

基于空芯光子晶体光纤气体参考腔的高灵敏度氨气检测

冯巧玲 姜 萌* 王学锋 梁 鹄 王聪颖 梁同利 于文鹏

北京航天控制仪器研究所, 北京 100094

摘要 采用石英增强光声光谱检测系统,并引入空芯光子晶体光纤作为气体参考气室,实现对痕量氨气的高灵敏度检测。参考气室采用长5 m的空芯光子晶体光纤,两端熔接单模光纤,内部填充标准氨气。通过分析空芯光子晶体光纤的模式干涉,获得低干涉噪声的透射谱。气体填充过程中,控制填充压强与时间,提高谱线分辨率,完成分布反馈式(DFB)激光器波长的精确锁定,提高检测精度。测量参考气体腔内氨气吸收谱线线宽,并与高分辨率光谱谱线(HITRAN)数据库数据对比验证实验结果。采用光声光谱检测系统,优化调制参数,获得氨气噪声等效浓度(即指体积分数)为 $6.74 \times 10^{-6} (3\sigma)$ 。

关键词 光谱学; 光声光谱; 气体传感; 空芯光子晶体光纤; 气体参考腔; 石英音叉

中图分类号 TN2 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0305001

High Sensitivity Ammonia Gas Detection with Hollow-Core Photonic Bandgap Fibers Reference Gas Cavity

Feng Qiaoling Jiang Meng Wang Xuefeng Liang Hu Wang Congying
Liang Tongli Yu Wenpeng

Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China

Abstract A system based on quartz enhanced photo-acoustic spectroscopy technique is investigated for trace ammonia gas detection. And hollow-core photonic band-gap fiber is introduced as reference gas cavity for high accuracy and sensitivity. The reference gas cavity is consisted with a 5 m long hollow-core photonic bandgap fiber, which fills with ammonia gas and splices with single-mode optical fibers at both ends. Modes interference is analyzed to obtain transmission spectrum with low interference noise. For improving detection accuracy, gas filling time and pressure are controlled in filling procedure. Ammonia absorption line width in reference gas cavity of hollow-core photonic bandgap fiber is measured, and compared with the high-resolution transmission (HITRAN) database data. By this method, wavelength of distributed feed back (DFB) laser is locked accurately. Quartz enhanced photo-acoustic spectroscopy system is used for ammonia detection with optimal modulation parameters, which yields that a noise equivalent concentration (namely volume fraction) of ammonia is $6.74 \times 10^{-6} (3\sigma)$.

Key words spectroscopy; photo-acoustic spectroscopy; gas sensing; hollow-core photonic bandgap fiber; reference gas cell; quartz tuning fork

OCIS codes 280.4788; 060.2370; 060.5295

1 引 言

氨气(NH₃)在线监测在人员健康状况以及医疗诊断等方面具有重要的应用价值^[1-2]。健康人群呼出的氨气浓度(即气体的体积分数,下同)为10⁻⁹量级,而器官损伤的非健康人群,如慢性肾病、老年痴呆以及幽门螺

收稿日期: 2015-08-24; 收到修改稿日期: 2015-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(61203204)

作者简介: 冯巧玲(1986—),女,硕士,工程师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 758092041@qq.com

*通信联系人。E-mail: abobjm@163.com

杆菌感染等人呼出的氨气浓度为 10^{-6} 量级,所以研制小型化、高精度、快速响应以及长期稳定的氨气浓度在线监测系统为人员的长期健康监测提供了重要的保障。

光声光谱技术是通过光声效应原理来探测气体浓度,其优势在于检测灵敏度高、重量轻、体积小以及响应时间短。石英增强光声光谱(QEPAS)技术属于光声光谱技术的一种,石英增强光声光谱采用的是高品质因数(Q)的石英音叉来替代传统光声光谱技术中使用的声探测器^[9]。其原理是当一定频率的光波照射待测气体时,待测气吸收光波,并通过能量释放转换为热能,经光源调制产生温度起伏,从而产生声信号,该信号通过石英音叉两叉股中心,使得其产生共振,进而转换为电信号,由于该电信号正比于待测气的浓度,所以通过检测该电信号,即可得到待测气体的浓度。石英增强光声光谱技术的主要优势在于体积小、免环境噪声以及探测精度高^[4-8],是探测痕量气体浓度的有效方法。

