

文章编号: 0253-2239(2010)08-2262-05

基于空芯光子晶体光纤气体吸收腔的乙炔检测系统

崔俊红 丁 晖 李仙丽 董少飞

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要 介绍了一种基于空芯光子晶体光纤(HC-PCF)气体吸收腔的气体检测系统。采用 20 μm 芯径、40 cm 长的 HC-PCF 作为气体吸收腔,利用连接套管实现 HC-PCF 和单模光纤(SMF)的对接。连接套管上留有 50 μm 的缝隙,使环境气体可通过缝隙扩散进入 HC-PCF 吸收腔。结合可调谐光纤环形激光器构建了全光纤气体检测系统。光纤激光器输出的高功率、窄带宽探测光对待测气体具有很好的选择性,克服了传统检测方法中常见的交叉敏感现象。以乙炔气体为测量对象,对该系统测量性能进行实验验证。实验结果表明,在自然扩散条件下,乙炔气体在 HC-PCF 气体腔内的扩散时间约为 6 min,系统响应与乙炔气体体积分数近似呈线性关系,最低检测限为 0.1%。

关键词 空芯光子晶体光纤;光纤环形激光器;光纤光栅;气体检测

中图分类号 TH744 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2262

Acetylene Sensing System Using Hollow-Core Photonic Crystal Fiber as Gas Cell

Cui Junhong Ding Hui Li Xianli Dong Shaofei

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract A fiber gas sensing system using hollow-core photonic crystal fiber (HC-PCF) as gas cell is introduced. The gas cell is made by a HC-PCF with length of 40 cm and core diameter of 20 μm . The HC-PCF is connected with a single mode fiber (SMF) by a connector. There is a 50 μm gap on the connector, from which the environmental gas can diffuse into HC-PCF cell. Combining with wavelength tunable fiber ring laser technology, a compact and a real all-optical-fiber gas sensing system is proposed. Because of the characteristic of high power and narrow wavelength width of the probing light emitting from the fiber ring laser the system can detect gas with high sensing selectivity and thus the cross-effects usually encountered in the ordinary gas sensing method are reduced greatly. The properties of the system are demonstrated experimentally by detection of acetylene (C_2H_2). The experimental results demonstrate that the time for acetylene diffusing into the proposed HC-PCF gas chamber is proximately 6 min under natural free diffusion conditions. Approximate linear relation between the system responses and the acetylene volume fraction are experimentally demonstrated and the minimal detectable volume fraction of acetylene of 0.1% is also achieved by experiments.

Key words hollow-core photonic crystal fiber; fiber ring laser; fiber Bragg gratings; gas sensing

1 引 言

在光纤光谱吸收式气体检测系统中,气室的有效吸收光程是决定系统检测灵敏度的关键参数之一。根据光在气室中传播的路径不同,传统气室可

分为单光程气室^[1]和长光程气室。单光程气室通常由一对光纤准直器构成。但由于光纤准直器有限的工作距离(一般不超过 50 cm)使得气体的有效吸收光程通常较短,因此极大地限制了系统测试灵敏度。

收稿日期: 2009-09-29; 收到修改稿日期: 2009-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(60772016)资助课题。

作者简介: 崔俊红(1980—),女,硕士研究生,主要从事光纤激光器气体测量方面的研究。

E-mail: c. u. i. cui@stu. xjtu. edu. cn

导师简介: 丁 晖(1969—),女,博士,副教授,主要从事光纤传感技术、智能传感器系统等方面的研究。

E-mail: dinghui@mail. xjtu. edu. cn(通信联系人)

并且单光程气室通常体积较大,不利于工业现场的应用。长光程气室主要有怀特型气室^[2]、Herriott型气室^[3]和直角棱镜气室^[4]等。这类气室通过特殊的光路设计使得在气室内多次往复反射,从而增加了气体有效吸收光程。相比单光程气室,长光程气室的体积较小。但长光程气室的结构较复杂,调试困难,稳定性差。且由于光在气室内多次反射,会造成较大的光传输损耗。空芯光子晶体光纤(HC-PCF)是一种特殊的光纤,其纤芯为空气芯结构,包层由周期性排列的微气孔。这些气孔点阵构成光子晶体,光波被限制在空气芯形成的缺陷中传输^[5]。HC-PCF自问世以来,英国巴斯大学、莫斯科大学和美国罗彻斯特大学等研究机构在这方面相继开展了大量的研究工作^[6~10],HC-PCF具有损耗低、色散小和非线性效应低等特性,在光通信、飞秒激光、光纤传感^[11,12]等领域有着广阔的发展前景。

