据均由 10 次测量值平 均得出。根据测得的数据,绘制出相应的曲线,如图 7 所示。 从图中曲线可以看出,C₂ H₂ 气体浓度与二次谐波振幅呈线 性关系,其线性相关系数为 r=0.999 53,实验结果与理论分 析结果一致。



Fig. 6 Second harmonic signal of 20 ppm aceylene gas



4 结论与展望

本文研制的基于可调谐掺 Er 光纤激光器的共振式光声 光谱乙炔气体检测系统,其性能稳定,重复性好,灵敏度高。 采用波长调制和锁相放大器的二次谐波技术检测乙炔气体, 极限检测灵敏度达 0.3 ppm,高于变压器故障检测中乙炔气 体超标值(5 ppm)一个数量级,本系统可以应用于变压器故 障气体乙炔的检测。除乙炔气体外,此系统可用于检测近红 外 1 550 nm 附近存在吸收的其他气体,如氨气、氢化氰、二 氧化碳、一氧化碳等。本系统在极限检测灵敏度方面还有很 大的提升空间。如采用多次反射的 White 池或 Herriott 池、 利用大功率的 EDFA 放大激励光功率等可以进一步提高信 噪比,将极限检测灵敏度提高至 ppb 甚至亚 ppb 量级。

- 参考文献
- [1] Jacek Z K, Zbigniew L T. Proceedings of SPIE, 1998, 3731: 22.
- [2] KAN Ruirfeng, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, et al (阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光 谱分析), 2006, 26(3): 392.
- [3] Schilt S, Th évenaz L, Nikl & M, et al. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2004, 60(14): 3259.
- [4] Webber M E, Pushkarsky M, Patel C K N. Applied Optics, 2003, 42: 2119.
- [5] Repond P, Sigrist M W. Applied Optics, 1996, 35: 4065.
- [6] Miklos A, Hess P, Bozoki Z. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(4): 1937.

- [7] Sigrist M W. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(1): 486.
- [8] ZHANG Wang, YU Qing xu(张 望,于清旭). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(3): 614.
- [9] Susanne Søgaard, Jes Henningsen, Jens Engholm Pedersen. SPIE, 2000, 4185: 436.
- [10] Silver J A. Applied Optics, 1992, 31: 707.
- [11] Gustafsson J , Chekalin N , Axner O. Spectrochimica Acta Part B , 2003 , 58 : 123.
- [12] Webber M E, Pushkarsky M B, Patel C K N. SPIE, 2003, 4817: 111.
- [13] Webber M E, Baer D S, Hanson R K. Applied Optics, 2001, 40(12): 2031.
- [14] Bijnen F G C, Reuss J, Harren F J M. Review of Scientific Instruments, 1996, 67(8): 2914.
- [15] Reid J , Labrie D. Applied Physics B , 1981 , 26(3) : 203.

Tunable Fiber Laser Based Photoacoustic Spectroscopy for Acetylene Detection

PENG Yong^{1,2}, YU Qing-xu¹

- 1. School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China
- 2. Department of Physics, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract An acetylene detection system has been constructed with a tunable erbium-doped fiber laser (TEDFL) based photoacoustic spectrometer. Combining wavelength modulation and second harmonic signal detection technique, the system is able to effectively eliminate the background noise generated by absorption of the cell windows and the wall of the acoustic resonator. The system was applied to low concentration acetylene flowing measurement, through optimizing the systemic optics, acoustics and electron detection technique condition. The experimental results show that the second harmonic amplitude is directly proportional to gas concentration. Their linear pertinence coefficient is 0.999 53. The system sensitivity limit for acetylene detection is 0.3 ppm under atmosphere pressure with 100 ms time constant and 3.5 mW average optical power. The TEDFL was used as light source in stead of the DFB diode laser which is relatively costly. The system appears promising as a basis for developing cheap, practical, portable spectroscopy instruments for trace gas detection. The detection sensitivity could be greatly improved by using multi-path cell or increasing the laser power with EDFA.

Keywords Wavelength modulation photoacoustic spectroscopy (WM-PAS); Resonant photoacoustic cell; Tunable erbium-doped fiber laser; Second harmonic detection; Acetylene

(Received May 28, 2008; accepted Aug. 29, 2008)