

# 基于激光瞬态特性的气体浓度光纤传感器<sup>\*</sup>

郭文刚<sup>1)2)</sup> 杨秀峰<sup>2)</sup> 罗绍均<sup>1)2)</sup> 李勇男<sup>1)</sup> 涂成厚<sup>1)</sup>

吕福云<sup>1)†</sup> 王宏杰<sup>1)</sup> 李恩邦<sup>3)</sup> 吕超<sup>2)</sup>

1) 南开大学物理科学学院光电信息科学系, 天津 300071)

2) Lightwave department, Institute for Infocomm Research, Singapore 637723)

3) 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

(2006 年 3 月 28 日收到, 2006 年 6 月 1 日收到修改稿)

报道了一种基于掺铒光纤激光器瞬态特性的新型气体浓度传感器. 用光纤环全反镜和光纤 Bragg 光栅(FBG)构成 F-P 线形腔, 通过调节光栅的反射波长, 使激光激射波长落在  $C_2H_2$  的一个较强的吸收峰 1531.56 nm. 激光激射延迟时间与激光器谐振腔损耗密切相关, 气体浓度的改变将引起谐振腔损耗的改变, 通过测量激光激射延迟时间可以获得气体的浓度. 该装置分辨率及灵敏度由抽运光脉冲的高功率电平和低功率电平决定, 传感器的动态测量范围由抽运光高功率电平决定. 当高功率和低功率电平分别为 25 mW 和 5.9 mW 时, 该传感器的灵敏度和分辨率分别为 100 ppm/ $\mu$ s 和 20 ppm.

关键词: 光纤传感, 瞬态特性, 激射延迟时间, 气体浓度

PACC: 4281P, 4281D

## 1. 引 言

气体浓度检测在工业生产和环境监测中是十分重要的, 尤其是可燃气体的检测, 在工业安全生产中更是占有相当重要的地位. 到目前为止, 基于光谱吸收的气体测量技术的检测灵敏度已经达到了相当高的水平. 实现这种高灵敏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)<sup>[1,2]</sup>. 高检测灵敏度的实现是利用光调制和二次谐波测量来获得, 一般可达 ppm( $10^{-6}$ )量级. 这类传感技术随着各种光通信器件诸如分布反馈(DFB)激光器、可调谐窄带激光器和可调谐梳状滤波器等的发展, 已经在光纤化和实用化方面取得了长足的进步, 并向工程实用化方向发展<sup>[3-7]</sup>. 另一类是利用各种内腔的光谱检测技术, 使光多次通过被测气体, 从而极大地增加了光与气体的有效作用距离, 测量分辨率一般能达到 ppt( $10^{-9}$ ). 内腔气体测量技术有两种基本类型: Ring-down 腔光谱检测

技术<sup>[8-10]</sup>和有源内腔激光光谱检测技术<sup>[11,12]</sup>. 这是目前测量灵敏度最高的光谱吸收检测手段, 但这种测量技术对系统性能的要求极其严格, 尚处于实验研究阶段, 离实用化还有一定的距离.

光纤气体传感技术具有使用安全、受环境影响小、易于成网和适合于远距离测量等优点, 在工业、军事和科研等领域受到越来越多的重视, 从而衍生出许多把气体吸收谱分析技术和光纤传感技术相结合的新颖实用的气体传感技术.

本文报道一种基于掺铒光纤激光器瞬态特性的气体浓度传感器及其传感解调新方法. 腔中插入  $C_2H_2$  气体吸收室, 不同浓度的气体引起不同的腔损耗, 这影响了激光器的瞬态特性, 我们可以通过测量激光激射延迟时间获得被测气体的浓度. 时域测量使得信号检测变得简单、精确. 测量信号为激光, 具有高的信噪比. 这种新型传感器的分辨率和灵敏度由控制抽运脉冲的高、低电平共同决定. 动态测量范围由抽运光高功率电平决定. 在抽运脉冲高、低功率分别为 25 mW, 5.9 mW 时, 传感器的灵敏度和分辨

\* 光电信息技术科学教育部重点实验室(南开大学、天津大学), 国家 973 计划项目(批准号: 2003CB314906), 国家自然科学基金(批准号: 60677013)和高等学校博士点基金(批准号: 20060055021)资助的课题.