本文基于HC-PCF内部特殊的气孔纤芯结构,通过环境气体对HC-PCF内部的扩散作用,使得探测光与待测气体在HC-PCF内发生相互作用,从而构建出一种新型气体吸收气室。相比传统气室,HC-PCF气室去除了传统气室中的光学准直器或高反射镜等光学器件,不仅有助于降低光路噪声,同时具有体积小、重量轻、易缠绕和易延长气体有效吸收路径等显著优点。本文介绍了HC-PCF气室结构,并结合光纤激光技术构建了一种全光纤光谱吸收型气体检测系统。以乙炔为实验对象,对HC-PCF气室的扩散速度及整个系统的测试灵敏度进行了实验验证。

2 系统结构与测试原理

2.1 HC-PCF 吸收气室结构

采用HC-PCF作为气体吸收气室时,由于HC-PCF的纤芯为空气芯且直径大小与普通光纤不同,因此在与系统中的普通石英光纤相接时,存在连接损耗。为降低连接损耗,同时为环境气体向HC-PCF内部扩散提供通道,研究设计了图1所示的HC-PCF气室结构。探测光由单模光纤(SMF)进入HC-PCF,HC-PCF的输出光进入多模光纤(MMF),多模光纤的输出送入探测器。系统所采用的HC-PCF为英国Thorlabs公司生产的HC19-1550型空芯光子晶体光纤,长度为40 cm,其横截面结构如图2所示。

HC19-1550的中心空气芯直径为 $20\ \mu\text{m}$,包层小孔的中心距离为 $3.9\ \mu\text{m}$,多孔区域直径为 $73\ \mu\text{m}$,其带宽在 $1530\sim 1610\ \text{nm}$ 范围内损耗小于

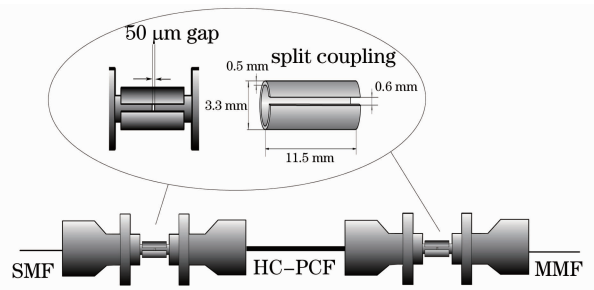


图1 HC-PCF气室结构

Fig.1 Structure of HC-PCF gas cell

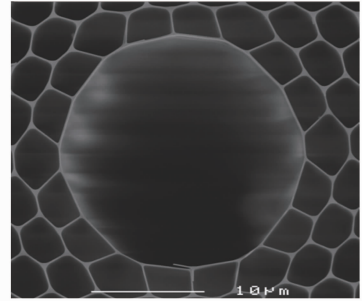


图2 HC-PCF结构

Fig.2 Structure of HC-PCF

$20\ \text{dB/km}$ 。因其纤芯直径大于单模光纤的纤芯直径,又小于多模光纤的纤芯直径,因此探测光由单模光纤传输到HC-PCF,再进入多模光纤,可保证光在整个传输过程中的低损耗。利用裸纤适配器的光纤接头部分和一个开口套管,分别将单模光纤和HC-PCF,及HC-PCF和多模光纤对接起来。为方便气体扩散,套管留有约 $50\ \mu\text{m}$ 的透气缝隙。开口套管不仅起到对光纤的对接、固定作用,同时套管上的开口为气体扩散提供了通道。通过实验测定,整个气室的光传输损耗约为 $1.5\ \text{dB}$ 。

