

光学学报

共光声池腔芯轴型空气衬底光纤麦克风

张刚^{1,2}, 吴许强^{1,2}, 汪辉³, 葛强⁴, 左铖^{1,2}, 余国锋⁵, 唐春安⁶, 俞本立^{1,2*}

¹安徽大学光电信息获取与控制教育部重点实验室, 安徽 合肥 230601;

²安徽大学信息材料与智能感知安徽省实验室, 安徽 合肥 230601;

³安徽至博光电技术有限公司, 安徽 合肥 230088;

⁴安徽工程大学数理学院, 安徽 芜湖 241000;

⁵淮南矿业(集团)有限责任公司深部煤炭开采与环境保护国家重点实验室, 安徽 淮南 232001;

⁶大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024

摘要 声传感器和光声池是激光光声光谱技术的核心组件。结合光纤迈克耳孙干涉仪、相位载波解调技术和纵向共振光声池, 提出一种共光声池腔的芯轴型空气衬底光纤麦克风。光纤麦克风中的铜毛细管被用作光声池的共振腔, 传感臂由 10 m 长的超细光纤缠绕在铜毛细管上构成, 参考臂为 5 cm 长的短臂且已进行隔声隔振处理。基于结构共振频率稳定的特点, 优化光纤麦克风的共振频率, 使其略低于光声池的一阶纵向共振频率, 以实现准双共振。实验结果表明, 麦克风在共振频率为 1443 Hz 处的最小可检测声压为 $0.69 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在 1 kHz 处, 声压电压响应线性度为 99.98% (5 mPa~3 Pa), 动态范围为 112.52 dB。该光纤麦克风适用于高温、易爆和高电磁干扰等特殊环境下痕量气体的高精度检测。

关键词 光纤光学; 麦克风; 光声光谱; 纵向共振光声池; 光纤迈克耳孙干涉仪; 相位载波解调

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0206001

Air-Backed Mandrel Fiber Optic Microphone with a Resonant Photoacoustic Tube

Zhang Gang^{1,2}, Wu Xuqiang^{1,2}, Wang Hui³, Ge Qiang⁴, Zuo Cheng^{1,2},
Yu Guofeng⁵, Tang Chun'an⁶, Yu Benli^{1,2*}

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information Acquisition and Manipulation of Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;

²Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;

³Anhui Idetec Co., Ltd., Hefei, Anhui 230088, China;

⁴School of Mathematics and Physics, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China;

⁵State Key Laboratory of Deep Coal Mining & Environment Protection, Huainan Mining (Group) Co., Ltd., Huainan, Anhui 232001, China;

⁶State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

收稿日期: 2020-07-30; 修回日期: 2020-08-17; 录用日期: 2020-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(51627804)、国家重点研发项目(2016YFC0301902)、安徽省重点研发项目(1804a0802214)、安徽大学微弱信号感测材料与器件集成协同创新中心开放基金(WRXH201704)、光电信息获取与控制教育部重点实验室开放基金(OEIAM202002)

* E-mail: benliyu@ahu.edu.cn

Abstract Acoustic sensor and photoacoustic cell are key components of laser-based photoacoustic spectroscopy. In this paper, we proposed an air-backed mandrel fiber optic microphone with a resonant photoacoustic tube, combining the technologies of fiber Michelson interferometer, phase generated carrier demodulation, and longitudinal resonant photoacoustic cell. In the microphone, we fabricated a sensing arm by wrapping a 10-meter ultra-thin single-mode fiber on a copper capillary tube that was also utilized as the resonant tube of the photoacoustic cell. Besides, a 5-cm reference arm has been isolated from sound and vibration. Furthermore, the resonant frequency of the microphone was designed to be slightly lower than the first-order longitudinal resonant frequency of the photoacoustic cell to achieve quasi-double resonance as the resonant frequency of the microphone was stable. The experimental results show that the minimum resolution is $0.69 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ at the resonant frequency of 1443 Hz, and the linearity of acoustic pressure and voltage response is 99.98% (5 mPa–3 Pa) with a dynamic range of 112.52 dB at 1 kHz. In conclusion, the microphone can be applied for trace gas detection in high-temperature, explosive, or high-electromagnetic-interference environments.

