

文章编号: 0258-7025(2005)07-0982-05

基于光纤激光器的有源腔气体吸收测量网络

张 敏¹, 匡 武¹, 廖延彪¹, 张 岩², 王东宁³, 靳 伟³

(¹清华大学电子工程系, 北京 100084;
²首都师范大学物理系, 北京 100073;³香港理工大学电机系, 香港)

摘要 有源内腔法气体吸收测量技术具有极高的灵敏度,通过对基于掺铒光纤激光器的有源气体测量系统的分析和静态测量结果表明,在激光器阈值附近系统的灵敏度最大。为了有效地抑制噪声,提高测量精度,在环形腔光纤激光器的基础上又提出了采用波长调制/二次谐波检测的测量方法,并采用 $1 \times N$ 的波分复用(WDM)器件构建了有源传感网络。实验中采用了一个 1×4 的波分复用器,其通道对应于乙炔气体的吸收波长,系统的解调通过扫描可调谐光滤波器的波长来实现。通过对 8.31 mol/m^3 的乙炔气体的实验表明系统最小可探测气体浓度为 0.044 mol/m^3 。

关键词 激光技术; 光纤激光器; 有源内腔法; 波分复用; 吸收测量

中图分类号 TN247; O348.11 文献标识码 A

Intra-Cavity Absorption Gas Measurement Network Based on the Fiber Lasers

ZHANG Min¹, KUANG Wu¹, LIAO Yan-biao¹,
ZHANG Yan², WANG Dong-ning³, JIN Wei³

(¹Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
²Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100073, China
³Department of Electronic Engineering, The Hongkong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract High sensitivity of the intra-cavity absorption gas sensor (ICAGS) measurement network based on the erbium doped fiber ring laser was demonstrated. It is found that the maximum sensitivity can be obtained when the laser is operating near the threshold. Wavelength modulation/second harmonic detection technique was used to improve the performance of intra-cavity absorption measurement. A $1 \times N$ wavelength division multiplexer (WDM) with one channel corresponding to the absorption line of acetylene within the transmission window of 1530 nm was used in the WDM active sensing network. The system is demodulated by scanning the wavelength of a tunable filter. The minimum detectable gas concentration of 0.044 mol/m^3 was achieved in measuring the 8.31 mol/m^3 acetylene gas.

Key words laser technique; fiber laser; active intra-cavity; wavelength division multiplexer; absorption measurement

1 引 言

基于气体吸收光谱的气体测量技术具有很高的测量灵敏度和气体鉴别能力,是环境监测和工业气体过程控制中的一项重要技术。迄今为止,基于光谱吸收的气体测量技术的测量精度已经达到了相当高的水平,实现这种高精度的检测技术主要有两类:一类是利用波长调制或频率调制的光谱检测技术

(WMS 或 FMS)^[1,2]。它是利用调制结合二次谐波检测来获得高精度,一般可达 10^{-6} 量级。这类传感技术随着各种光通信器件诸如分布反馈式(DFB)激光器、可调谐窄带激光器和可调谐梳状滤波器等的进展,已经在光纤化和实用化方面取得了长足的进步,并正向工程实用化阶段发展^[3,4]。另一类是利用各种内腔的光谱检测技术。它是采用各种办法,使光多次通过被测气体,从而极大地增加了光与气

收稿日期: 2004-07-01; 收到修改稿日期: 2004-10-10

作者简介: 张 敏(1971—),男,浙江人,博士,清华大学电子工程系讲师,主要从事光纤传感技术的研究。E-mail: minzhang@mail.tsinghua.edu.cn

体的有效作用距离,以得到高灵敏度,一般可达 10^{-9} 量级或更高。内腔的气体测量技术有两种基本类型:Ring-down腔光谱检测技术^[5,6]和有源内腔激光光谱检测技术^[7~10]。这是目前测量灵敏度最高的光谱吸收检测手段。现在这类技术尚处于实验研究阶段,离实用化还有一段距离。

