

文章编号: 0258-7025(2003)02-0154-05

光纤有源内腔激光传感网络技术

喻洪波¹, 廖延彪¹, 赖淑蓉¹, 靳伟², 施纯峥¹, 何海律²

(¹ 清华大学电子工程系, 北京 100084; ² 香港理工大学电机系, 香港九龙)

摘要 提出了一种新的光纤气体传感网络的有源复用系统, 将锁模激光技术与光纤环形内腔激光气体传感技术相结合, 提出并实现一套以锁模光纤环形腔激光器为复用基础的光纤内腔激光气体传感网络系统, 此传感网络系统可同时对多个气体传感单元进行高灵敏度测量。

关键词 传感器技术; 激光光谱分析; 光纤传感器; 光纤锁模激光器; 光纤传感网络

中图分类号 TP 212 **文献标识码** A

Optical Fiber Gas Sensor Network with Intracavity Spectroscopy

YU Hong-bo¹, LIAO Yan-biao¹, LAI Shu-rong¹,

JIN Wei², SHI Chun-zheng¹, H. L. Ho²

¹Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

²Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

Abstract A new way of multiplexing fibre optic sensors for gas detection based on intra-cavity spectroscopy with fibre lasers is investigated. An active mode-locked fibre laser is used to address the sensing network and provide preliminary experimental results to demonstrate the principle of operation. It is a new technique for combining intra-cavity spectroscopy with a sensor network and has the potential for multiplexing a few tens of gas sensors with low cost and high sensitivity.

Key words sensor technique; laser spectral analysis; optical fiber sensor; optical fiber mode-locked laser; optical fiber sensor network

1 引言

内腔激光气体传感技术是一种很重要的激光光谱分析技术。它将气体吸收体放入激光腔内, 利用光在激光腔内来回振荡, 增加光与气体有效作用长度, 气体吸收的测量灵敏度会有成百倍的增加。内腔激光气体测量一般是在多模激光下比较不同波长的激光强度。有气体吸收时, 在其吸收峰波长处会出现一个强度凹陷, 通过测量输出光强计算得到腔内损耗变化进而得到气体浓度信息^[1,2]。利用光纤环形腔激光器可以进行光纤内腔激光气体传感测量。

光纤气体传感技术一个重要的优势就是易于实现复用。利用光纤复用技术, 把多个传感器连成一

个复杂的传感网络, 进行多点、多种气体的监测和控制, 可以降低系统的成本, 增强可靠性^[3~5]。利用光纤放大器构成的有源复用系统可以在提高系统复用数目的同时保证每个信道能量足够大, 因此倍受关注。光纤光栅构成有源腔的方法已经在许多系统得到应用, 但是一般只能用于波分复用。如何在工作于同一波长的光纤有源气体传感系统中找到一种复用方法, 使得系统能够多点测量, 对于光纤内腔激光气体技术走向实用有着特别的意义^[6,7]。

2 光纤锁模激光器用于复用技术

利用锁模激光器对腔长敏感的特性, 提出一种用于光纤环形内腔激光气体网络系统复用的方法。

收稿日期: 2001-10-31; 收到修改稿日期: 2002-01-24

作者简介: 喻洪波(1971—), 男, 清华大学电子系, 博士, 曾在香港和英国从事光纤技术研究, 包括光纤器件及传感检测技术。E-mail: hongboyu@optic-wave.com

主动锁模光纤环形激光器主要由增益器件-掺铒光纤放大器(EDFA)、铌酸锂(LiNbO₃)强度调制器(光开关)以及滤波器等连接在一起的一个有源环形腔构成。一般腔长为数十米到数百米,对应的纵模间隔为几百千赫到几兆赫。当光开关调制信号的频率和光通过腔一周的时间正好匹配时,光信号就可以在腔中反复放大,形成脉冲激光。如果调制信号频率与腔长不匹配,就没有激光输出。锁模激光器对腔长非常敏感,甚至对于外界环境的影响,如温度、平台震动,都会大大影响输出。利用这种敏感性,构成一个多个传感器的网络,各传感通道有不同的腔长,用调制频率来选择腔长,可以实现多个传感器的有源复用。而且由于它的波长可大范围调节,非常适用于同时对多种气体的测量^[8,9]。