气体检测一般通过波长扫描方式,气体浓度与吸收线中心频率处的二次谐波信号成正比,然而激光器温度变化会导致波长漂移从而影响系统检测性能。光源的温度变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,波长则会漂移近 $1\text{ }\mu\text{m}$,所以当温度改变时,气体吸收谱线将不能稳定在中心频率处,进而影响系统信噪比(SNR)导致灵敏度降低。解决途径是使用参考气室,通过激光器驱动参数反馈调整,使得激光器波长能够稳定于气体吸收峰的中心。参考气室是长期可靠的石英增强光声光谱气体传感系统中的重要组成部分,传统的参考气室有自聚焦透镜参考气室和毛细玻璃管参考气室两种,前者稳定性强,易于准直,但是由于吸收光程短,不利于痕量气体的检测;后者成本低、操作方便,但干涉噪声大、信噪比差^[9]。而空芯光子晶体光纤(HC-PBFs)能够限制光学模式,将气相与液相材料同时限制在空气孔中,并且为光与物质在很长距离内的相互作用提供一个理想的平台^[10-11]。早在1999年,第一个空气/二氧化硅空芯光子晶体光纤被展示时,Cregan等^[12]就提出采用空芯光子带隙光纤探测气体的可能性。2004年后,Ritari等^[13]报道了使用HC-PBFs的高灵敏度气体检测,光纤传播窗口中心位于 $1300\sim 1500\text{ nm}$ 。此后,几个研究小组报道了HC-PBFs气体检测^[14-15]。但是基于光声光谱技术的空芯光子晶体光纤气体参考腔的气体检测很少。

基于此,本文采用HC-PBF作为参考气室,通过优化熔接参数,使用适当长度的传感光纤,降低干涉噪声,得到清晰的氨气谱线。采用光声光谱检测系统,优化调制参数,获得氨气噪声等效浓度为 $6.74\times 10^{-6}(3\sigma)$ 。

2 基于空芯光子晶体光纤参考气室

2.1 参考气室制备

为了提高系统测量的准确性和长期稳定性,系统采用空芯光子晶体光纤作为参考气室,实现波长的精确锁定。实验所用空芯光子晶体光纤是丹麦NKT公司的HC-1550-02型光纤。该光纤通光波长范围为 $1490\sim 1680\text{ nm}$,中心大孔直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$,周围六边形阵列的间距为 $3.8\text{ }\mu\text{m}$,包层直径为 $70\text{ }\mu\text{m}$,模场直径为 $9\text{ }\mu\text{m}$ 。实验采用的光子晶体光纤长度为 5 m 。

空芯光子晶体光纤参考气室的制作过程如下:将长 5 m 的HC-PBF一端与单模光纤(SMF)熔接,熔接后HC-PBF被放置在一个直径 20 cm 的密封罐状气室中,该气室出气口与真空度为 $8\times 10^{-3}\text{ Pa}$ 的真空泵密封连接,进气前先用高纯度氮气进行冲洗,然后关闭进气后,打开真空泵对气室中的HC-PBF进行 30 min 真空处理。关闭真空泵密封出气口,打开纯度为 99.999% 的氨气对HC-PBF气体腔进行填充,压力控制在 0.3 MPa 。经研究表明,空芯光子晶体光纤经 9 h 实现内部气体的完全置换,达到压力平衡^[16-17]。为控制气体参考腔内的压强,提高谱线分辨率,缩短填充时间至 45 min 。经过氨气填充,HC-PBF气体腔内氨气逐渐达到平衡。此时,取出光纤,利用光纤熔接机(Fujikura, FSM-80S)通过降低放电时间、放电强度和单模光纤与光子晶体光纤间的缝隙,优化熔接参数^[18],电击位置靠近熔接点附近的单模光纤,防止光子晶体光纤空气孔的坍塌,实现HC-PBF的另一端与单模光纤(SMF)的低损耗熔接。熔接时,取合适内径的陶瓷插芯套管对熔接点密封,之后采用真空胶对套管两端进行二次密封。单模光纤的模场直径近似为 $10.5\text{ }\mu\text{m}$ ^[19],与光子晶体光纤模场直径基本匹配。经过测量,空芯光子晶体光纤气体参考腔的总体损耗小于 3.5 dB ,实现了低损耗的光纤熔接。在显微镜(奥林巴斯,XYH-3A)下,空芯光子晶体光纤截面图与熔接图如图1所示。