2.2 全光纤气体测量系统结构及测试原理

大量的理论和实践已表明,在光谱吸收型光纤气体检测系统中,当探测光的波长范围越窄,功率越高,系统对气体的检测灵敏度就越高。并且当探测光波长宽度与待测气体单个吸收线宽度相当时,系统对不同气体具有很好的测量选择性,从而能够克服由于不同气体吸收光谱的重叠造成的系统对不同气体的交叉敏感效应^[13]。

采用HC-PCF吸收气室,结合光纤激光技术构成的全光纤气体检测系统结构如图3所示。

图3中的环形光纤激光器采用光纤布拉格光栅和可调谐光纤滤波器(TOF)共同作为选频器件。光纤布拉格光栅的中心波长为 $1530.20\ \text{nm}$ 。为克服光纤布拉格光栅中心波长随温度变化的影响,光纤布拉格光栅固定在一个恒温槽中,通过对恒温槽

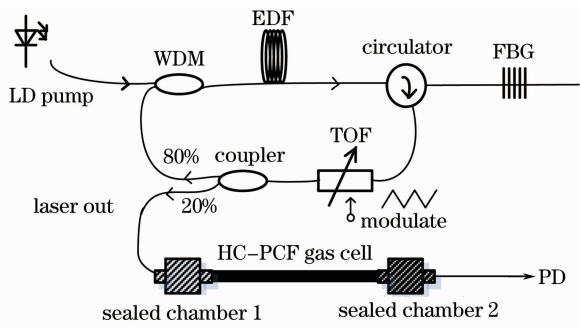


图 3 全光纤气体检测系统结构图

Fig. 3 Structure of all-fiber gas detection system

温度的控制调节,使光纤布拉格光栅中心波长准确稳定在待测乙炔气体的吸收峰处。环形腔内的可调谐光纤滤波器在三角波控制电压的作用下,当扫描波长与光纤布拉格光栅中心波长重合时,环腔会产生激光输出。该激光作为探测光经耦合器进入 HC-PCF 吸收腔。当环境气体扩散进入 HC-PCF 后,气体对探测光产生吸收作用。根据朗伯-比尔定律,通过检测探测光经过 HC-PCF 气室前后光谱的变化,可以检测出 HC-PCF 气室内的气体体积分数。

3 实验结果与分析

3.1 光纤环型腔输出激光光谱

采用安立公司 MS9710B 型光谱仪对图 3 中光纤环形激光器的输出光谱进行观测。激光器输出光谱带宽约为 0.05 nm,输出光功率约为 1 mW。噪声水平为 -50 dBm。考虑到乙炔气体吸收峰宽度约为 0.1 nm^[14],因此采用该激光器输出作为乙炔气体的探测光,将会很好地消除其它气体在乙炔测量过程中产生的交叉敏感,从而对待测乙炔气体具有较好的测量选择性。此外较大的探测光功率将极利于提高系统探测灵敏度。图 4 为光纤环形激光器在 1530.03 nm 输出激光光谱图。

3.2 乙炔体积分数测量实验

对 TOF 施加适当的三角波控制电压,当 TOF 输出光中心波长与光纤布拉格光栅中心波长相对准时,环形腔经耦合器有激光输出。这时探测器能够探测到激光光谱随待测乙炔体积分数的变化情况。

为方便实验室实验,将图 1 所示的 HC-PCF 气室的两个连接端分别放在一个密闭微型气室(见图 5)中。对其中一个微型气室依次分别注入不同体积分数的乙炔气体,由探测器探测到的 HC-PCF 输出光谱的变化如图 6 所示。由该图可以看出,随

