

文章编号: 0258-7025(2009)04-0964-04

基于可调谐掺铒光纤激光器和掺铒光纤放大器的 光声光谱气体分析仪

刘善峥 张 望 于清旭

(大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 光声光谱技术用于检测低浓度乙炔气体具有灵敏度高、连续和快速实时在线测量的特点。采用近红外可调谐掺铒光纤激光器(TEDFL)串接大功率掺铒光纤放大器(EDFA)作光源,采用一阶纵向共振式双程吸收光声池,并运用波长调制和二次谐波检测技术,研制出一种新的高灵敏度微量气体近红外光声光谱分析仪。在常温常压下对低浓度乙炔气体的实验测量结果表明,该系统的极限检测灵敏度达到 1.3×10^{-9} ,其线性响应相关度达到0.99957,能够满足工业、环境监测和电力系统对乙炔检测和分析的需要。

关键词 光声光谱学; 光声光谱仪; 可调谐光纤激光器; 光纤放大器; 波长调制; 乙炔

中图分类号 TH 744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0964

Photoacoustic Spectrometer Based on the Combination of Tunable Erbium Doped Fiber Laser and Erbium Doped Fiber Amplifier

Liu Shanzheng Zhang Wang Yu Qingxu

(*School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology,*
Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract The technology of photoacoustic spectrum has features of high sensitivity, continuous and fast in situ measurement in detecting acetylene in low concentration. A new wavelength modulated photoacoustic spectrometer based on a near-infrared tunable erbium doped fiber laser (TEDFL) and a high power erbium doped fiber amplifier (EDFA) is developed. This system is demonstrated with low concentration acetylene measurement at the 1530.37 nm transition line, by incorporation of a first-longitudinal resonant photoacoustic cell with double absorption optical path and lock-in harmonic detection technique, yielding a detection limit of 1.3×10^{-9} at room temperature and atmospheric pressure and this can meet the demands of acetylene detection and analysis in industry, environment monitoring and power system.

Key words photoacoustic spectroscopy; photoacoustic spectrometer; tunable fiber laser; fiber amplifier; wavelength modulation; acetylene

1 引 言

基于红外可调谐激光器的光声光谱技术是一种间接吸收光谱测量技术。凭借其高灵敏度、大动态范围、快响应时间、能够实时检测多种气体和能够在恶劣环境中应用等突出优点,已经成为环境监测、工农业生产和生物科学研究等领域微量气体检测的重

要手段之一^[1]。近红外可调谐半导体激光器(TDL)具有能在室温工作、线宽窄、可调谐等特点,近几年来被广泛应用于气体吸收光谱和光声光谱分析^[2,3]。但可调谐半导体激光器结构复杂,价格昂贵,并且由于输出功率小,直接用于光声光谱分析灵敏度不高。而近红外可调谐掺铒光纤激光器

收稿日期: 2008-06-05; 收到修改稿日期: 2008-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(60677010)资助项目。

作者简介: 刘善峥(1982-),男,硕士研究生,主要从事光声光谱技术与应用方面的研究。

E-mail: kevin82_liu@yahoo.com.cn

导师简介: 于清旭(1955-),男,教授,博士生导师,主要从事激光光谱和光纤传感技术的研究。E-mail: yuqx@dlut.edu.cn

(TEDFL)不仅同样具有窄线宽和连续可调谐的优点,而且调谐范围宽,结构简单,易于与光纤放大系统集成从而提高输出功率,将成为新一代的光声光谱分析光源^[4]。

由于光声光谱检测技术的灵敏度直接依赖于激发光信号的激光功率,提高激光功率是提高光声检测系统灵敏度的一个主要途径。本文采用 TEDFL 串接大功率掺铒光纤放大器(EDFA)作为光声光谱仪的激发光源,结合纵向一阶共振式光声池构建了近红外微量气体光声光谱检测系统,并利用波长调制和二次谐波探测技术对低浓度乙炔气体进行了检测,实现了 10^{-9} 数量级的检测灵敏度。