结合光纤传感技术的有源腔气体测量技术具有本质安全,受环境影响小,易于成网和便于远距离测量等优点,对于实现更高灵敏度的气体检测具有重要的意义,已经成为近年来人们关注的研究热点之一。

本文主要描述了采用掺铒光纤放大器(EDFA)的环形光纤激光器有源内腔气体测量技术的基本原理以及波分复用(WDM)技术和波长调制谐波检测技术在有源腔气体测量方面的应用和最新实验研究成果。

2 测量原理与灵敏度分析

有源激光内腔气体测量技术是指在激光器腔内加入气体吸收盒,并使激光器的光谱与被测气体吸收光谱相对应,然后通过测量激光器输出光谱因气体吸收而引起的变化,从而得到所需测量的气体浓度。与Ring-down腔不同的是有源内腔气体测量技术不需要从腔外注入测量信号光,而且气体吸收体本身就是激光器的一个组成部分。这时气体吸收产生的损耗成为激光器的腔内损耗的一部分,这种附加损耗由于激光器的非线性工作特性,会对激光器的输出造成巨大影响,引起激光器的输出模式和光强等特性参数的改变,因此这种测量方法的灵敏度极高,可以达到 10^{-9} 量级。有源内腔气体测量技术的特点之一是其测量范围主要取决于激光器的增益特性,通过增大激光器的增益调节范围,可以有效地扩大测量的动态范围。

在讨论基于光纤激光器的有源内腔测量方法的灵敏度特性时,作如下的近似:由于光纤激光器腔长通常都比较长,并且考虑远程测量的要求,激光器的腔长要比一般的半导体激光器、固体激光器以及染料激光器好几个数量级,因此其纵模间隔非常小(一般为10 MHz或更小),一般的光谱分析技术很难区分这个量级的纵模间隔。由于纵模间隔小,在气体的吸收谱线内(通常为吉赫兹量级)存在许多模式,这些模式之间相互竞争,最后会造成输出结果的不稳定。改进的方法是加入波长选择器件,只选择

某一气体吸收线内的激光谱线,并取其平均输出光强的变化,或者使激光器实现真正的单纵模工作。

因此在激光器腔内加入窄带可调谐光滤波器,使激光器输出线宽远小于气体吸收谱宽,激光器可近似为单模激光器。

用掺铒光纤放大器组成的光纤激光器可以用三能级结构的速率方程来近似表示

$$\frac{dN_3}{dt} = W_p N_1 - \frac{N_3}{\tau_3}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_3} - \frac{N_2}{\tau_2} - \frac{\eta_s}{S\tau_e}(\sigma_c N_2 - \sigma_a N_1)N_l, \quad (2)$$

$$N_1 = N_0 - N_2 - N_3, \quad (3)$$

$$\frac{dN_l}{dt} = \frac{\eta_s l_a}{\tau_c}[(1 + N_l)\sigma_c N_2 - \sigma_a N_l N_1] - \delta/\tau_c - N_l, \quad (4)$$

其中 N_0 为铒离子掺杂浓度, N_1, N_2 和 N_3 为各能级的粒子数, $W_p = P_p \sigma_{ap} / A_{eff} h\nu_p$ 为抽运效率, P_p 为抽运功率, $h\nu_p$ 为抽运光子能量, A_{eff} 为抽运光的有效面积, σ_{ap} 为抽运光的吸收截面, η_s 为光纤芯内信号光的比例, S 为纤芯面积, σ_c 和 σ_a 为激光的发射和吸收截面, N_l 为激光腔内的光子数, τ_3 为抽运能级的非辐射衰减时间, τ_2 为上能级的光子寿命, τ_c 为光子在腔内传输一周的时间, δ 为腔内损耗, l_a 为掺铒光纤长度。

如果忽略少量的自发辐射,(4)式可以改写为

$$\frac{dN_l}{dt} = \frac{\eta_s l_a}{\tau_c}(\sigma_c N_2 - \sigma_a N_1)N_l - \frac{\delta}{\tau_c}N_l, \quad (5)$$