Key words fiber optics; microphone; photoacoustic spectroscopy; longitudinal resonant photoacoustic cell; fiber Michelson interferometer; phase generated carrier demodulation

OCIS codes 060.2370; 110.5125; 120.3180; 120.5050

1 引言

自 1880 年 Bell^[1]发现光声现象后,随着激光器和高灵敏声传感器的发展以及二次谐波检测技术的提出,得益于光声光谱技术具有高灵敏度、高选择性和探测器不受波长限制等优点,光声光谱技术在农业生产^[2]、煤矿安全监测^[3]、医学诊断^[4]、石化^[5]和电力设施实时监测^[6-7]等领域得到越来越多的应用。由于光声信号微弱,光声光谱技术应用时需要声学放大装置和高灵敏度的声传感器,因此声共振装置和声传感器是光声光谱技术的核心组件。1973 年, Dewey 等^[8]首次提出使用声学谐振腔对微弱的光声信号进行共振放大,相较于非共振工作系统,光声光谱技术的探测灵敏度大大提高。电容式麦克风和石英音叉通常被用作声传感器。2002 年,美国 Rice 大学的 Tittel 研究组^[9]首次提出石英音叉增强光声光谱技术,利用石英音叉共振实现了光声信号放大,通过其压电特性将光声信号转换为电信号。

由于电容式麦克风必须带电工作,石英音叉必须对压电信号进行低噪声前置放大,故它们在高温、易燃易爆和高电磁干扰等场景中的应用受限。这些缺点可以通过全光或者光纤麦克风来解决。光声信号和麦克风的灵敏度成正比,高灵敏度且本征安全的全光或者光纤麦克风逐步取代了传统的声传感器。1981 年,美国海军实验室的 Leslie 等^[10]提出基于光纤马赫-曾德干涉仪结构和相位检测的麦克风。然而,其受环境噪声的影响较大且工作在非共振状态,故灵敏度较低。1995 年,瑞士的 Breguet 等^[11]提出了基于光纤迈克耳孙干涉仪和萨格纳克干涉仪的麦克风,并结合共振腔实现了痕量气体检测。2003 年,芬兰的 Welcken 等^[12]提出了基于迈克耳

孙干涉仪的悬臂梁增强型光声光谱技术。然而,该麦克风存在结构复杂、体积较大和不易与光声池匹配等缺点。2018 年,大连理工大学的 Chen 等^[13]提出了基于光纤法布里-珀罗干涉仪的悬臂式麦克风,其最小可检测声压达 $5 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。然而,其制作困难,需要高成本的微加工、光学对准与封装设备。2020 年,他们又等^[14]进一步提出基于纵向共振光声池和悬臂梁光纤麦克风双共振增强的光声光谱技术。然而,光声池谐振腔的一阶纵向共振频率与温度、湿度和气体种类等因素有关,很难实现严格的双共振工作条件,环境控制措施复杂。2020 年,饶俏萌等^[15]采用微加工技术研制了一种微型正交干涉型声波传感器,其最小可检测声压达 $68 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$,然而传感器的制作工艺复杂。

本文基于光纤迈克耳孙干涉仪、相位载波解调技术和纵向共振光声池,提出一种共光声池腔的芯轴型空气衬底光纤麦克风。该麦克风采用光纤迈克耳孙干涉仪和芯轴型空气衬底设计,传感臂由弯曲不敏感的超细光纤绕制在铜毛细管上构成。通过声学共振腔和麦克风共振频率的优化设计,针对结构共振频率稳定的特点,利用准双谐振在麦克风结构的共振频率处实现了较稳定的工作状态和高灵敏度。