2 光声光谱检测原理

光声光谱是利用光声转换现象检测目标物质浓度的一种光谱技术。激光光源发出的光经过调制(强度调制或者波长调制)后入射至光声池内,池内气体吸收光辐射能量,由基态跃迁至振动激发态。随后通过快速的弛豫过程以非辐射方式回到基态,将分子振动能转化为平动能,使气体的温度随调制频率变化,相应地引起气体压强的变化。当调制频率在声波范围内(几十赫兹到几千赫兹)时,气体压强变化所产生的声波便可以由安装在光声池中的麦克风检测到,麦克风输出音频信号的电压幅值为

$$S = S_m P_1 c F \alpha + N, \quad (1)$$

式中 S_m 为麦克风的灵敏度; P_1 为激发光信号的激光功率; F 为光声池常数; α 为气体在激光频率处的吸收系数; c 为所检测目标气体的浓度; N 为系统噪声,主要是来源于光声池壁和窗片吸收引起的与调制频率同频的相干背景噪声^[5]。与传统的强度调制技术相比,由于背景吸收不具波长选择性,并且波长调制的频率为 f ,而光声池共振频率为 $2f$,对光声信号进行二次谐波($2f$)探测可以有效地消除相干背景噪声^[6],从而提高信噪比(SNR)和极限检测灵敏度。此外,(1)式还表明光声信号强度与激发光信号的激光功率成正比,显然提高激发光功率可以提高光声检测灵敏度,这正是本实验采用大功率 EDFA 对 TEDFL 的输出光进行光功率放大从而大幅度提高光声系统检测灵敏度的直接理论依据。

3 系统构成

3.1 TEDFL 和 EDFA

系统采用 TEDFL 作为光源,环形腔 TEDFL

的光路结构如图 1 所示。抽运采用 980 nm 半导体激光器(LD);增益介质为掺铒光纤(EDF);光隔离器(ISO)的作用是保证光在环形腔内沿顺时针方向单向传播;通过调节加在可调谐滤波器(Tunable filter, Micron Optics 公司, FFP-TF2)压电陶瓷上的电压来实现滤波器法布里-珀罗(F-P)腔长调节,从而实现激光器输出波长的选择和调谐,该滤波器的自由光谱范围(FSR)为 116 nm,精细度(Finesse)为 600。TEDFL 输出波长的可调谐范围为 1511~1614 nm^[7],最大输出功率为 3.5 mW,3 dB 带宽小于 0.01 nm。

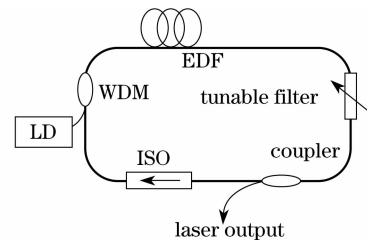


图 1 环形腔可调谐掺铒光纤激光器光路示意图

Fig. 1 Schematic of the ring cavity tunable erbium doped fiber laser

为了提高用于激发光声信号的激光功率,从而提高系统检测灵敏度,采用了具有高增益系数和高饱和输出功率的 EDFA(Amonics, AEDFA-27-BFA)对 TEDFL 的输出光进行功率放大,该 EDFA 的最大饱和输出功率可达 500 mW。

3.2 系统设计

系统结构如图 2 所示。将可调谐光纤激光器的工作波长通过加载在滤波器上的电压控制在 1530 nm 附近,保持输出功率大于 1 mW(保证 EDFA 工作在饱和状态)。由于乙炔气体分子在 1.5 μm 附近的 P9($\nu_1 + \nu_3$)峰吸收系数较大,并且能够有效避开水和二氧化碳的吸收干扰^[8],所以选择 1530.37 nm 波长的激光作为吸收测量波长。将锁相放大器(STANFORD SR830 DSP)发出的正弦调制信号与 PC(D/A 转换)发送的锯齿波信号通过加法电路叠加,驱动可调谐滤波器,实现对输出激光波长的调制和扫描。TEDFL 输出激光由分光比为 1:99 耦合器分成两路。99% 的激光经由 EDFA 放大通过光纤准直器(Collimator)入射到光声池内,用于激发光声信号;1% 的激光进入气体参考池。光声池内乙炔气体吸收光能产生的声音信号由安装在光声池中的麦克风(Knowles EK3033, 22 mV/Pa)接收,转换成电压信号送到锁相放大器,进行二次谐波分析。