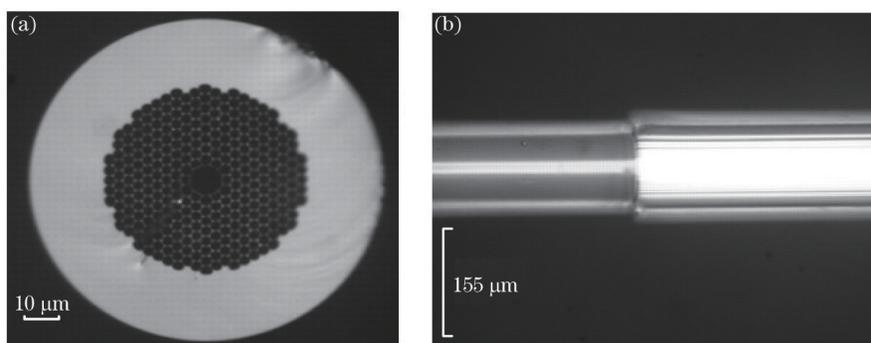


图1 显微镜图像。(a) HC-PBF截面;(b) 与单模光纤熔接

Fig.1 Microscope images. (a) HC-PBF section; (b) splicing with single-mode fiber

2.2 空芯光子晶体光纤模式分析

采用空芯光子晶体光纤作为吸收气室检测气体时,检测性能即最小探测极限受限于光纤内的模式干涉造成的噪声干扰^[20-21],作为参考气室,模式干涉对于光谱分辨也存在影响。通用的商业光子晶体光纤支持几组模式,且这些模式的相互干涉会导致透射光强度的变化,支持单模传输的光子晶体光纤还在短波长带隙边缘,不能覆盖重要的气体吸收带^[22]。现将通过测量不同长度无气体填充的空芯光子晶体光纤样本的透射光谱及其傅里叶变换,对其中由于不同群延迟模式相干造成的模式干涉进行分析,选取适当光纤长度消除高阶模干涉对系统的影响。

空芯光子晶体光纤的透射光谱通过超连续光源(Fianium, WL-SC480-2)和光谱仪(THORLABS, OSA203)来探测,波长的调谐范围设为 1530~1565 nm,检测波长分辨率为 0.02 nm。

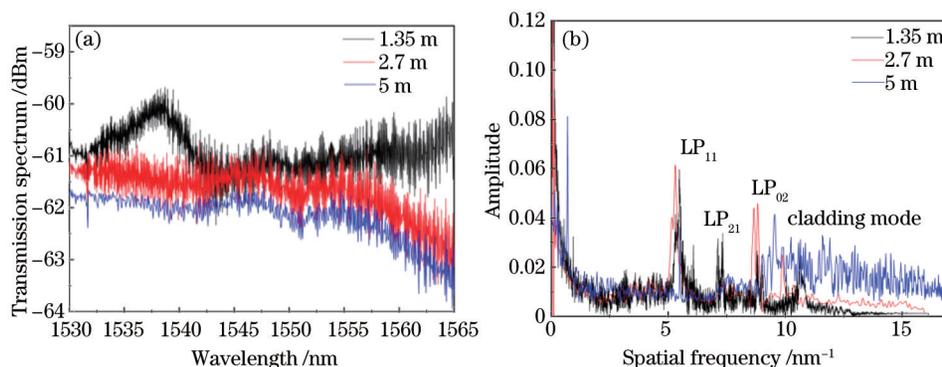


图2 (a) 不同长度 HC-PBF 样本的透射光谱;(b) 光谱的傅里叶变换

Fig.2 (a) Transmission spectra of HC-PBF samples with different lengths; (b) Fourier transforms of the spectra