2 基本原理

共光声池腔的芯轴型空气衬底光纤麦克风的结构示意图如图 1(a)所示,光声池由准直器、调节法兰、粗铜管、短铝管、铜毛细管、氟化钙光窗、镀金反射镜和端盖等组成;非平衡的光纤迈克耳孙干涉仪的信号臂缠绕在铜毛细管上,将铜毛细管的两端涂覆环氧树脂,插入短铝管内固定,如图 1(b)所示,然后

将其插入带两个缓冲腔的铜管中并使用硅橡胶将两端固定。光纤干涉仪的短参考臂、法拉第旋转镜 (FRM) 和 3 dB 耦合器被密封在隔声隔振装置中, 以减少外界环境的干扰。窄线宽光纤激光器 (NLFL) 出射的调制激光经干涉仪的两臂后将光声信号转换成干涉光强中的相位信号, 通过光电探测器 (PD) 将光强转换成电压并送入相位载波解调 (PGC) 电路, 最终解调出光声信号。

在提出的光纤麦克风中存在两种共振机制, 第

一种是声学谐振腔的一阶纵向共振, 第二种是光纤麦克风的结构共振, 控制两种共振频率可以实现准双共振工作状态。在声压 ΔP 的激励下, 光纤麦克风的干涉光强可以表示为^[16-17]

$$I = A + B \cos(C \cos \omega_0 t + \Delta\phi + \varphi_0), \quad (1)$$

式中: A 和 B 是与光强相关的常量, 其中 B 和干涉仪的干涉效率相关; ω_0 是相位载波角频率; C 是相位载波调制量 (通常设置为 2.37 rad); φ_0 是干涉仪的初始相位; $\Delta\phi$ 是声压信号引起的相移。

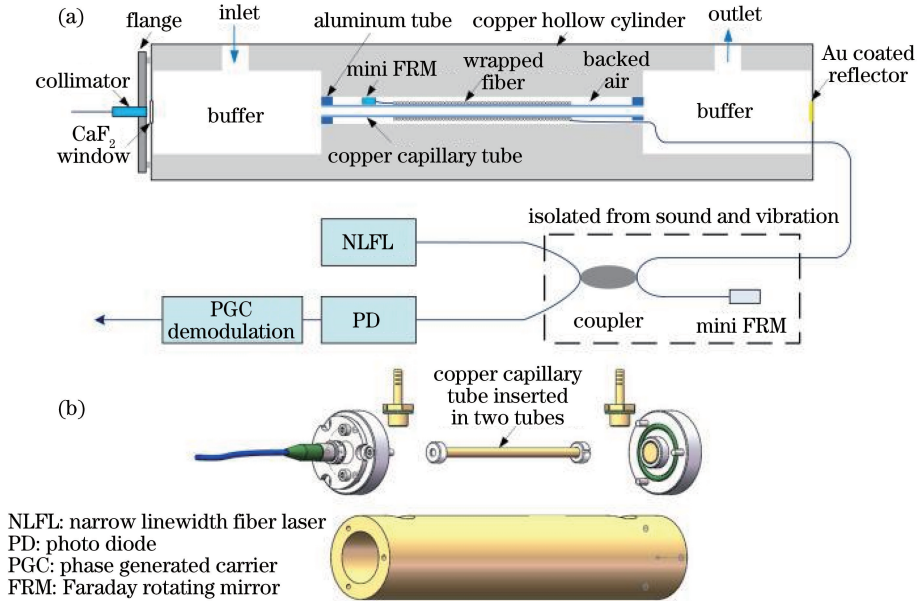


图 1 传感器示意图。(a) 光纤麦克风的示意图; (b) 光声池的设计图

Fig. 1 Schematic of the sensor. (a) Schematic of the fiber optic microphone; (b) design of the photoacoustic cell

在声压 ΔP 作用下, 内外半径分别为 r_1, r_2 的铜毛细管的外半径变化 Δr_2 为^[17]

$$\Delta r_2 = \frac{\Delta P}{E} r_2 \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \nu_1 \right), \quad (2)$$