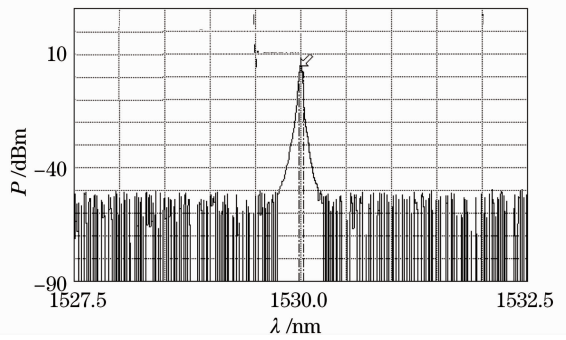


图 4 光纤环形激光器在 1530.03 nm 输出激光光谱图

Fig. 4 Spectrum of fiber ring laser output at 1530.03 nm

着乙炔体积分数的增加,系统响应波形的波谷处光强发生变化。为消除噪声的影响,以该处光强的平均变化作为系统响应,对不同输入体积分数的乙炔气体进行了实验标定,结果如图 7 所示。从该图中可以看出,系统响应与乙炔体积分数近似呈线性关系。根据最低检测限的定义^[15],当系统输入为空气时,对系统输出连续测量 15 次,计算其标准偏差为 $\sigma=0.06$ V,信噪比取 3 的情况下,系统最低检测限约为 0.1%。

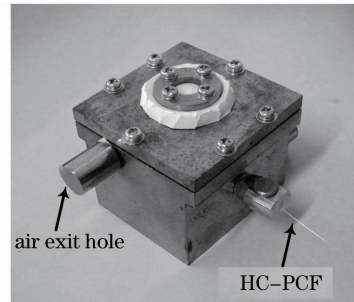


图 5 密闭微型气室

Fig. 5 Sealed minisized gas chamber

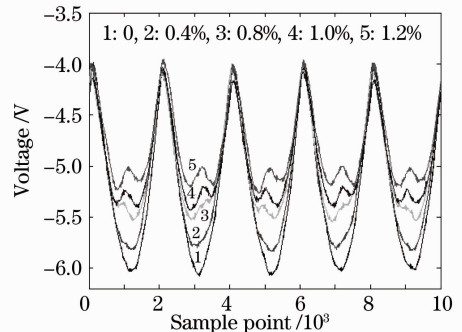


图 6 不同乙炔体积分数下系统响应曲线

Fig. 6 Response of system under different volume fractions of acetylene

由图 7 可以看到系统测量存在一定的误差。导致测量误差的主要原因是由于激光输出功率不稳,由此造成系统测量的不稳定性 and 测量误差。因此,

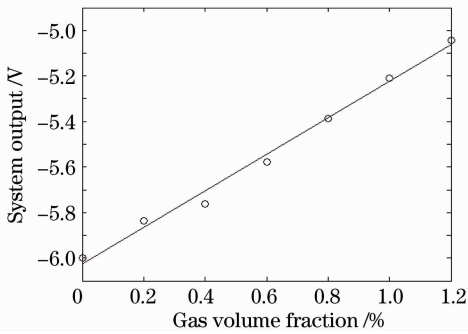


图 7 系统响应随乙炔体积分数变化的标定曲线

Fig. 7 Calibration curve of the system response to C_2H_2

研究采用高稳定输出光纤激光器,这是进一步提高测试灵敏度和准确度的有效途径。此外,波长调制技术的应用也是抑制系统噪声,提高测试灵敏度的途径。这是下一步的工作。影响系统测量准确度的另一个因素是吸附气体的存在。由于 HC-PCF 空气芯直径较小,导致排气时 HC-PCF 的空气芯内总有少量残留的吸附气体。为消除残留气体的影响。在每次实验前,当系统输入空气时,检测系统输出作为系统零值。在计算最终测量结果时减去该零值,以此来消除残留吸附气体对测量结果的影响。

3.3 气体在 HC-PCF 气室中扩散速度实验

给气室内分别注入不同体积分数的乙炔气体,记录系统响应随时间的变化规律,以此考察气体在 HC-PCF 腔内的扩散速度。结果如图 8 所示。由该图可以看出,乙炔自注入 HC-PCF 气室到扩散均匀,大约需 6 min。

显然,通过延长 HC-PCF 的长度,可增大气体吸收光程,从而达到提高系统灵敏度的目的。但增加 HC-PCF 长度的同时,会增大气体对在 HC-PCF 中的扩散时间。此时可通过在 HC-PCF 中段增加扩气孔(扩气孔的设置可类似于前述图 1 中的单模或多模与 HC-PCF 的连接方式)的方法来提