† E-mail: lufy@nankai.edu.cn

率分别为 100 ppm/ $\mu\text{s}$  和 20 ppm.

## 2. C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体吸收光谱的测量

可调谐激光器 (agilent lightwave measurement system, 8164B) 作光源, 激光单次通过样品吸收室, 用光功率计测量不同波长的光对应的传输损耗. 可调谐激光器最大扫描范围 1495 nm—1610 nm, 最小扫描步长 0.005 nm. 样品吸收室连接 N<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 阀门和真空泵, 两种气体的比例可以控制以获得不同的气体浓度, 吸收室中光与气体的有效作用长度为 9.8 cm. 该测量系统可自动记录数据和扫描图形结果, 并且可以直接给出光谱带宽和相对光强度.

已知 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 一个较强的吸收谱位于 1530 nm 附近, 而 N<sub>2</sub> 在这个波段没有吸收峰, 所以设定扫描范围为 1522 nm—1542 nm. 图 1 给出了 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 在 1530 nm 附近的吸收谱, 所用气体浓度为 677 ppm, 从图中可以清楚地看到, 1530 nm 附近有很多精细吸收谱线, 在 1530.38 nm 和 1531.56 nm 处吸收最强. 通过精细测量, 得到在 1531.56 nm 处吸收谱半峰全宽为 0.05 nm.

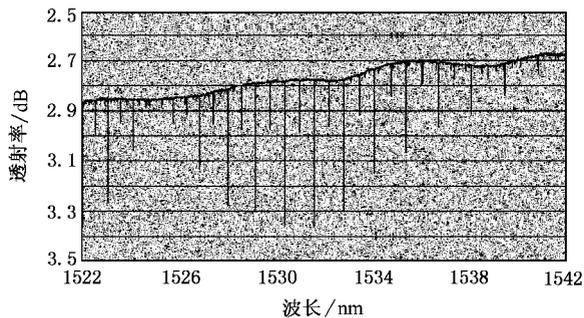


图 1 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 在 1.53  $\mu\text{m}$  附近的吸收谱

## 3. 实验装置及原理

气体浓度传感器的实验装置如图 2 所示. 由光纤环反射镜和带有温度补偿的光纤 Bragg 光栅 (FBG) 组成 F-P 激光谐振腔. FBG 的反射率为 75%, 不受力时 Bragg 反射波长为 1531.52 nm, 对 FBG 施加纵向应力, 并用光谱仪 (OSA) 监测激光激射波长, 使激光器的工作波长落在 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 的吸收峰 1531.56 nm. 增益介质为 3.5 m 长的掺铒光纤, 掺杂浓度为 300 ppm, 数值孔径为 0.23. 腔中插入了 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体吸收室 (带有准直和光纤尾纤), 气室内真空度约为 10<sup>-1</sup> Pa 时, 测得其插入损耗为 2.74 dB. 采用方波调制 980 nm LD 的注入电流, 并通过波分复用器 (WDM) 抽运掺铒光纤.

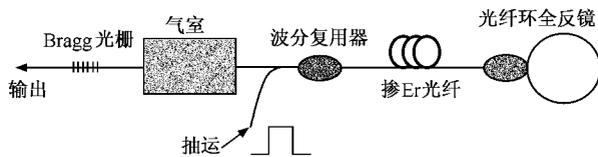


图 2 腔中插入吸收室的传感器装置图

气体浓度传感器的工作原理是基于激光器的瞬态特性. 关于掺铒光纤激光器瞬态特性的研究已有报道<sup>[13, 14]</sup>, 当抽运光功率大于激光阈值时, 谐振腔内会出现弛豫振荡. 弛豫延迟时间  $T_b$  定义为从抽运光注入到产生第一个振荡脉冲的时间, 也就是腔内达到产生激光的粒子数反转所需要的时间. Sola 等从速率方程出发, 利用小信号微扰的近似方法推导出  $T_b$  的表达式<sup>[15]</sup>

$$T_b = - \frac{\ln \left[ 1 + \frac{(\ln T) - \gamma_a(\nu_l)L}{P_p \gamma_a(\nu_p) \gamma_a(\nu_l) + \gamma_c(\nu_l)L} \left\{ P_p (\gamma_a(\nu_p) + \gamma_c(\nu_p)) + \frac{h\nu_p N_T}{\tau} \right\} \right]}{P_p \frac{(\gamma_a(\nu_p) + \gamma_c(\nu_p))}{h\nu_p N_T} + \frac{1}{\tau}}, \quad (1)$$

