

文章编号: 1001-3806(2017)05-0693-04

光子晶体光纤 CO₂ 气体传感器的研究

徐康, 吕淑媛*, 杨祎

(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710061)

摘要: 为了能高灵敏度地检测 CO₂ 气体的体积分数, 基于红外光谱吸收原理, 设计了一种以 9m 长的空芯光子晶体光纤作为传感单元的 CO₂ 气体传感器。利用该传感器测量了不同体积分数的 CO₂ 在同一吸收波长下的吸收光谱图。结果表明, 气体的吸收光强和气体的体积分数之间呈线性变化, 与比尔-朗伯定律一致; 传感器的灵敏度可达 4.389×10^{-5} W。可通过加长光子晶体光纤的长度, 来增加气体吸收的有效距离, 使传感系统获得较高灵敏度。

关键词: 传感器技术; 灵敏度; 红外光谱吸收; 光子晶体光纤

中图分类号: TP212.1⁺4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.05.015

Research of CO₂ gas sensors based on photonic crystal fiber

XU Kang, LÜ Shuyuan, YANG Yi

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to get high sensitivity detection of volume fraction of carbon dioxide gas, a carbon dioxide gas sensor based on the principle of infrared spectrum absorption was designed by using 9m hollow-core photonic crystal fiber as sensing unit. The absorption spectra of carbon dioxide gas with different volume fractions were measured under the same absorption wavelength. The analysis results show that the linear relationship between gas absorption intensity and volume fraction of gas is presented, in accordance with Beer-Lambert law. The detective sensitivity of the system is estimated to be 4.389×10^{-5} W. It can make the system get higher sensitivity by lengthening the photonic crystal fiber and increasing the effective distance of gas absorption.

Key words: sensor technique; sensitivity; infrared spectrum absorption; photonic crystal fiber

引言

气体传感检测技术广泛应用于生活、生产实践中, 对危险气体进行检测可以避免在工业生产过程中产生意外, 对大气中的气体检测可以更好地保护生态环境, 因此, 实现在线实时检测污染气体, 对于人类的生产和生活具有很重要的实际意义^[1]。

光纤气体传感技术是一种很有应用价值的检测技术^[2]。传统的气体光纤传感器有两个基本的限制: 一个是光纤的低损耗传输窗口的限制, 普通光纤的低损耗和低色散窗口在 $1.1 \mu\text{m} \sim 1.7 \mu\text{m}$ 的近红外区^[3,4]。若传感器的波长范围设定在中、远红外区, 光波会受到较大的损耗, 使通过待测气体后的光信号较弱, 不利于设备对光信号的测量。另一个限制是光纤数值孔径较小, 会产生大的耦合损耗, 增加系统附加损耗。空芯光

子晶体光纤 (hollow-core photonic crystal fiber, HC-PCF) 是一种微结构光纤, 其纤芯是一个比较大的空气孔, 包层由微小的气孔周期排列构成光子晶体, 光被限制在由纤芯造成的缺陷中传输^[5]。HC-PCF 自问世以来, 众多科研机构对其传输和传感特性相继展开了大量研究^[6-9]。与普通倏逝波光纤传感器相比, HC-PCF 作为传感单元应用于气体检测中, 具有耦合效率高、易于实现光波和气体更长距离充分接触的优点^[10]。因此, HC-PCF 在光纤传感领域有着极其广泛的发展空间^[11-14]。利用光子晶体光纤进行传感检测不仅克服了普通光纤有限传输窗口的限制, 而且增加 PCF 的长度能使传感系统的灵敏度得到较大的提升。本文中以 9m 长的光子晶体光纤用作吸收池构建检测系统来完成 CO₂ 气体体积分数的传感检测, 多次测量获得的结果表明, 此传感系统能检测出不同体积分数的 CO₂ 气体, 可以使系统灵敏度达到 4.389×10^{-5} W, 比参考文献 [15] 中使用 30cm 长的光子晶体光纤搭建的系统在测量同一种气体时的灵敏度高出 10 倍。

1 系统检测原理

基金项目: 西安市科技局科技计划资助项目 (CX1128)

作者简介: 徐康 (1992-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光电传感、测量与检测的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 1159955131@qq.com