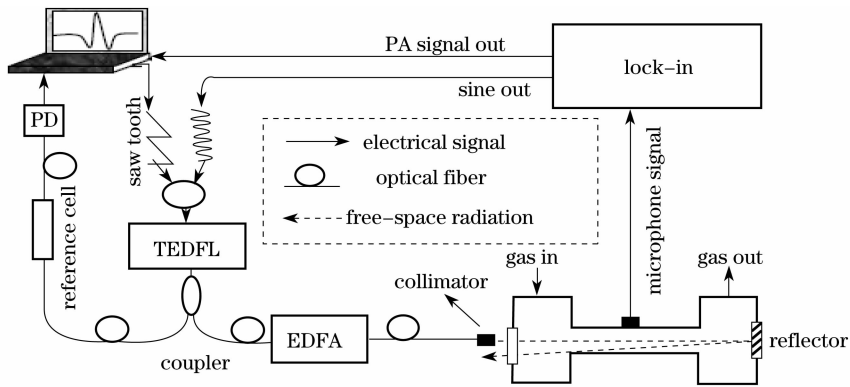


图2 基于 TEDFL-EDFA 光声光谱仪结构图

Fig. 2 Block diagram of the photoacoustic spectrometer based on TEDFL-EDFA

系统采用一阶纵向共振式光声池^[9],其谐振管长度为100 mm,直径10 mm;两端设计有缓冲池,能有效抑制窗片和池壁的吸收噪声。光声池一端装有镀金反射镜,以实现激光在光声池内的一次反射,增加激光在光声池内的吸程,相当于提高激光功率一倍。该光声池一阶纵向共振频率为1630 Hz,品质因素 $Q=22$ 。系统采用波长调制(正弦波调制)和二次谐波探测技术,为了获得高的信噪比和检测灵敏度,需要对调制频率和调制深度两个参数进行实验优化。激光波长的调制频率设为光声池一阶共振模式频率的1/2,即 $f=815$ Hz。在波长调制光谱中,调制深度(正弦波振幅)的大小直接关系到二次谐波峰值大小和半峰全宽(FWHM)值^[10]。在本实验中采用了谐波峰值最大并且峰宽最小(即谐波峰值对应的电压值与峰宽对应的电压值的比值最大)时对应的正弦波幅值作为系统的调制深度。

利用光声检测系统,对常温下 1.1×10^{-6} 的乙炔在不同调制深度情况下进行二次谐波检测,处理结果如图3所示,可见当正弦波振幅为14 mV时对应的谐波峰值与峰宽的比值最大,即系统最佳调制深度为14 mV。

4 实验结果

EDFA 输出功率为480 mW时,采用上述优化参数,在常温常压下向光声池内通入体积分数为 46.9×10^{-9} (利用质量流量控制器对体积分数为 9.9×10^{-6} 的乙炔标准气用合成空气进行稀释)的乙炔气体,测得的二次谐波信号如图4所示,谐波峰值为 $2.6338 \mu\text{V}$ 。由于二次谐波峰值对应的波长与乙炔的吸收波长是重合的,本文选取谐波峰值左侧乙炔没有吸收的波段作为本底来进行噪声分析,其标准差为 $0.073 \mu\text{V}$,从而得到该系统对乙炔气体的可

探测极限灵敏度为 1.3×10^{-9} 。

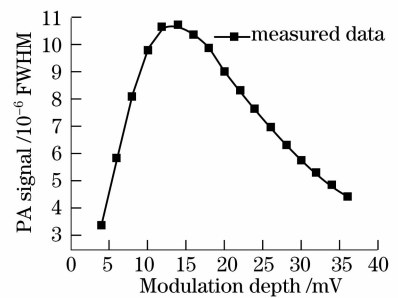


图3 谐波峰值与半峰全宽比值随调制振幅的变化
Fig. 3 Measured peak amplitude and FWHM as a function of modulation depth

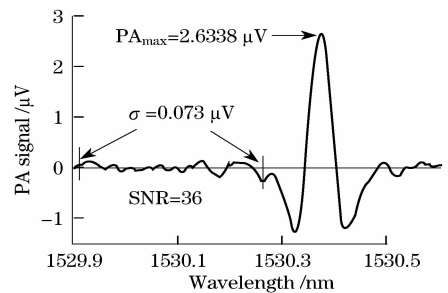


图4 优化条件下测得体积分数为 47×10^{-9} 乙炔的二次谐波
Fig. 4 Measured SH spectrum of $46.9 \times 10^{-9} \text{C}_2\text{H}_2$, at optimum conditions