图2(a)为不同长度空芯光子晶体光纤的透射光谱,长度分别为 1.35、2.7、5 m。这些光谱是通过在单模光纤(SMF)尾端的光谱分析仪直接测量。如图2所示,与 1.35 m 样本光纤比较,5 m 的样本光纤干涉信号幅度明显减少。不同长度光纤的傅里叶变换光谱如图2(b)所示,存在基模 LP_{11} 、包层模、基模与包层模式的干涉以及包层模的模式干涉^[23]。在 1.35 m 长的光纤传输谱中,存在包层模式,但是穿过 5 m 长光纤,虽然纤芯模式之间的拍频 LP_{21} 依然存在,但是包层模式和纤芯基模之间的干涉 LP_{02} 以及包层模式干涉都显著降低。随着空芯光子晶体光纤样本长度的增加,透射谱中基模的强度降低,包层模式减小^[22]。因此可以通过增加光纤长度降低干涉噪声对光谱准确性的干扰。但是随着光纤长度的增加,也会适当增加系统光路损耗,选取 5 m 长的光纤样本,为最短可用长度,信噪比可满足系统实验要求。

2.3 氨气吸收峰测试

谱线选择对于气体检测非常重要,选择谱线的宽度将决定调制系数 m ,谱线的线强和线型将决定吸收系数的大小,吸收系数直接影响检测精度。被测谱线与其相邻谱线间隔适当,可避免谱线交叠、交叉干扰等。实验选择氨气吸收峰在 1531 nm 附近。检测常温常压下空芯光子晶体光纤气体腔氨气吸收光谱如图3(b)所示,根据高分辨率光谱谱线(HITRAN2012)数据库,氨气在 1531.67 nm 波长附近具有 4 条较强的吸收峰,吸收

光谱如图 3(a)所示。图 3(c)示出了氨气分子在 1531 nm 波长附近的吸收谱线,通过对比图 3(a)和图 3(c),理论数据仿真与实验测试结果相符。由于 1531.68 nm 附近的 2 条氨气谱线紧密相连,不利于区分,所以系统选用最佳氨气分子的吸收峰为 1531.583 nm。该处当温度为 296 K 时吸收线的谱线线强为 $1.23 \times 10^{-21} \text{ cm}^{-1}/(\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2})$,谱线的空气加宽系数与自展宽系数分别为 0.0891 和 0.435,因此常温常压下谱线半峰全宽为 $\gamma = \gamma_{\text{self}} P_{\text{self}} + \gamma_{\text{air}} P_{\text{air}} = 0.5241 \text{ cm}^{-1}$,波长变化量 $d\lambda = 0.12294 \text{ nm}$ 。实验中,通过光谱分析仪测得氨气分子的吸收谱线宽度(半峰全宽)约为 0.119 nm,小于常压下 NH_3 理论计算出的谱线线宽,该结果表明:虽然填充过程采用 0.3 MPa 的高纯度氨气,但是由于时间较短,达到平衡后空芯光子晶体光纤空气孔中的氨气压强并没有达到高压,仍旧保持在常压附近,且略低于常压。因此谱线宽度没有因为压强增大而展宽,可以实现分立的光谱,避免谱线交叠无法区分,实现波长的精确锁定。