收稿日期: 2016-11-07; 收到修改稿日期: 2016-12-22

1.1 红外光吸收理论

红外光谱的产生是由于分子发生振动能级跃迁的过程中需要一定的能量,而这个能量通常是吸收了红外光才得到满足的。分子从一个能级跃迁到另外一个能级时,一般伴随着具有一定能量的电磁辐射的吸收或发射,该能量相对应的两个能级之间的能级差为 $\Delta E = h\nu$ 。当光源发射的光通过某种气体时,如果该频率下一个光子具有的能量正好和气体分子的某两个特定能级之间的能量差相等,那么气体分子就选择性地吸收该频率下的光子,致使通过该气体介质后的光强变弱。所以特定的气体只能吸收与之相对应某个特定波长的光,这便是气体的选择吸收理论。利用气体分子选择吸收红外光谱的技术,可通过对某个特定频率下光强的检测来达到测量待测气体体积分数的目的。

1.2 比尔-朗伯定律

一块厚度为 L 均匀的吸收介质,其各向同性,一束平行光波垂直的照射在该介质的表面,其初始光强为 I_0 ,在穿过该吸收介质之后,因为介质的分子会对光波产生选择性的吸收,从而导致该平行光波的强度减小为 I_1 。比尔-朗伯定律^[16]表达式如下:

$$I_1 = I_0 \exp[-\gamma\alpha(\nu)CL] \quad (1)$$

式中, γ 是与传感介质相关的相对灵敏度因子, $\alpha(\nu)$ 是被测气体的吸收系数, ν 是入射光波的频率, C 是被测气体的体积分数, L 是被测气体的有效吸收距离。整理得:

$$C = [\gamma\alpha(\nu)L]^{-1} \ln(I_0/I_1) \quad (2)$$

从(2)式可以看出,当气体的种类确定了, $\alpha(\nu)$ 也就已知了,只要测量出光束穿过待测气体前后的光强 I_0 和 I_1 以及有效吸收距离 L ,就可以通过计算得知 C 的大小。由于在近红外区域内,气体分子对光的吸收表现为弱吸收,使得 $\alpha(\nu)L \ll 1$,则可对(1)式进行近似处理,表达式如下:

$$I_1 = I_0 [1 - \gamma\alpha(\nu)CL] \quad (3)$$

由(3)式可得透射光强的相对变化量 I_r 为:

$$I_r = (I_0 - I_1)/I_0 = \gamma\alpha(\nu)LC \quad (4)$$

由(4)式可知, $\alpha(\nu)$ 和 L 一定时,透射光强的相对变化量 I_r 与气体的体积分数 C 的关系表现为线性。

1.3 CO₂ 吸收谱线参量的选择

高分辨率分子吸收数据库 (high-resolution transmission molecular absorption database, HITRAN)^[17] 由美国的空军地球物理实验室研发,并详细地记录了 47 种气体分子的吸收谱线的相关信息。

从(2)式获知吸收系数 $\alpha(\nu)$ 对于求得体积分数的值 C 是非常重要的, $\alpha(\nu)$ 可以通过计算吸收线强度与线型函数之间的乘积来求得。所以如何选择恰当的 CO₂ 吸收谱线,对于能否准确地测量出 CO₂ 气体的

体积分非常关键。CO₂ 的吸收谱线选取应该以下述几个原则作为基本的依据:(1)尽可能地选取吸收线强度比较大的吸收谱线,使得 CO₂ 气体能够充分吸收光信号;(2)为了避开背景气体的干扰,所选择的 CO₂ 吸收谱线应远离背景气体的吸收区域,这样才能够准确地对 CO₂ 的体积分数进行检测;(3)参考所用光源的发射波段对吸收谱线的位置进行选择,使所选的吸收谱线位于激光器的可发射波段范围之内。

只要按照上述 3 个基本原则,并且以实验室的真实环境作为参考,选择出适当的 CO₂ 吸收谱线,就能获得更好的实验结果。

查阅 HITRAN 数据库获得 CO₂ 在近红外波长段的吸收谱线图,如图 1 所示。

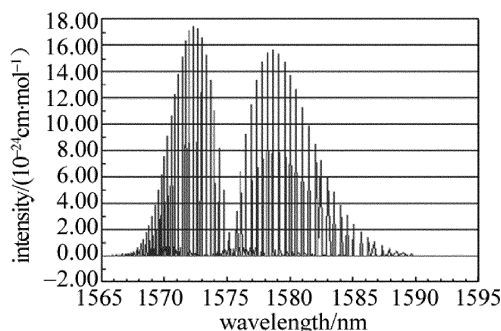


Fig. 1 Intensity of CO₂ absorption line in near infrared

查阅 HIRTRAN 数据库和图 1 所示的 CO₂ 谱线分布图可知,在近红外区,CO₂ 在波长为 1572nm ~ 1574nm 波段的吸收线强度较大(如图 2 所示),而且可以与实验时所使用的背景气体 N₂ 分开,同时也符合激光器的发射波段。因此本实验中主要在该波段对 CO₂ 体积分数进行检测,并绘制了吸收光谱图。