式中  $T$  为腔内单程传播系数,  $P_p$  为抽运功率;  $h$  为普朗克常数,  $L$  为铒纤长度;  $N_T$  为增益介质的总掺杂浓度,  $\tau$  为粒子在激光上能级的寿命;  $\gamma_a(\nu)$  和  $\gamma_c(\nu)$  分别表示激活介质的吸收和发射系数, 与抽运光的频率  $\nu_p$  和激光的频率  $\nu_l$  有关. 不难看出, 延时  $T_b$  与激活介质增益特性、抽运功率和腔损耗相

关. 当抽运功率一定, 在 1531.56 nm  $\pm$  0.05 nm 很窄的谱宽内, 激光增益可以认为是一个确定值. 从 (1) 式中可以看出,  $T_b$  将随腔损耗的增大而增大. 腔损耗包含固有损耗 (气室插入损耗、腔镜损耗、铒光纤对激射波长吸收、焊点损耗等) 和气室内的气体相关损耗. 气体浓度的改变将引起激光激射延迟  $T_b$  的

变化.也就是说,合理标定后,通过测量激光喷射延迟  $T_b$  就可以获得待测气体的浓度.

实验中,抽运光以脉冲方式注入腔内,频率为 10 Hz,使用如此低的频率是为了使上一个脉冲产生激光时,跃迁到高能态的钕离子有充足的时间在下一个抽运脉冲到来前充分回到低能态,以便更好地获得掺钕光纤激光器的瞬态特性.抽运脉冲的高、低功率电平均可调,让低功率电平始终低于激光器的抽运阈值功率,高功率电平始终高于激光器的阈值.图 3 是从示波器上观察到的一个瞬态实例,处于上方的曲线为抽运光信号,下方的曲线是输出的激光信号.

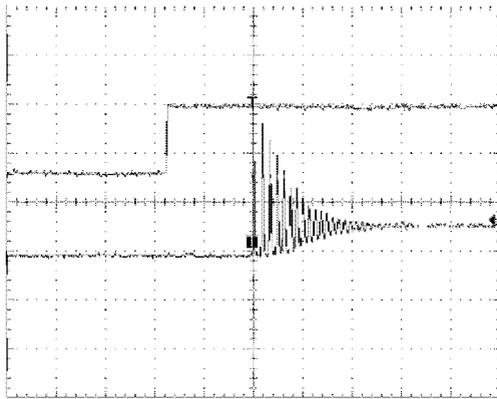


图 3 示波器上观测到的激光瞬态特性

光通过气体吸收室时,对应气体吸收峰波长的光将产生衰减,其衰减度与气体浓度和作用距离有关.由于激光腔内插入了气体吸收室,气体浓度的变化将会引起腔损耗的变化,进而影响激光器的瞬态特性.随着气体浓度的增大,产生激光的延迟时间也将变长.因此,可以通过测量产生激光的延迟时间,获得待测气体  $C_2H_2$  的浓度.

### 4. 实验结果

我们研究了影响该传感器灵敏度的因素.实验发现,抽运脉冲高、低电平功率设置对传感器的灵敏度有较大影响.图 4 表示高电平功率( $P_h$ )固定为 35 mW 不同低电平功率( $P_l$ )情况下激光延迟变化量  $\Delta T_b$  随气体浓度的变化情况. $P_l$  的作用是补偿固有腔损耗. $P_l$  小,也就是欠补偿状态,气体浓度引入的相对损耗较小,系统灵敏度较低;升高  $P_l$ ,使固有

腔损耗得到补偿时,从图 4 可以看出,激光喷射延迟时间对气体浓度引起腔损耗的变化较敏感,即提高了传感器的灵敏度.