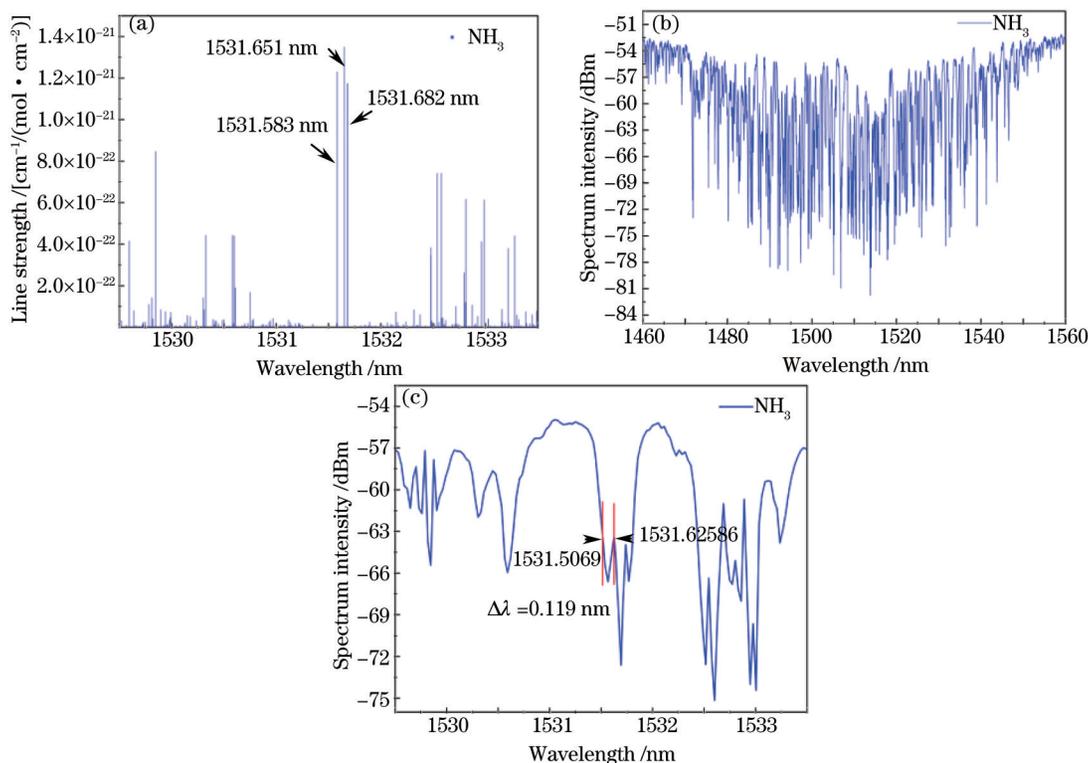


图 3 氨气吸收光谱。(a) 理论仿真光谱; (b) 实验测试全光谱; (c) 1531 nm 附近实验测试光谱

Fig.3 Absorption spectra of ammonia. (a) Theoretical simulation spectrum; (b) experimental testing full spectrum; (c) experimental testing spectrum near 1531 nm

3 实验系统与结果分析

石英增强光声光谱气体传感器系统如图 4 所示,主要包括光源与波长选择单元、光声探测单元、信号采集与控制单元以及气路控制单元。采用工业蝶形封装的 1531 nm 分布式反馈(DFB)激光器作为光源(SEI, SLT5411),激光器的输出波长通过改变激光驱动器中的温度和电流实现。电流信号由正弦波发生器产生的高频信号调制,锯齿波发生器产生低频扫描信号,周期性地扫过氨气吸收峰,以实现氨气的波长选择。激光器输出的激光通过 1550 nm 光纤耦合器耦合为两路,一路经过准直聚焦在石英音叉的两叉股缝隙中央,2 个微型共振毛细管沿光路放置在石英音叉的两侧,组成光声探测单元^[24]。该单元被放置在密闭的气室中,气室顶部开设进气口和出气口,出气口连接真空泵,进气口连接气瓶减压阀。光声探测单元中石英音叉探测到待测信号后,经锁相放大器解调,产生二次谐波信号即待测信号;光纤耦合器产生的另一路光束通过参考气室,系统采用空芯光子晶体光纤气体腔作为参考气室,探测器探测空芯光子晶体光纤传输的信号,经锁相放大器解调出一次谐波,由于一次谐波在吸收线中心处为零,因此可用于确定吸收线中心,从而实现波长锁定;信号采集控制单元^[25]主要负责信号采集、波长锁定的反馈控制以及石英音叉共振频率检测,信号采集处理单元与电脑相连接,用于监测信号实时显示。