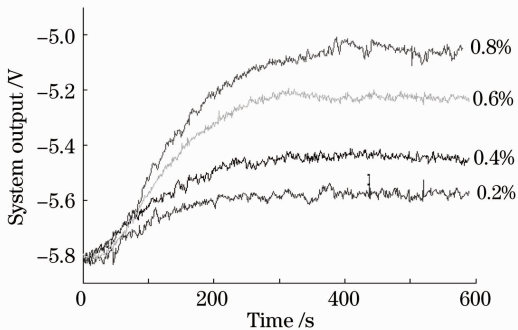


图 8 不同体积分数乙炔在 HC-PCF 气室中的扩散速度
Fig. 8 Diffusion speed of acetylene into HC-PCF gas cell with different volume fractions

速度,但由此会增加整个气室的光损耗。因此扩气孔数量与气室损耗之间应当有个合理选择。

4 结 论

采用 HC-PCF 构建了一种新型吸收气室。相比传统气室,具有体积小、重量轻和易延长吸收光程等特点。对气体在 HC-PCF 气室中的扩散速度进行了实验研究,表明乙炔气体在 40 cm 长,20 μm 芯径的 HC-PCF 气室中的扩散均匀的时间约为 6 min,基本可以满足实用要求。在此基础上,结合光纤激光技术构建了全光纤气体检测系统。以乙炔为实验对象,实验结果证明系统响应与乙炔气体体积分数的关系近似成线性关系,当信噪比取 3 时,最低检测限约为 0.1%。

参 考 文 献

- Ding Hui, Liang Jianqi, Xiong Zhihui. Double FBG system for acetylene sensing based on differential absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 548~551
- 丁 晖, 梁建奇, 熊志辉. 基于差分光谱吸收技术的双光纤光栅乙炔测量系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 548~551
- J. U. White. Long optical paths of large aperture[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1942, **32**(5): 285~287
- D. Herriott, H. Kogelnik, R. Kompfner. Off-axis paths in spherical mirror interferometers[J]. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(4): 523~526
- Xiao Shaorong, Chen Jinbang, Zhu Rihong *et al.*. Photometric measurement based on rectangular prism with optical fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1513~1517
- 肖韶荣, 陈进榜, 朱日宏 等. 基于直角棱镜的光纤光度传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1513~1517
- C. M. B. Cordeiro, E. M. dos Santos, C. H. Brito Cruz. Lateral access to the holes of photonic crystal fibers-selective filling and sensing applications. [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 8403~8412
- G. Humbert, J. C. Knight, G. Bouwmans *et al.*. Hollow core photonic crystal fibers for beam Delivery [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8): 1477~1484
- J. A. Harrington. A review of IR transmitting hollow waveguides [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2000, **19**(3): 211~227
- T. P. Hansen, J. Broeng, C. Jakobsen *et al.*. Air-guiding photonic bandgap fibers: spectral properties, macrobending loss and practical handling[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 11~15
- T. Murao, K. Saitoh. Realization of single-moded broadband air-guiding photonic bandgap fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(15): 1666~1668
- Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
- 王清月, 胡明列, 柴 路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- Y. L. Hoo, W. Jin, H. L. Ho *et al.*. Gas diffusion measurement using hollow-core photonic bandgap fiber [J]. *Sensors and Actuators B*, 2005, **105**(2): 183~186
- Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjian *et al.*. A miniature extrinsic

- Fabry-Pérot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 18~20
- 段德稳, 朱 涛, 饶云江 等. 基于空芯光子晶体光纤的微型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 18~20
- 13 Hui Ding, Jianqi Liang, Junhong Cui *et al.*. A novel fiber Fabry-Pérot filter based mixed-gas sensing system[J]. *Sensors and Actuators. B*, 2009, **138**(1): 154~159
- 14 Min Zhang, D. N. Wang, Wei Jin *et al.*. Wavelength modulation technique for intra-cavity absorption gas sensor[J]. *IEEE Tran. Instrumentation and Measurement*, 2004, **53**(1): 136~139
- 15 Jin Meilan, Zhou Yuehua. Discussion of the performance of gas chromatography [J]. *Measurement Techniuque*, 2007, (11): 51~52
- 金美兰, 周月华. 气相色谱仪检测性能指标的讨论 [J]. *计量技术*, 2007, (11): 51~52