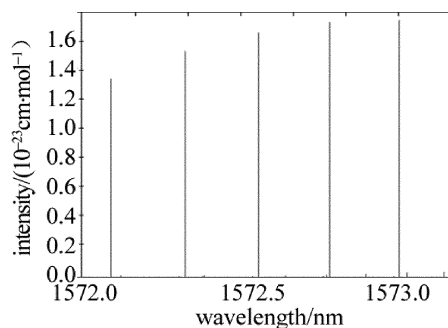


Fig. 2 Intensity of CO₂ absorption lines in 1572nm ~ 1574nm

2 实验结果及分析

2.1 系统结构及实验过程

检测系统如图 3 所示。光源为 NETTEST 可调谐光源,光谱检测装置是型号为 MS97120B 的光谱仪。

吸收池为一根长为 9m 的空芯光子晶体光纤,其横截面的结构如图 4 所示。它是由丹麦的 NKT 公司设计生产的型号为 HC-1550-02 的 HC-PCF,其传输光

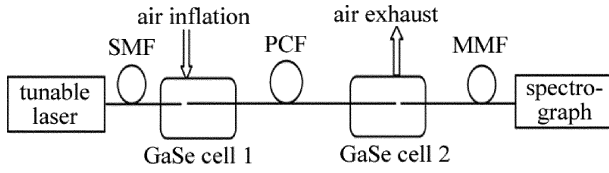


Fig. 3 Structure of optical fiber sensor system

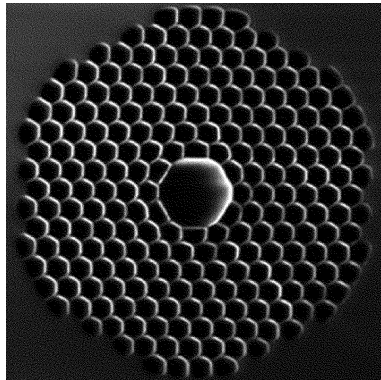


Fig. 4 Cross section figure of photonic crystal fiber

波的中心波长位于 1550nm。它的纤芯是一个比较大的空气孔,该空气孔的直径是 $10\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$,它的包层区域是由结构为六边形的空气柱通过周期性的排列而形成的光子晶体,所有空气孔区域的面积超过整个横截面的 90%,包层的半径是 $60\mu\text{m}$,色散大小是 $97\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,在中心波长 1550nm 处传输损耗低于 30dB/km 。气室是金属圆柱状结构,它的直径是 250mm,高度是 200mm,体积是 10L。在气室内部将单模光纤 (single mode fiber, SMF) 和多模光纤 (multi mode fiber, MMF) 分别与 PCF 固定连接在 3 维支架上,连接处留有约为 $20\mu\text{m}$ 的缝隙,以使气体扩散进光子晶体光纤。

实验是在密闭常温环境下进行的。首先在气室 1 内充入 CO₂,使气室 1 内气压达到 0.2MPa,接着用真空泵把气室 2 内的气压抽至 -0.08MPa ,以此在两个气室之间形成压强差来加快气体扩散进光子晶体光纤^[18]。经过 5.5h 左右待气体完全扩散进入到光子晶体光纤,然后从波长为 1572nm 开始,以波长 0.02nm 为间隔调谐光源至 1573.4nm 结束,同时记录光谱仪的光功率,最后由测量的数据绘制出吸收光谱图。

2.2 实验结果分析

实验中采用图 3 所示传感系统来完成对 CO₂ 体积分数的检测。由于气体传感检测在实际的应用过程中,一般在常温、常压的环境下进行,因此设定该检测系统的温度为 25℃。图 5 ~ 图 8 分别是该传感系统测得 CO₂ 体积分数为 1, 0.10, 0.05 和 0.02 时的光谱吸收图。分析比较图 5 ~ 图 8 与图 2 中 CO₂ 吸收峰的位置可以得知,图 5 ~ 图 8 中位于吸收峰的几个波长的位置与图 2 中有较高吸收线强度的波长位置基本吻