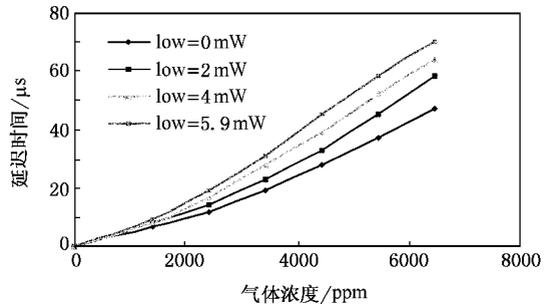


图 4 激光延迟时间变化量与气体浓度的关系(此时抽运脉冲高电平功率为 35 mW)

当  $P_l$  固定为 5.9 mW 时,抽运脉冲  $P_h$  对激光延迟变化量  $\Delta T_b$  随气体浓度变化的关系如图 5 所示.从图中可以看出,抽运脉冲  $P_h$  越小,传感器的灵敏度越高.这是因为在同样的腔损耗条件下,抽运功率越小,产生激光的延迟时间越长.所以  $P_h$  越小,传感器的灵敏度越高.需要指出,抽运高电平功率的大小同时影响传感器的测量范围.当  $C_2H_2$  浓度增加时,腔损耗将增大,这使激光器的阈值增加,抽运脉冲  $P_h$  也需要相应增加.

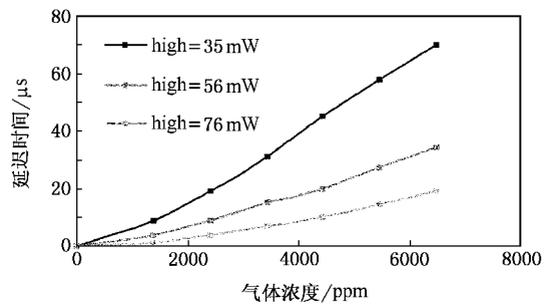


图 5 激光延迟时间变化量与气体浓度的关系(此时抽运脉冲低电平功率为 5.9 mW)

综合分析图 4 和图 5 的实验结果可知,在保证传感器的测量范围条件下,为了使系统获得较高的灵敏度,要仔细地调节抽运脉冲的高、低电平功率.当抽运  $P_l$  接近阈值时, $P_h$  越小,传感器的灵敏度越高.基于以上原则,本实验中将抽运脉冲设定  $P_l$  为 5.9 mW, $P_h$  为 25 mW,改变气体浓度,测得  $\Delta T_b$  随气体浓度的变化如图 6 所示.该传感器的平均灵敏度可达 100ppm/ $\mu s$ .传感系统可以测量的时间误差

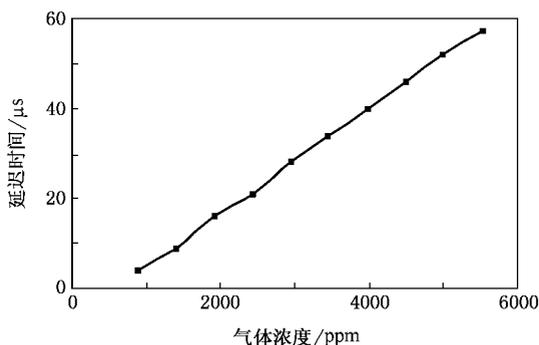


图 6 激光延迟时间变化量与气体浓度的关系

为  $0.1 \mu\text{s}$  输出信号不稳定性小于  $0.2 \mu\text{s}$ , 传感器分辨率为 20 ppm.

## 5. 结 论

基于掺铒光纤激光器的瞬态特性,设计了一种新型气体浓度传感器.传感器是在激光谐振腔内直接插入气体吸收室,气体浓度不同,腔内的损耗就不相同,进而引起激光激射延迟时间的变化.通过测量产生激光的延迟时间可以得出气体的浓度.传感器的灵敏度和分辨率可以通过抽运脉冲的高、低电平功率来调节.高电平功率越低,低电平功率越接近阈值,传感器的灵敏度越高.高电平功率还影响着传感器的测量范围.当高功率和低功率电平分别为 25 mW 和 5.9 mW 时,该传感器的灵敏度和分辨率分别为  $100 \text{ ppm}/\mu\text{s}$  和 20 ppm.传感系统工作稳定.