由于锁模光纤环形腔激光器本身的复杂性,目前还没有一个合适的模型进行说明激光脉冲输出强度与腔损耗的关系。下面的公式是参照光纤环形腔激光器的输出给出的一个很粗略的估计

$$I_{\text{peak}} \propto k\eta \cdot (P_p - P_p^{\text{th}}) \quad (1)$$

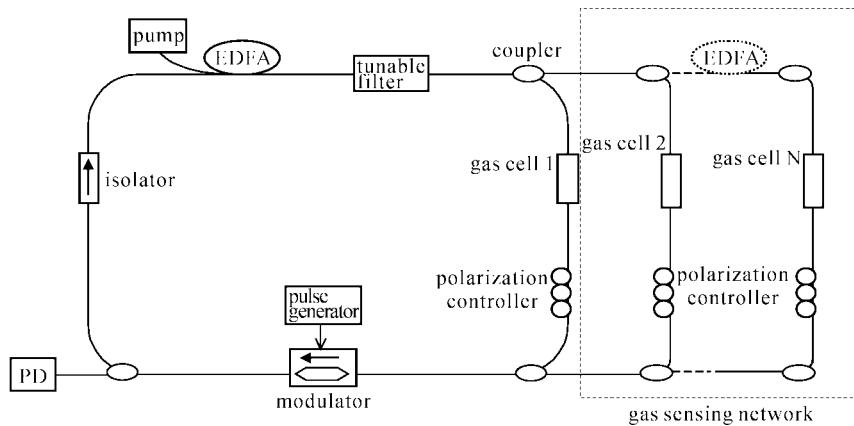


图1 锁模光纤激光器复用的光纤气体内腔激光传感网络系统

EDFA: 掺铒光纤放大器; PD: 光探测器

Fig. 1 Schematic diagram of the sensing network using a mode-locked fiber ring laser

EDFA: Er-doped fibre amplifier; PD: photo-detector

脉冲发生器产生频率为 f_i 的较窄的方波脉冲

$$f_i = N_i \frac{c}{nL_i} \quad (2)$$

式中, L_i 为某个传感器所在通道的腔长, c/n 为光在光纤中的传播速度, N_i 为调制纵模的谐波数, 一般用基频, $N_i = 1$ 。当某个频率与对应腔长互相匹配时, 就会起振产生激光, 而通过别的通道过来的光由于强度调制器的作用被衰减, 使得输出信号中只有此通道的传感器信息。输出信号的大小与传感器中

其中 P_p 为抽运强度, η 为斜率效率, P_p^{th} 表示激光器的抽运阈值功率, k 表示由于锁模效应而产生的光强增加, 它与纵模数量直接相关。当腔内损耗减小时, 斜率效率 η 将会增加, 而抽运阈值功率 P_p^{th} 则会降低。引用环形腔激光器的激光强度模型, 可对锁模光纤激光器有一个简单的理论认识^[10,11]。实际用锁模光纤激光器进行光纤内腔激光吸收测量时, 应该根据实际系统用测量数据进行定标。

3 原理及实验

3.1 系统的构成

图1给出了一个利用锁模光纤激光器进行多点光纤内腔激光气体传感测量的实验原理图。其中, 实验中用两个传感器, 构成了两个腔。由于LiNbO₃强度调制器是一个偏振相关的器件, 因此在每个传感器前面加上了光纤偏振控制器, 使得信号偏振态与调制器相匹配。

气体吸收相关。

实验中EDFA的最大抽运功率为70 mW(抽运电流160 mA), 强度调制器最大消光比为30 dB。可调滤波器的线宽为14 GHz, 可调范围30 nm。两传感腔的长度分别为174.8 m和271.2 m, 对应的调制器调制频率为 $f_1 = 1143.9$ kHz和 $f_2 = 737.5$ kHz。强度调制信号由高精度方波发生器输出, 频率稳定度为0.01%, 调制步长为100 Hz, 基本满足系统的需要。

采用 2.5 cm 的气体传感单元,在其中通过插入 0.2 mm 厚的盖玻片进行腔损耗的控制测量,0.2 mm 的盖玻片的损耗主要来自前后表面各 4% 的反射损耗,单个盖玻片的插入损耗为 0.35 dB。

3.2 实验结果

首先只用一个传感腔(传感器 2)进行锁模光纤激光器的内腔激光吸收实验,另一个腔断开。图 2 表示单个环形腔时调制频率的腔长选择特性。在调制频率 $f_2 = 737.5$ kHz 处,信号输出强度最大。3 dB 频谱宽度为 5 kHz。可以发现除了基频 f_2 和倍频 $2f_2$ 外,在 $0.5f_2$ 和 $1.5f_2$ 处也有信号产生,这是因为此时的强度调制器没有在最佳工作点,消光比只有 15 dB,此时 $0.5f_2$ 信号每通过腔两次也能得到只有 15 dB 的损耗,比增益要小,所以也有一定的放大。当调节消光比到 30 dB 时,这些旁瓣就会消失。