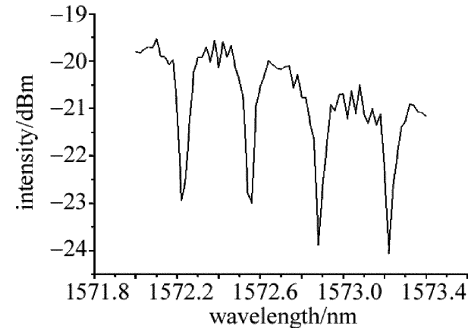


Fig. 5 CO₂ absorption spectrum (volumn fraction $C = 1$)

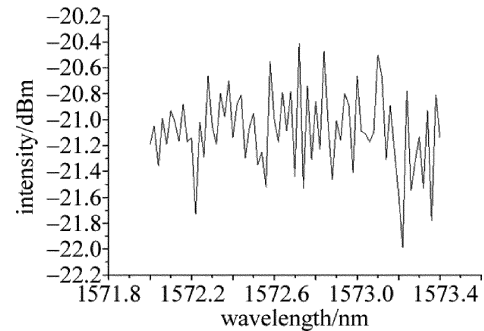


Fig. 6 CO₂ absorption spectrum (volumn fraction $C = 0.10$)

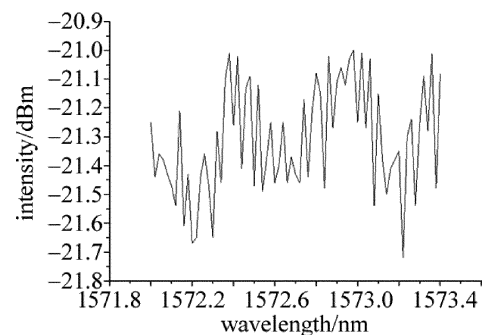


Fig. 7 CO₂ absorption spectrum (volumn fraction $C = 0.05$)

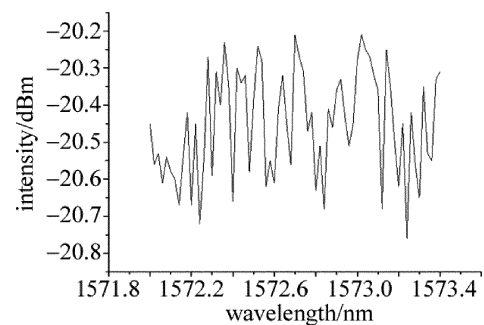


Fig. 8 CO₂ absorption spectrum (volumn fraction $C = 0.02$)

合,而且都是在波长为 1573.3nm 附近达到最大,说明该检测方法能有效地对 CO₂ 进行检测。通过对比发现吸收峰的位置有一定的偏差,这主要是受光源波动和系统噪声及温漂的影响。分析比较图 5 ~ 图 8 的 CO₂ 吸收光谱图可以看出,当 CO₂ 体积分数减小时,出现在 1573.3nm 附近的吸收峰位置比较稳定而且峰值最小,因此选择该波长下的吸收谱线能够更好地对较低体积分数 CO₂ 进行传感检测。

对 CO_2 体积分数变化进行检测时,每次实验都要用待测气体反复冲刷气室 1,消除之前实验残留气体的影响。图 9 为 CO_2 的吸收测量曲线。由该曲线可以知道,光强相对变化量 I_r 和 CO_2 气体体积分数 C 之间的关系呈线性变化,上述结果与之前的理论分析产生的结果一致。最后求得经线性拟合产生的曲线表达式为 $y = 0.03308 + 0.01463x$ 。

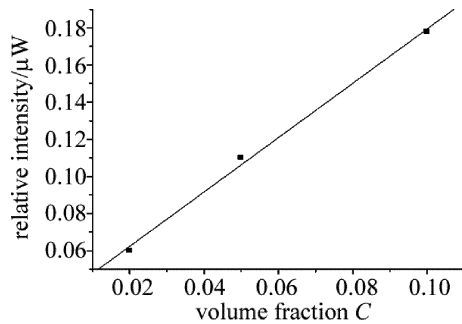


Fig. 9 Relationship between relative intensity and volume fraction of CO_2

在相同实验条件下,充入不同体积分数的 CO_2 进行多次测量,获得的测量值 C_m 与标准值 C_s 的对比见表 1。

Table 1 Comparison of the experimental value and the standard value of CO_2 volumn fraction