- [ 1 ] Cassidy D T, Reid J 1982 *Appl. Opt.* **21** 1185
- [ 2 ] Jin W, Liao Y B, Zhang Z P et al 1998 *Guided-wave optical sensor: theory and technology* ( Beijing: Science Press ) p273 ( in Chinese ) [ 靳 伟、廖延彪、张志鹏等 1998 导波光学传感器:原理与技术(北京:科学出版社)第 273 页 ]
- [ 3 ] Dakin J P, Wade C A, Pinchbeck D, Wykes J S 1987 *Proc. SPIE* **734** 254
- [ 4 ] Tai H 1990 *Proceeding of OFSC* p51
- [ 5 ] Jin W, Stewart G, Culshaw B, Murray S 1995 *Appl. Opt.* **34** 2345
- [ 6 ] Feng X H, Liu Y G, Sun L, Yuan S Z, Kai G Y, Dong X Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 779
- [ 7 ] Ho H L, Jin W, Demokan M S 2000 *Electron. Lett.* **36** 1191
- [ 8 ] Keefe A O, Deacon D A G 1988 *Rev. Sci. Instrum.* **59** 2544
- [ 9 ] Scherer J J, Voelkel D, Rakestraw D J, Paul J B, Collier C P, Saykally R J, O'Keefe A 1995 *Chem. Phys. Lett.* **245** 273
- [ 10 ] Zhao H T, Liu X J, Cao J W, Peng L Y, Zhan M S 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1274 [ 赵宏太、柳晓军、曹俊文、彭良友、詹明生 2001 物理学报 **50** 1274 ]
- [ 11 ] Baev V M, Latz T, Toschek P E 1999 *Appl. Phys. B* **69** 171
- [ 12 ] Zhang Y, Zhang M, Jin W 2003 *Sensor & Actuator A-PHYS* **104** 183
- [ 13 ] Luo L G, Chu P L 1998 *Optics Communications* **149** 307
- [ 14 ] Rebolledo M A, Jarabo S 1994 *Appl. Opt.* **33** 5585
- [ 15 ] Sola I J, Martin J C, Alvarez J M, Jarabo S 2001 *Optics Communications* **193** 133

# A fiber sensor for measuring gas concentration based on laser 's transient regime<sup>\*</sup>

Guo Wen-Gang<sup>1)2)</sup> Yang Xiu-Feng<sup>2)</sup> Luo Shao-Jun<sup>1)2)</sup> Li Yong-Nan<sup>1)</sup> Tu Cheng-Hou<sup>1)</sup>

Lü Fu-Yun<sup>1)†</sup> Wang Hong-Jie<sup>1)</sup> Li En-Bang<sup>3)</sup> Lü Chao<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China*

<sup>2)</sup> *Lightwave Department, Institute for Infocomm Research 637723, Singapore*

<sup>3)</sup> *College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

( Received 28 March 2006 ; revised manuscript received 1 June 2006 )

## Abstract

A novel fiber sensor for measuring gas concentration is reported, which is based on the transient regime of a Er-doped fiber laser. A Sagnac fiber loop and a FBG that also acts as the sensing element form the linear fiber laser cavity. By adjusting the central wavelength of the grating mirror, the oscillating wavelength is set to 1531.56 nm, which is a strong absorption peak of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>. The gas concentration can be obtained by measuring the laser build-up time, which is closely related with the cavity loss and therefore determined by the gas concentration. In the present experiment, the sensor's sensitivity and resolution can be adjusted simply by controlling the pumping level. When the pump pulse is at high level and low level of 25 mW and 5.9 mW, respectively, a sensitivity of 100 ppm/ $\mu$ s and resolution of 20 ppm are achieved.

**Keywords** : fiber sensor, transient regime, laser build-up time, gas concentration

**PACC** : 4281P, 4281D

<sup>\*</sup> Project supported by the Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology ( Nankai University, Tianjin University ), the National Basic Research Program of China ( 973 project ) ( Grant No. 2003CB314906 ), the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60677013 ) and the Doctoral Program Foundation of Higher Education ( Grant No. 20060055021 ).

<sup>†</sup> E-mail : lufy@nankai.edu.cn