式中: E 和 ν_1 是铜毛细管的杨氏模量和泊松比。因为光纤紧密缠绕在铜毛细管表面, 铜毛细管的外半

径 r_2 变化 Δr_2 直接引起两倍缠绕光纤长度 l 变化 Δl , 相关关系为

$$\frac{\Delta r_2}{r_2} = \frac{\Delta l}{l}. \quad (3)$$

考虑到光纤的光弹效应和传感光纤的长度变化, 声压引起的相移 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi = knl \left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta l}{l} \right) = \left\{ 1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \nu_f (p_{11} + p_{12})] \right\} kn \Delta l = \frac{0.79 knl}{E} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \nu_1 \right) \Delta P, \quad (4)$$

式中: k, n 和 ν_f 分别是光的传播常数、光纤折射率和泊松比; p_{11} 和 p_{12} 是光纤纤芯的弹光系数。

忽略缠绕光纤对铜毛细管的影响, 光纤麦克风的结构共振频率可以表示为^[18]

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_m}{M_m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E\pi(r_2^2 - r_1^2)}{L\rho V_{\text{eff}}}}, \quad (5)$$

式中: K_m 和 M_m 是铜毛细管的等效弹性系数和等效质量; L, ρ 和 V_{eff} 分别是铜毛细管的长度、密度和有效体积。采用相位载波微分交叉相乘 (PGC-DCM) 解调方案^[19] 的电压灵敏度可以表示为

$$S = S_0 \frac{f_m^2}{\left[(f^2 - f_m^2)^2 + \left(\frac{ff_m}{Q} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (6)$$

$$S_0 = \frac{\zeta R B^2 G H J_1(C) J_2(C) \Delta \phi}{\Delta P} = \frac{0.79 \zeta R B^2 G H J_1(C) J_2(C) k n l}{E} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \nu_1 \right), \quad (7)$$

式中: Q 是光纤麦克风与阻尼相关的力学品质因子; f 是声压频率; S_0 是远低于光纤麦克风共振频率处的灵敏度; ζ 和 R 分别是光电探测器的光电转换系数和等效电阻; G 和 H 分别是一倍频和二倍频的幅值; $J_1(C)$ 和 $J_2(C)$ 分别是一阶和二阶第一类贝塞尔函数。

光声池的一阶纵向共振频率和腔内声压可以表示为^[20]

$$f_{100} = \frac{v}{2L_{\text{eff}}} = \frac{v}{2\left(L + \frac{16r_1}{3\pi}\right)} = \frac{1}{2\left(L + \frac{16r_1}{3\pi}\right)} \sqrt{\frac{\gamma K}{M}} T, \quad (8)$$

$$P_{\text{PA}} = \left| \frac{i f (\gamma - 1) C_{\text{gas}} \alpha P_{\text{laser}}}{2\pi^2 r_1^2 \left(f_{100}^2 - f^2 + i \frac{f f_{100}}{Q_{100}} \right)} \right|, \quad (9)$$

式中: γ 是载气的比热比; L_{eff} 是光声池共振管的有效长度; v 是载气中的声速; K 是气体常数; M 是载气摩尔质量; T 是热力学温度; α 是气体分子吸收系

数; C_{gas} 是气体浓度; P_{laser} 是激励激光的光功率; Q_{100} 是光声池的品质因子。

在共振光声光谱系统中, 结合(6)式和(9)式, 当光声信号调制频率满足 $f = f_m$ 时, 光声信号输出电压可表示为

$$V = S P_{\text{PA}} = \frac{f_m (\gamma - 1) C_{\text{gas}} \alpha P_{\text{laser}}}{2\pi^2 r_1^2 \sqrt{(f_{100}^2 - f_m^2)^2 + \left(\frac{f_m f_{100}}{Q_{100}}\right)^2}} Q S_0. \quad (10)$$