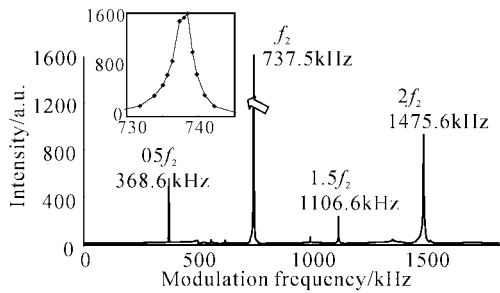


图 2 单个环形腔的锁模激光器的调制频率的腔长选择作用

Fig. 2 Laser output at different modulation frequencies for a single ring cavity system

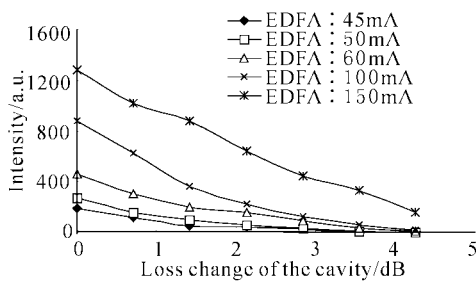


图 3 单个环形腔激光输出与内腔损耗的关系

Fig. 3 Laser output for different losses and pump power (single ring cavity system)

图 3 表示单个环形腔在不同抽运功率下,锁模信号的输出与内腔损耗的关系,损耗越小,输出信号越大,抽运功率越大,信号越强。在抽运光功率一定时,通过测量输出信号强度的变化,就可以计算出腔内损耗的变化。

图 4 所示为在两个腔都接入的情况下,改变调

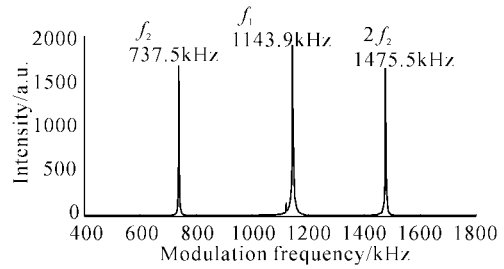


图 4 双腔系统中调制频率的腔选择作用

Fig. 4 Laser output at different modulation frequencies in a two-cavity system

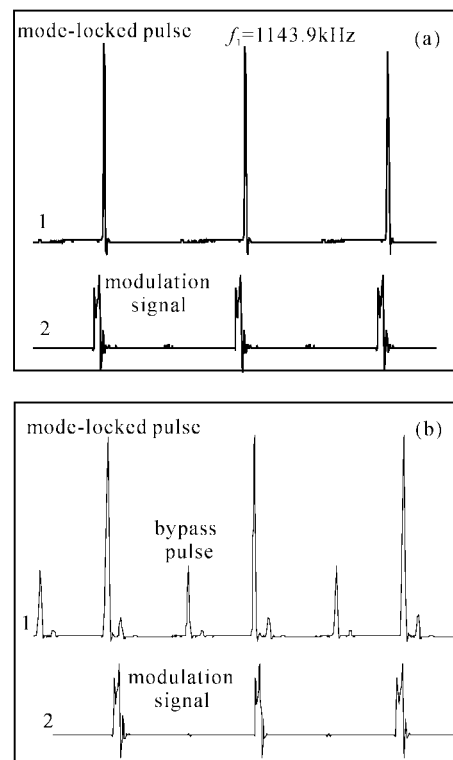


图 5 锁模信号输出

消光比: (a) 30 dB; (b) 15 dB

Fig. 5 Laser output versus time

the extinction of the modulator: (a) 30 dB; (b) 15 dB

制频率,可以选择特定腔长的环形腔。当调制器调制频率为 $f_2 = 737.5$ kHz 时,传感腔长为 271.2 m 的环形腔起振,产生激光输出。当调制器调制频率为 $f_1 = 1143.9$ kHz 时,传感腔长为 174.8 m 的腔符合锁模激光产生条件,有脉冲激光信号输出。可以看到,频率高(腔长短)的腔输出信号更强。这是因为两个腔的损耗不一样,其中短腔的损耗比长腔的损耗要小 2.5 dB。图 4 中强度调制器的消光比为 30 dB。