根据这些速率方程,可以用数值计算的方法来分析计算不同抽运功率和不同内腔损耗下的激光器的输出特性,从而分析有源内腔法的灵敏度特性。

在忽略自发辐射的情况下,有源内腔法的灵敏度特性可以用(1)~(3)式和(5)式进行一些比较直观的近似分析。用这些公式可以得到激光器输出的稳态解

$$N_l = A/\delta - B, \quad (6)$$

$$A = \frac{S\tau_c l_a N_0 (W_p \tau_2 \sigma_a - \sigma_a)}{\tau_2 [\sigma_a + \sigma_c (1 + W_p \tau_3)]}, \quad (7a)$$

$$B = \frac{S\tau_c (1 + W_p \tau_2 + W_p \tau_3)}{\eta_s \tau_2 [\sigma_a + \sigma_c (1 + W_p \tau_3)]}. \quad (7b)$$

虽然这只是一个很近似的解,但是对于分析单模激光有源内腔法的灵敏度特性非常有用。

依据朗伯原理,定义有源内腔法的吸收信号 K 为

$$K = \ln(I_0/I), \quad (8)$$

其中 I_0 为没有气体吸收时的激光输出,它正比于激

光腔内的光子数 $q, I = I_0 - \Delta I, \Delta I$ 是由于气体吸收引起的光强变化,当吸收引起的光强变化很小,即 $\Delta I \ll I_0$ 时,(8)式可写成

$$K \approx \Delta I / I_0. \tag{9}$$

因此根据(6)和(9)式,可得

$$K = \frac{\Delta I}{I_0} = \frac{\Delta q}{q} = \frac{A \Delta \delta}{\delta(A - B\delta)}, \tag{10}$$

其中 $A - B\delta = 0$ 对应的就是激光器的阈值状态, $\Delta \delta$ 为光一次通过气体由于吸收引起的损耗。

根据(10)式,可以定义有源内腔法相对于单次吸收的灵敏度增强因子为

$$\xi \approx \frac{K}{\Delta \delta} = \frac{A}{\delta(A - B\delta)}, \tag{11}$$

由此可见,基于单模激光器的有源内腔法在激光器的阈值附近可以得到最大的测量灵敏度。

图 1 显示的是用数值算法得到的灵敏度增强因子曲线。在计算过程中应用了(1)~(4)式和式(11)所定义的灵敏度增强因子 ξ 。可以看到在一定的内腔损耗条件下,在其相应的阈值条件附近,得到最大的灵敏度增强值。计算中考虑了激光器的自发辐射,因此在阈值处其灵敏度增强因子趋向平缓。

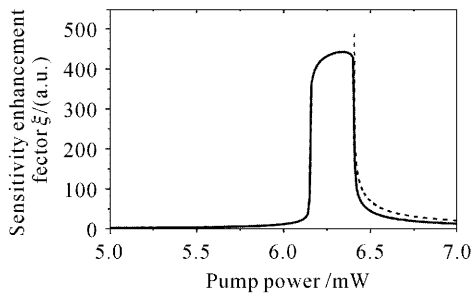


图 1 有源内腔法的灵敏度特性
Fig. 1 Theoretical sensitivity enhancement factor as a function of pump power

然而在实际工作中,激光器不可能正好工作在阈值,在阈值处信号小且激光器的工作状态不稳定,所以实际工作中一般是稍微增加激光器的抽运功率(这时要牺牲一点灵敏度),以求适当提高系统的信噪比和稳定性。由于在一定范围内激光器的增益可以通过改变抽运光功率来调节,因此有源内腔法的测量范围可以很大,原理上只要激光器工作物质的增益足以补偿腔内损耗,测量的范围就可无限增大。