图5给出了在480 mW的激光功率下,通过对不同浓度乙炔进行测量得到的谐波峰值进行直线拟合的结果,每个数据点由5组测量数据平均得到。可以看出乙炔气体的浓度和二次谐波峰值存在良好的线性关系,其线性相关度达0.99957。

5 结论

研制了一种基于 TEDFL-EDFA 的新型光声光谱仪系统,介绍了该光声光谱仪的原理和结构。为了测试该系统的性能,针对乙炔气体在1530.37 nm

处的泛频($\nu_1 + \nu_3$)吸收谱线,利用波长调制和锁相放大器的二次谐波检测技术,通过参数优化,在常温常压下对低浓度乙炔气体进行了检测,实现了高达 1.3×10^{-9} 的可检测极限灵敏度;并且对不同浓度的乙炔气体进行了检测,实验数据的处理结果显示了乙炔浓度与光声信号谐波峰值之间良好的线性关系。除乙炔外,该光声光谱仪还可用于检测在 EDFA 工作波长范围(1526~1566 nm)内有吸收的其他气体。此外通过进一步提高 EDFA 的输出功率,采用更高灵敏度和低噪声的麦克风以及多次反射式光声池,可以进一步提高系统检测极限灵敏度。

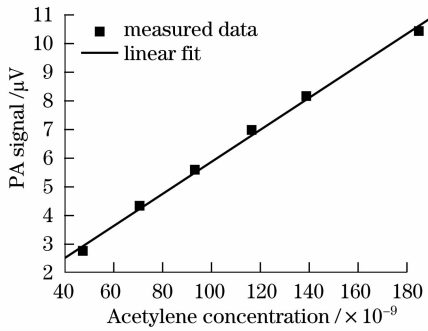


图5 不同浓度下乙炔谐波峰值的线性拟合

Fig. 5 Linear fitting of SH peak of different acetylene concentrations

参 考 文 献

1 M. W. Sigrist. Trace gas monitoring by laser photoacoustic spectroscopy and related techniques(plenary) [J]. *Rev. Sci.*

Instrum., 2003, **74**(1):486~490

2 Chen Dong, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy system for fire gases sensing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1552~1556

陈 东,刘文清,张玉钧 等. 可调谐半导体激光光谱火灾气体探测系统[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1552~1556

3 Chen Jiuying, Liu Jianguo, Zhang Yujun *et al.*. Autobalanced detection based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):350~353

陈玖英,刘建国,张玉钧 等. 可调谐半导体激光吸收光谱自平衡检测方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):350~353

4 Susanne Sogaard, Jes Henningsen, Jens Engholm Pedersen. Wavelength modulation of fibre lasers—a direct comparison with DFB lasers and extended cavity lasers[C]. *SPIE*, 2000, **4185**:436~439

5 Yu Qingxu, Li Shaocheng, Song Changlie *et al.*. Computer controlled laser photo-acoustic spectrometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(5):451~454

于清旭,李少成,宋昌烈 等. 微机控制的高灵敏度光声光谱仪研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(5):451~454

6 M. E. Webber, M. B. Pushkarsky, C. K. N. Patel. Ultra-sensitive gas detection using diode lasers and resonant photoacoustic spectroscopy[C]. *SPIE*, 2003, **4817**:111~122

7 Wang Qi, Yu Qingxu. A broadband tunable ring erbium-doped fiber laser[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(Suppl.): 151~153

王 琦,于清旭. 超宽带可调谐环形腔掺铒光纤激光器研究[J]. *光电子 • 激光*, 2006, **17**(增刊):151~153

8 M. E. Webber, D. S. Baer, R. K. Hanson. Ammonia monitoring near 1.5 μm with diode-laser absorption sensors[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(12):2031~2042

9 Wang Zhang, Zhiying Wu, Qingxu Yu. Photoacoustic spectroscopy for fast and sensitive ammonia detection[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **15**(11):677~679

10 J. Reid, D. Labrie. Second-harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory [J]. *Appl. Phys. B*, 1981, **26**(3):203~210