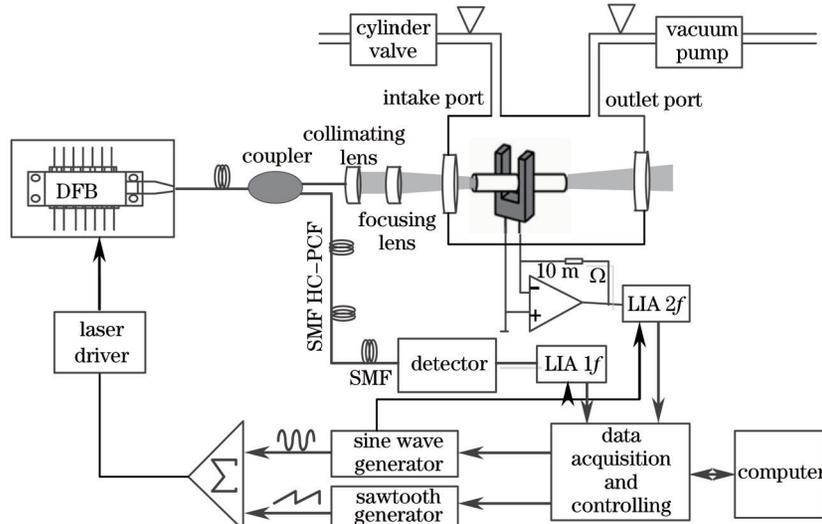


图4 石英增强光声光谱气体传感器系统示意图

Fig.4 Schematic of quartz enhanced photoacoustic gas sensor

使用上述装置测量氨气气体浓度时,首先将气体池的进气口阀门关闭,用真空泵接入气体池的出气口,将气体池内部抽为真空状态,关闭出气口阀门。然后将进气口接入待测气体气瓶,打开进气口阀门,控制气瓶减压阀气路压力,充入待测氨气气体。

系统选择氨气吸收峰为 1531.583 nm。因此选择中心波长为 1531 nm 的工业蝶形封装 DFB 激光器作为光源,激光驱动温度控制在 23.5 ℃,电流为 76.8 mA 时,输出激光波长为 1531.583 nm。工作电流由正弦波发生器产生的 $f=f_0/2$ 正弦高频信号调制(f_0 为石英音叉共振频率),锯齿电流信号使得发出的激光信号周期性地扫过氨气吸收峰,以实现氨气的检测。调制光束通过光声探测单元中的待测气体产生光声信号,待测气体的浓度分别为 150×10^{-6} 、 200×10^{-6} 、 400×10^{-6} 、 700×10^{-6} 的标准氨气,产生的光声信号频率与石英音叉共振频率相同时,激发石英音叉共振,产生压电电流通过互阻抗放大电路转变成电压信号。电压信号经过锁相放大器,产生二次谐波信号即待测信号。系统的最小检测灵敏度可通过痕量 NH_3 的二次谐波幅值以及无气体吸收时产生的本底噪声标准差获得。

在室温和常压下,检测不同浓度氨气的二次谐波信号如图 5 所示,对该数据进行数据拟合,拟合曲线如图 6 所示。利用最小二乘法对数据进行线性回归分析,得到相关系数 $r=0.997$,该系数接近于 1,说明峰值电压与浓度呈现良好的线性关系,即二次谐波信号与氨气浓度在一定范围内成正比,系统设计效果良好。

其中,获得浓度为 200×10^{-6} 的氨气的二次谐波幅值为 0.38 mV, 1σ 的本地噪声标准差为 0.00427, 3σ 的本地噪声标准差为 0.01281。由此获得噪声等效归一化浓度即系统最小探测灵敏度为 6.74×10^{-6} (3σ)。在 1 s 平均时间内,归一化到激光功率 10 mW 和探测带宽 0.75 Hz 上,获得的归一化噪声等效吸收系数为 $4.43 \times 10^{-8} (\text{cm}^{-1} \cdot \text{W})/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