3 传感网络与实验

有源内腔法的气体传感网络如图 2 所示,该实验

系统以乙炔气体为测量对象,光学部分采用掺铒光纤放大器为增益物质,用可调谐光滤波器选择工作波长。系统中采用了 $1 \times N$ 的波分复用器件构成了一个传感网络,依据所测气体的吸收光谱特性,通过特殊设计波分复用器的通道,该系统可用于测量多点多种气体。由于实验条件的限制,本文采用了一个 1×4 的波分复用器件,其中一个通道对应了乙炔气体在 1530 nm 附近的吸收光谱。

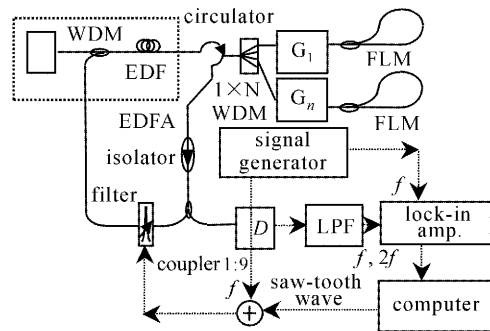


图 2 有源内腔波分复用传感网络与谐波检测技术
G: 气体吸收盒; FLM: 光纤环形反射器;
D: 光探测器; LPF: 低通滤波器

Fig. 2 Experimental setup of wavelength modulated ICAGS network

G: gas absorption cell; FLM: fiber loop mirror;
D: detector; LPF: low-pass filter

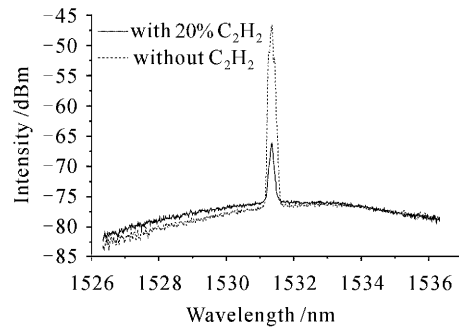


图 3 有源内腔法测量乙炔气体的实验结果
Fig. 3 Output spectra of ICAGS: with (dash line) and without (solid line) 8.31 mol/m³ acetylene in the gas cell

首先用图 2 所示的基本光学结构,对乙炔气体进行了静态测量。实验中,将激光器的抽运光功率调节到稍大于激光器的阈值,并通过调节光滤波器(谱宽小于 0.02 nm)的波长使其对准待测气体的吸收峰,然后把一定浓度的待测气体充入气体盒 G,从 1:9 耦合器的输出端用光谱仪进行测量。从光谱仪上可以看到输出光的功率大幅度下降,其下降幅度远大于同样的光单次通过气体吸收盒所引起的变化幅度。图 3 显示的是以 8.31 mol/m³ (20%) 浓度的

乙炔气体为测量对象的实验结果,激光中心波长对准乙炔气体在 1529.18 nm 处的吸收峰,实验中气体盒的长度为 25 mm,对应的气体单次吸收损耗小于 0.6 dB,采用有源内腔法得到的输出光的幅度变化超过了 35 dB,相应的测量灵敏度提高了近 60 倍。

采用光谱仪进行分析的方法由于受到光谱仪本身的动态特性和光谱分辨力的限制,通常只能进行静态测量,实际应用中一般不方便将高精度的光谱仪搬至测量现场进行实时气体测量,因此需要采用更有效的信号检测方法。在常规的检测技术中,波长调制/二次谐波检测技术是一种比较成熟^[10],且信噪比非常高的检测技术,尤其适用于那些有比较尖锐的吸收峰的气体的测量。这种技术的基本原理如图 4 所示,激光器的波长受到频率为 f 的正弦信号的调制,调制幅度与气体的吸收线宽可比拟,输出光信号通过光电转换后可以得到含有一次和二次谐波的一组强度信号,如图 4(a)所示,当激光器的中心波长正好与气体吸收峰对准的时候,二次谐波的幅度最大,如图 4(b)所示。通过把激光器锁定在气体吸收峰上,或者让激光波长扫过气体的吸收谱,并用锁相放大器探测二次谐波的最大值,就可测量气体的浓度。