3 光纤麦克风设计和制作

在一个标准大气压、温度为 15 °C 时, 共振管的纵向共振频率和其长度与内半径的关系如图 2(a) 所示, 长度和内半径越小, 纵向共振频率越高。由(10)式可知, 光纤麦克风系统输出的光声信号电压随共振管内径减小和长度增大而增大。但是共振管的内径不能过小, 否则会增加激励激光的光束准直难度, 同时也增加了缠绕在共振管上光纤的损耗。共振管的长度也不能过长, 否则纵向共振频率将过低, 容易受环境噪声的影响, 同时也降低了便携性。综合以上分析, 将共振管的长度和内半径确定为 100 mm 和 1.8 mm, 在一个标准大气压下其一阶纵向共振频率和温度的关系如图 2(b) 所示, 在温度为 15 °C 时, 其一阶纵向共振频率为 1651 Hz。

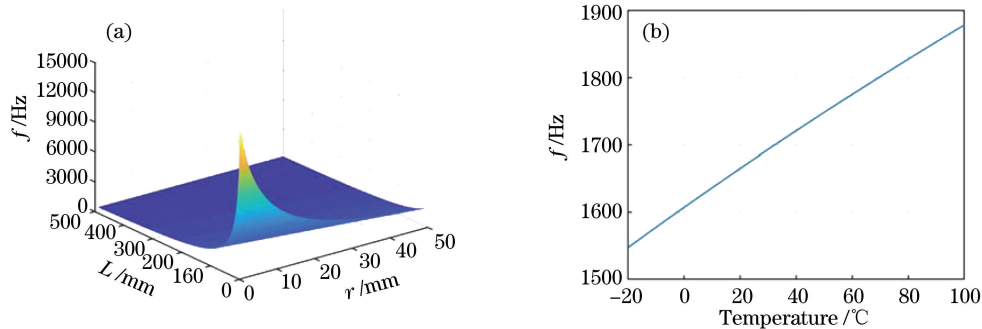


图 2 在 101.325 kPa、15 °C 下光声池仿真结果。(a) 光声池一阶纵向共振频率和其共振管长度与内半径的关系;

(b) 101.325 kPa 下共振管长度和内半径为 100 mm 和 1.8 mm 时一阶纵向共振频率和温度的关系

Fig. 2 Simulated results of the photoacoustic cell at 101.325 kPa and 15 °C. (a) Longitudinal resonant frequency of the photoacoustic cell versus its length and inner radius; (b) longitudinal resonant frequency versus temperature when the length is 100 mm and inner radius is 1.8 mm

根据(10)式, 假设 $Q_{100} = 50$ 并将 $(\gamma - 1) \times C_{\text{gas}} \alpha P_{\text{laser}} Q S_0 / (2\pi r_1^2)$ 归一化为 1, 归一化后的光声信号电压与光纤麦克风的共振频率的关系如图 3 所示, 由图可知, 当麦克风的结构共振频率和光声池的一阶纵向共振频率相等时, 系统工作在双共振状态, 输出幅值最大。但由图 2(b) 可知, 光声池的共振频率随着温度

增加而变大, 因此需要对温度和湿度进行严格控制以实现双共振的工作状态, 但这将导致系统复杂。由于光纤麦克风的结构共振频率受温度和湿度等环境因素的影响可以忽略, 故设光纤麦克风的共振频率和光声信号调制频率相等, 且略低于光声池的一阶纵向共振频率, 此时系统工作在较稳定的准双共振状态。