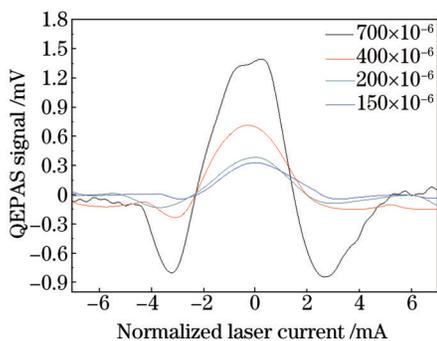


图5 不同浓度氨气的二次谐波信号

Fig.5 Second harmonic signal of the ammonia with different concentrations

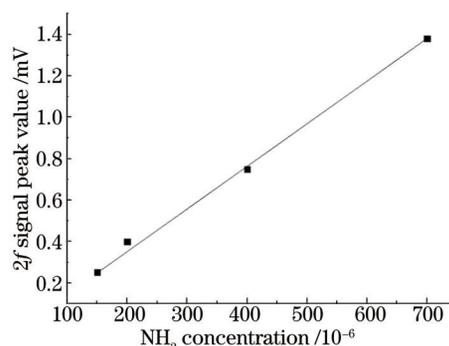


图6 不同浓度氨气谐波信号拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of the second harmonic signal with different concentrations of ammonia

4 结 论

研究了光子晶体光纤模式干涉对气体传感器性能的影响。实验表明:增加空芯光子晶体光纤的长度可以降低高阶纤芯模式和包层模式的模式干涉,提高光谱准确性,实现波长的精确锁定。通过优化熔接参数,使得空芯光子晶体光纤气体参腔的光传输损耗小于3.5 dB。控制气体填充的压强和时间,完成了低损耗、高稳定、长光程、强信噪比的空芯光子晶体光纤参考气室的制备。实验测量得到空芯光子晶体光纤参考腔内氦气吸收谱线线宽,与理论推导的常压下谱线线宽相比,明显小于理论线宽,表明制备的参考腔内氦气压强低于常压,实现了参考气体低压填充。本文采用光声光谱技术结合光子晶体光纤参考气室,优化调制参数,得到 $6.74 \times 10^{-6}(3\sigma)$ 的噪声等效浓度,这将为进一步提高系统检测灵敏度积累了经验。

参 考 文 献

- 1 Kosterev A A, Wysocki G, Bakhirkin Y A, *et al.*. Application of quantum cascade lasers to trace gas analysis[J]. Appl Phys B-Lasers O, 2008, 90(2): 165-176.
- 2 Mccurdy M R, Bakhirkin Y, Wysocki G, *et al.*. Recent advances of laser-spectroscopy-based techniques for applications in breath analysis [J]. J Breath Res, 2007, 1(1): 014001.
- 3 Kosterev A A, Bakhirkin Y A, Curl R F, *et al.*. Quartz enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. Opt Lett, 2002, 27(21): 1902-1904.
- 4 Kosterev A A, Tittel F K, Serebryakov D V, *et al.*. Applications of quartz tuning forks in spectroscopic gas sensing[J]. Rev SciInstrum, 2005, 76(4): 043105.
- 5 Lewicki R, Wysocki G, Kosterev A A, *et al.*. Carbon dioxide and ammonia detection using 2 μm diode laser based quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. Appl Phys B, 2007, 87(1): 157-162.
- 6 Tian Li, Zhu Yong, Wei Wei, *et al.*. Research on the fiber Fabry-Perot demodulation technique based on all-optical quartz enhanced photoacoustic spectroscopy system[J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2014, 51(6): 060602.
田 莉, 朱 永, 韦 玮, 等. 全光式石英增强光声光谱系统光纤法珀解调技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 060602.
- 7 Zheng Huadan, Dong Lei, Liu Yanyan, *et al.*. Experimental research on optimization of QEPAS based spectrophone[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(12): 3187-3191.
郑华丹, 董 磊, 刘研研, 等. 石英晶振用于石英增强光声光谱系统的优化实验研究[J]. 光谱与光谱分析, 2013, 33(12): 3187-3191.
- 8 Jiang Meng, Feng Qiaoling, Wei Yufeng, *et al.*. Recent advances in miniaturization of photo-acoustic spectroscopy gas sensor[J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2015, 52(2): 020006.
姜 萌, 冯巧玲, 魏宇峰, 等. 小型化光声光谱气体传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 020006.
- 9 Lü Lei, Wei Yubin, Zhao Yanjie, *et al.*. Research progress of reference gas cell[C]. OFSIS, 2015: 124-128.
吕 蕾, 魏玉宾, 赵艳杰, 等. 参考气室研究进展[C]. 光纤和光电子传感器及其安全应用国际会议, 2015: 124-128.
- 10 Cheng Tonglei, Li Shuguang, Zhou Guiyao, *et al.*. Relation between power fraction in the core of hollow-core photonic crystal fibers and their bandgap property[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 249-254.
程同蕾, 李曙光, 周桂耀, 等. 空芯光子晶体光纤纤芯中的功率分数及其带隙特性[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 249-254.
- 11 Li Jing, Wang Wei, Wang Xuefeng, *et al.*. Pivotal technology and development of photonic crystal fiber-optic gyroscope[J]. Navigation and Control, 2014, 13(1): 51-56.
李 晶, 王 巍, 王学锋, 等. 光子晶体光纤陀螺仪关键技术及进展[J]. 导航与控制, 2014, 13(1): 51-56.
- 12 Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, *et al.*. Single mode photonic band gap guidance of light in air[J]. Science, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- 13 Ritari T, Tuominen J, Ludvigsen H, *et al.*. Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers[J]. Opt Express, 2004, 12(17): 4080-4087.
- 14 Lehmann H, Bartelt H, Willsch R, *et al.*. In-line gas sensor based on a photonic bandgap fiber with laser-drilled lateral microchannels [C]. IEEE Sens J, 2011, 11(11): 2926-2931.
- 15 Li X, Liang J, Lin S, *et al.*. NIR spectrum analysis of natural gas based on hollow-core photonic bandgap fiber[C]. IEEE Sens J, 2012, 12(7): 2362-2367.
- 16 Sun Qing, Liu Erming, Qin Fenghua, *et al.*. All-fiber high-pressure gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(7): 1029-1034.