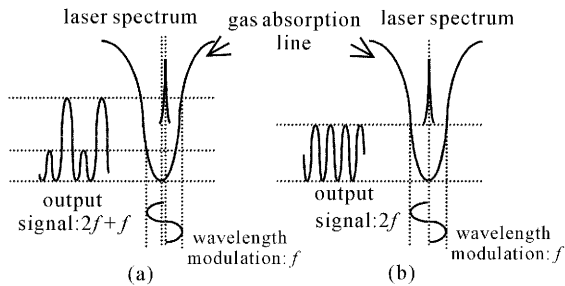


图 4 波长调制/二次谐波检测原理,中心波长没有对准气体吸收线(a)和对准气体吸收线(b)

Fig. 4 Spectroscopy of wavelength modulation/second harmonic detection, and the center wavelength of the laser is not aligned to the gas absorption line (a) and aligned to the gas absorption (b)

波长调制/二次谐波检测技术也可以用于有源内腔法。在有源内腔法中加入波长调制的情况比较复杂,激光腔内波长的变化会引起反转粒子数和光子数的波动,从而破坏激光器原来的平衡状态,最终导致在激光器输出上产生许多尖峰,这些尖峰往往包含许多高频成分。因此波长调制的频率需要根据激光器的实际情况来确定,输出信号需要先通过低

通滤波器消除部分高频噪声的影响,再通过锁相放大器来探测二次谐波信号。实验以图 2 所示的光学系统为基础,在窄带可调谐光滤波器上加载一个频率为 f 的正弦信号调制,同时用一个更低频率的三角波进行波长扫描,在输出端用光电接收器转换成电信号之后,经过低通滤波器后由锁相放大器得到二次谐波信号。

图 5 是激光波长重复扫描时,锁定放大器所测得的二次谐波的幅度输出曲线。曲线中每一个扫描周期中的最大值对应的就是当激光器中心波长正好对准乙炔气体在 1529.18 nm 处吸收峰时的情况。通过固定系统参量并测量一系列标准浓度的气体的方法,就可以标定这套系统并用于气体测量了。实验中对 8.31 mol/m^3 浓度的乙炔气体进行了测量,得到的信噪比为 200,从而可以判断该系统的测量精度为 0.044 mol/m^3 。

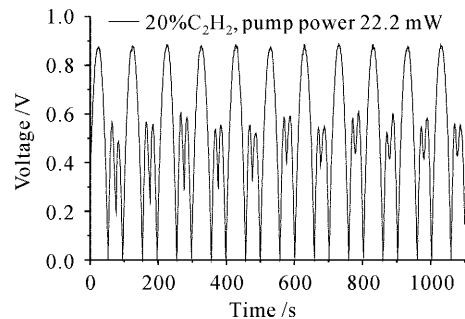


图 5 实验得到的二次谐波输出曲线

Fig. 5 Amplitude variation of second harmonic signal when the tunable filter is repeatedly scanned

4 结 论

给出了激光有源内腔气体吸收测量技术的原理和这些技术在光纤化气体测量方面的一些研究结果。与其他光纤气体传感技术相比,基于光纤激光器的有源气体传感网络可以保持一般光纤传感器的优点,又可以极大地增加测量灵敏度,理论上在激光器阈值附近灵敏度可增加约 400 倍。虽然这些技术还处于研究阶段,离实用还有距离,但这种新颖的有源光纤气体传感网络对于一些特殊应用环境如国防(防生化武器)以及水下作业等的有害气体的探测等具有实际的应用前景。

参 考 文 献

- Jin Wei, Liao Yanbiao, Zhang Zhipeng *et al.*. Guided Wave Optical Sensors [M]. Beijing: Science Press, 1998