C_s	0.02	0.05	0.10
C_m	0.0205	0.0511	0.1024

根据表 1 中的结果计算实际相对误差为:

$$\sigma = (C_m - C_s) / C_s \times 100\% \quad (5)$$

由(5)式可知,系统的最大相对误差为 2.4%。造成该误差的主要原因是:理论分析时对公式进行的近似处理以及光源波动、系统噪声的影响。

可通过计算输出光强的变化量与 CO_2 体积分数的变化量之间的比值得出该系统的灵敏度 S ,即:

$$S = \Delta I / \Delta C = -\alpha I_0 L \quad (6)$$

从(6)式可以看出,当初始光强 I_0 和气体的有效吸收距离 L 一定时,系统检测灵敏度的大小只和被测气体的吸收系数 α 有关。因此对于待测气体为混合型多种气体时,只要每种被测气体选取吸收强度较高且不与其它被测气体相重合的吸收线,就可以做到高灵敏度检测混合气体中每种组分的体积分数。

从图 9 中所示的拟合曲线求得该曲线的斜率 $\alpha L = 0.01463$,由于测量时系统的初始光强 $I_0 = 3\text{mW}$,因此求得该检测系统的灵敏度 $S = 4.389 \times 10^{-5} \text{W}$ 。

3 结论

利用空芯光子晶体光纤作为检测系统的传感单元能够实现对于 CO_2 气体体积分数的检测,并且可以通过加长光子晶体光纤长度使得系统获得高达 $4.389 \times 10^{-5} \text{W}$ 的灵敏度。通过改进传感系统的结构,降低系

统在结构、连接等各方面的传输损耗,可以更好地提升系统的检测能力,进而做到分布式测量。通过变换检测波长,还可以做到对其它气体的检测,使其拥有更加广阔的应用领域。

参考文献

- [1] YANG M L. Research on the key technology of three-gas infrared optical sensor[D]. Taiyuan: North University of China, 2015:2-6 (in Chinese).
- [2] HE B C. Research of infrared spectrum based CO gas concentration detection system[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014:4-8 (in Chinese).
- [3] HOU J F, PEI L, LI Zh X, *et al.* Development and application of optical fiber sensing technology[J]. Electro-Optic Technology Application, 2012, 27(1):49-53 (in Chinese).
- [4] ZHANG K K. Research on the spectrum absorptive optical gas detection theory and technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012:2-5 (in Chinese).
- [5] CORDEIRO C M B, SANTOS E M D, CRUZ C H B. Lateral access to the holes of photonic crystal fibers-selective filling and sensing applications. [J]. Optics Express, 2006, 14(8):8403-8412.
- [6] HUMBERT G, KNIGHT J C, BOUWMANS G, *et al.* Hollow core photonic crystal fibers for beam Delivery[J]. Optics Express, 2004, 12(8):1477-1484.
- [7] LIU X L, TIAN C P, WANG Y Y. Fiber core design and property research of hollow-core photonic crystal fibers[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(12):1861-1866 (in Chinese).
- [8] HANSEN T P, BROENG J, JAKOBSEN C, *et al.* Air-guiding photonic bandgap fibers: spectral properties, macrobending loss and practical handling[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1):11-15.
- [9] MURAO T, SAITOH K. Realization of single-moded broadband air-guiding photonic bandgap fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(15):1666-1668.
- [10] DING W H. Investigation of photonic crystal fiber sensor[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014:5-12 (in Chinese).
- [11] JING L. Research on novel gas sensors with photonic crystal fibers [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012:95-99 (in Chinese).
- [12] CUBILLAS A M, UNTERKOFLE S, EUSER T G, *et al.* Chem inform abstract: Photonic crystal fibres for chemical sensing and photochemistry[J]. Chemical Society Reviews, 2013, 42(22):8629-8648.
- [13] WU B Q. Research on active intra-cavity gas sensor with photonic crystal fiber [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014:40-53 (in Chinese).
- [14] CHEN D F, LU P, LIU D M. Highly sensitive curvature sensors based on polarization-maintaining photonic crystal fibers[J]. Laser Technology, 2015, 39(4):450-452 (in Chinese).
- [15] CHEN H. Research on optical fiber gas sensor based on HC-PCF and its networking technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013:43-45 (in Chinese).
- [16] DEMTRODER W. Laser spectroscopy-basic concepts and instrumentation [M]. Beijing: Book World Publishing, 2002:11-15.
- [17] ROTHMAN L S. The hitran molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updated through 2001[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2003, 82(1/4):5-44.
- [18] CUI J H, DING H, LI X L, *et al.* Acetylene sensing system using hollow-core photonic crystal fiber as gas cell[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8):2262-2266 (in Chinese).