- 孙 青, 刘二明, 秦丰华, 等. 全光纤型空芯光子晶体光纤高压气体腔[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1029-1034.
- 17 Wang Haibin, Liu Ye, Wang Jinzu, *et al.*. Preparation of all-fiber low-pressure CO₂ gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706007.
- 王海宾, 刘 晔, 王进祖, 等. 光纤型空芯光子晶体光纤低压CO₂气体腔的制备[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706007.
- 18 Xiao L, Demokan M S, Jin W, *et al.*. Fusion on splicing photonic crystal fiber and conventional single-mode fibers: Microhole collapse effect[J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(11): 3563-3574.
- 19 Thapa R, Knabe K, Corwin K L, *et al.*. Arc fusion splicing of hollow-core photonic bandgap fibers for gas-filled fiber cells[J]. Opt Express, 2006, 14(21): 9576-9583.
- 20 Parry J P, Griffiths B C, Gayraud N. Towards practical gas sensing with micro-structured fibres[J]. Meas Sci Technol, 2009, 20(7): 075301.
- 21 Jin W, Ho H L, Cao Y C, *et al.*. Gas detection with micro- and nano-engineered optical fibers[J]. Opt Fiber Technol, 2013, 19(6): 741-759.
- 22 Fan Yang, Wei Jin, Yingchun Cao, *et al.*. Towards high sensitivity gas detection with hollow-core photonic bandgap fibers[J]. Opt Express, 2014, 22(20): 24894-24907.
- 23 Petrovich M N, Poletti F, Richardson D J. Analysis of modal interference in photonic bandgap fibres[C]. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2010: 1-4.
- 24 Zheng Dezhong, Zhao Nan. Design and experimental analysis of new photoacoustic cell[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0415002.
- 郑德忠, 赵 南. 新型光声腔的设计及实验分析[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0415002.
- 25 Zhao Xuanyi, Li Rongbing, Liu Jianye, *et al.*. Optimum design method of micro-miniature data collecting system[J]. Navigation and Control, 2014, 13(6): 40-43.
- 赵宣懿, 李荣冰, 刘建业, 等. 微小型数据采集系统优化设计方法研究[J]. 导航与控制, 2014, 13(6): 40-43.

栏目编辑: 王晓琰