靳 伟,廖延彪,张志鹏等. 导波光传感器:原理与技术

- [M]. 北京: 科学出版社, 1998
- 2 D. T. Cassidy, J. Reid. Atmospheric pressure monitoring of trace gases using tunable diode lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(7): 1185~1190
 - 3 Wei Heli, Wu Chengjiu, Ma Zhijun *et al.*. A new method for improving the measurement spectral resolution of atmospheric absorption spectra [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 165~169
魏合理, 邬承就, 马志军 等. 提高大气吸收光谱测量分辨的新方法 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(2): 165~169
 - 4 H. L. Ho, W. Jin, M. S. Demokan. Sensitive, multipoint gas detection using TDM and wavelength modulation spectroscopy [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(14): 1191~1193
 - 5 A. O'Keefe, David A. G. Deacon. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**: 2544~2551
 - 6 J. J. Scherer, D. Voelkel, D. J. Rakestraw *et al.*. Infrared cavity ringdown laser absorption spectroscopy (IR-CRLAS) [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1995, **245**: 273~280
 - 7 V. M. Baev, T. Latz, P. E. Toschek. Laser intracavity absorption spectroscopy [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **69**: 171~202
 - 8 Y. Zhang, M. Zhang, W. Jin. Sensitivity enhancement in erbium-doped fiber laser intra-cavity absorption sensor [J]. *Sensor and Actuator A*, 2003, **104**(2): 183~187
 - 9 Yu Hongbo, Liao Yanbiao, Lai Shurong *et al.*. Optical fiber gas sensor network with intracavity spectroscopy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 154~158
喻洪波, 廖延彪, 赖淑蓉 等. 光纤有源内腔激光传感网络技术 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 154~158
 - 10 Min Zhang, D. N. Wang, Wei Jin *et al.*. Wavelength modulation technique for intra-cavity absorption gas sensor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, **53**(1): 136~139

(上接封四)

7. 图表 图要设计美观,大小适中,尺寸一般为 8cm×10cm 以内,线条均匀,主辅线分明,粗线一般为 0.25~0.5mm,细线一般为粗线的 1/2,图中主线用粗线,如函数曲线等,辅线用细线,如坐标轴线、指示线等;照片要求对比度高,层次清晰。推荐使用三线表。**图表文字:**图题、表题须中英文对照,图面、表面一律用英文。

8. 参考文献 应引用公开出版物,并仔细核对;欢迎作者充分引用本刊上同行的文献。每条文献应作相应的文献类型标识(见方括号内)。参考文献的原文献为英文,请用英文表示,如原文献为其他语种,请译成英文,在该文献最后用括号注明,如原为日文,则用(in Japanese),如原文献为中文,则给出中文和相应的英文译文。每条文献的顺序和标点如下:

专著[M]、学位论文[D]、报告[R]——著者(三名)。文献题名。版本(专著用),出版地:出版者,出版年。起止页码;

期刊[J]——作者(三名)。论文题目[J]。刊名,出版年,卷(期):起止页码;

专利[P]——专利申请者。专利题目[P]。专利国别,专利文献种类,专利号,出版日期;

文集[C]——作者(三名)。论文题目[C]。编者,论文集名,出版地:出版者,年。起止页码。

详细的论文排版格式请参见近期的《中国激光》。

9. 基金资助 论文如获省、部级以上的基金资助,须在首页的脚注位置注明基金资助单位全称及批准号。

10. 版面费 遵照中国科协和中国科学院有关文件精神,向录用稿作者收取适量版面费以聊补本刊的高额亏损。

11. 版权 录用稿件一经刊出,论文版权(含各种介质)均归编辑部所有。本刊向作者酌付稿酬及赠送该期期刊 1 册,抽印本 10 份。

12. 本刊 已入编《中国学术期刊(光盘版)》和万方数据库,著作权使用费在奉寄作者稿酬中一次性支付。如有不同意将文章编入上述数据库者,请事先声明,本刊将作适当处理。

特别声明:凡在国内外正式出版的刊物上登载过的稿件,本刊一律不予刊登。若发现一稿多投者,本刊三年内不接受其稿件,并追补对本刊造成的损失。

凡本刊投稿者,均视作接受上述各项规定,本刊不再另行声明。

《中国激光》编辑部

2005 年 7 月