图 5 分别显示了示波器中观察到的锁模脉冲信

号受强度调制器消光比变化的影响,其中信号 1 为锁模脉冲信号,信号 2 为调制信号。当某个环形腔产生锁模脉冲时,一部分光信号总在腔内传输,它们每次通过强度调制器时,正好“门”打开,几乎不被衰减就可以通过,进入探测器后,输出所要求的锁模脉冲。与此同时,也有一部分光信号可以通过耦合器,在腔外传输一段距离再进入腔内。一般说来,由于这部分的光通过的路径不同,当它们到达强度调制器时,“门”已经关上了,被强烈地衰减,不能被探测器检测到。但是,当强度调制器的消光比不够大时,这部分光就会“漏出”一些,进入探测器,产生锁模脉冲的旁路输出。这部分“漏出”的光信号一方面产生不必要的输出,另一方面它的强度被腔外的传感器或干扰所调制,进入光纤放大器后,使光纤放大器的增益发生变化,最终会影响正常的锁模信号强度,使测量结果增加了额外的串扰噪声。采用消光比足够高的强度调制器可以大大减少这种噪声影响(见图 5(a))。

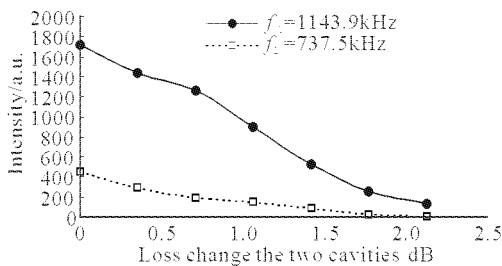


图 6 传感器 2 对传感器 1 的串扰

Fig. 6 Crosstalk characteristics for a two-cavity system

图 6 为两个传感器之间的串扰。当传感器 2 的损耗变化到 6 dB 时,传感器 1 的测量信号没有明显变化,只有由于激光噪声信号引起的随机起伏。因此传感器 2 对传感器 1 的串扰低于 20 dB。

3.3 传感器的复用数量分析

对于传感网络系统,比较关心的是到底能复用多少个传感器。一般来说,随着复用传感器数目的增加,各个传感器得到的光信号强度将会降低,各种噪声和串扰也会增加,直接影响系统性能。因此不同的传感器,不同的复用技术,能够复用的传感器数目也各不相同。对本系统,我们着重分析限制传感器数目的两个主要因素:一是频谱资源限制;二是腔内损耗的容限。

每个传感器(对应于不同的腔长)响应不同频率的调制信号,并且占用一定的频带宽度。而且由于光、电器件性能以及系统结构的限制,调制信号频率

也不能无限提高,因此有限频谱资源将会限制复用传感器的数量。对于我们的实验系统,前面测量发现,一个传感器占用的频谱半宽度为 5 kHz,假设给每个传感器 10 kHz 的频带,对于最大频率为 1143 kHz 的系统,可以复用 $1143.9 \text{ kHz} / (2 \times 10 \text{ kHz}) = 57$ 个传感器,也就是从频谱资源的占用角度来说,传感腔长 174.8~349.6 m 范围内可能容纳 57 个传感器而互不干扰。

对于本文提出的复用系统,正常工作的一个很重要的条件是:对于每个腔,在强度调制器(光开关)的“门”打开时,腔内的增益应该大于损耗。一般 EDFA 的增益可以到 30 dB,而系统中公共部分的光器件如光隔离器、滤波器、强度调制器以及取出信号到探测器的耦合器在腔内的总损耗不会超过 10 dB,因此传感器网络分配信号后,每个腔的信号分配及传感部分衰减不能大于 20 dB。采用特定分光比的光纤分路器可以使各个腔分配的能量相等^[12],对于 N 个传感器的系统,每个传感器通道最后的输出信号功率比输入信号小 $20 \log N$ (dB)。因此,对于采用单个最大增益为 30 dB 的 EDFA,公共部分损耗小于 10 dB 的复用系统,最多可以复用 10 个传感器。对于腔内损耗的容限,可以通过增加增益的方法来弥补,甚至可以采用多个 EDFA 连用以增加信号强度。一般来说,多用一个 EDFA 应该可以增加大约 10 个传感器复用。当然,EDFA 的 ASE 噪声最终会限制系统的复用数量。

4 结 论

提出并实现了一套以锁模光纤环形腔激光器为复用基础的光纤内腔激光气体传感网络系统,完成了此传感网络系统的基本实验。实验结果表明,利用锁模光纤环形腔激光器构成的光纤内腔激光气体吸收传感网络系统可以用来测量多个传感器中气体微弱吸收信号,对于每个 EDFA,复用数理论上可以达到 10 个,而且输出信号强,检测简单,是一种与以前的无源复用系统原理不同的有源复用技术。

参 考 文 献

- Andrew Wastson. Inside story [J]. *New Scientist*, 1998, (4):38~41
- A. Kachanov, A. Charvat, F. Stoeckel. Intracavity laser spectroscopy with vibronic solid state lasers. I. Spectrotemporal transient behavior of a Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Soc. Am. B*, 1994, 11(12):2412~2421

- 3 Juan, Hernandez-Cordero, T. F. Morse. Gas sensors based on fiber laser intro-cavity spectroscopy (FLICS) [R]. IEOCE Trans. Electron, **E83-C(3)**:371~376
- 4 G. Stewart, K. Atherton, H. Yu *et al.*. Investigation of Optical Fibre Amplifier Loop for Intracavity and Ring Down Cavity Loss Measurements [R]. Proceedings of OFS 2000, 14th International Conference on Optical Fibre Sensors, 11~13 October 2000, Venice, Italy
- 5 R. Böhm, A. Stephani, V. M. Baev *et al.*. Intracavity absorption spectroscopy with a Nd³⁺-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18(22)**:1955~1957
- 6 G. Stewart, C. Tandy, D. Moodie *et al.*. Design of a fibre optic multi-point sensor for gas detection [J]. *Sensors & Actuators B*, 1998, **51(1~3)**:25~37, 227~232
- 7 Wei Jin. Performance analysis of a time-division-multiplexed fiber-optic gas-sensor array by wavelength modulation of a distributed-feedback laser [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38(25)**:5290~5297
- 8 Li Yuhua, Lou Caiyun, Liu Jun *et al.*. Beat signal feedback mode-locked fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25(3)**:213~216 (in Chinese)
- 9 J. S. Wey, J. Goldhar, D. W. Rush *et al.*. Performance characterization of a harmonically mode-locked erbium fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7(2)**:152~154
- 10 Th. Pfeiffer, H. Schmuck, H. Bulow. Output power characteristics of erbium-doped fiber ring lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4(8)**:847~849
- 11 A. E. Siegman. Lasers [M]. California: University Science Books, 1986. 1041~1103
- 12 J. L. Brooks, B. Moslehi, B. Y. Kim *et al.*. Time-domain addressing of remote fiber-optic interferometric sensor arrays [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **LT-5(7)**:1014~1023

国产化的掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器研制成功

掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器可提供波长在 1 μm 附近的大功率激光输出,在 Raman 放大器、空间光通讯、工业加工等诸多领域具有重要的应用前景。我们采用自行研制的、内包层截面为 D 形和矩形的掺 Yb³⁺ 双包层光纤和国产的抽运光源、能量耦合系统,制成了全国产化的双包层光纤激光器。

以 MCVD 工艺加溶液掺杂技术成功研制出高质量的 D 形和矩形掺 Yb³⁺ 石英双包层光纤,主要技术参数如下:D 形光纤内包层直径 400 μm,直边长约 260 μm;矩形内包层尺寸为 350 μm×175 μm。两种光纤内包层的数值孔径~0.36,双层光固化保护层,外径 570 μm,纤芯中 Yb³⁺ 掺杂浓度~0.2 wt.-%。

实验装置采用典型的 F-P 腔结构。抽运光源为尾纤输出的半导体激光器(LD),输出的近场光斑直径为 580 μm,数值孔径为 0.22,中心波长为 976 nm;设计制作了非球面透镜组构成的能量耦合系统;选用光纤的长度均为 30 m;抽运光经过前腔镜(976 nm, T=90%;1060~1100 nm, R~99%)进入光纤内包层,前腔镜与后腔镜(976 nm, R=98.6%;1060~1100 nm, T~80%)构成 F-P 腔结

构。观察了光纤激光器的输出光谱,并测量了输出功率与注入功率的变化关系。

对上述实验装置的测量数据如下:D 形双包层光纤激光器在 1080 nm 波长下的输出>1.8 W,矩形双包层光纤激光器在 1093 nm 波长下的输出>1.5 W,两者的斜率效率均达到 50%以上,光谱中几乎没有剩余的抽运光。由此可见,D 形与矩形光纤在抽运光的转换效率上具有非常优越的特性,我们正进一步提高抽运光向光纤内包层的耦合效率,预期光纤激光器的输出功率会有大幅度提高。这种输出功率达瓦量级的双包层光纤激光器,由于全部采用国产化的器件,成本大大降低,具有很高的实用价值。

¹ 中国电子科技集团公司第 46 研究所,
天津 300220
² 南开大学光子技术中心,天津 300071
宁 鼎¹, 项 阳², 许兆文², 范万德²,
衣永青¹, 袁树忠², 董孝义²
收稿日期:2002-12-02