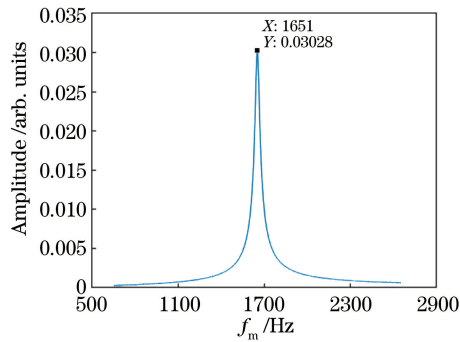


图 3 光纤麦克风系统输出光声信号电压与麦克风共振频率的关系

Fig. 3 Output voltage of the microphone versus its resonant frequency

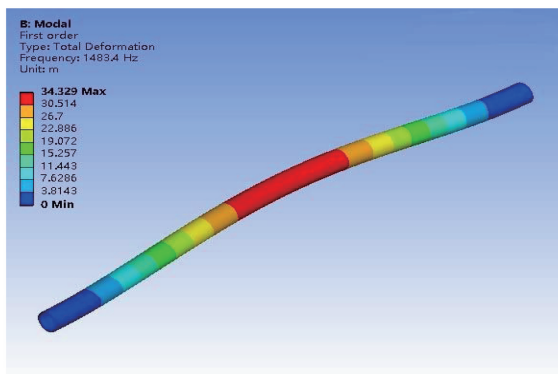


图 4 光纤麦克风一阶结构共振模式的变形

Fig. 4 Deformation of the first order resonant mode for the fiber optic microphone

在共振管长度和内半径确定情况下,由(5)式可知,共振管的杨氏模量越小,外半径越小,密度越大,光纤麦克风的结构共振频率越小。综合分析后,选择黄铜毛细管作为共振管并将外半径设置为 2 mm。在两端固定支撑条件下,铜毛细管的有限元模态分析结果如图 4 所示,光纤麦克风的结构共振频率为 1483 Hz,两端形变为 0,越靠近铜毛细管中心位置,形变越大。

根据以上分析结果制作光纤麦克风,首先将 10 m 长的纤芯、包层和涂覆直径分别为 4.2, 50, 110 μm 的单模光纤(Fibercore SM1500)绕制在铜毛细管上,两端各留 20 mm 的距离不缠绕光纤,同时在绕制过程中沿光纤径向施加 0.5 N 的张力,如图 5(a)所示,绕制后的光纤损耗为 7.4 dB,接着和图 5(a)插图中的工作波长为 1550 nm 的小法拉第旋转镜(直径:2.5 mm,长:12 mm)熔接;光声池的缓冲腔长度和直径选择为 50 mm 和 26 mm,外直径和内管直径选择为 40 mm 和 10 mm,将缠绕了光纤的铜毛细管两端插入外直径为 10 mm、内直径为 4 mm、长为 5 mm 的短铝管中,接着再插入光声池的内管中,如图 5(b)所示。参考文献[21]的方案,铜毛细管和光声池内管之间用空气衬底来提高灵敏度且使传感光纤与环境噪声隔离;将传感臂光纤的一端从端盖中穿出并和 3 dB 光纤耦合器、法拉第旋转镜熔接成一个光纤迈克耳孙干涉仪,其中参

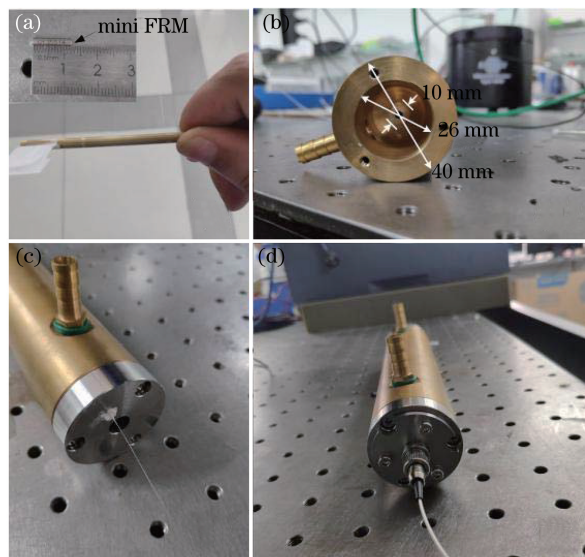


图 5 光纤麦克风制作过程。(a)小法拉第旋转镜及缠绕超细光纤的铜毛细管;(b)插入铜毛细管的光声池;(c)封装在光声池的光纤麦克风的右视图;(d)封装在光声池的光纤麦克风的左视图

Fig. 5 Fabrication process of the fiber optic microphone. (a) A mini FRM and the copper capillary tube wrapped with an ultra-thin fiber; (b) photoacoustic cell with inserted copper capillary tube; (c) left view of the fiber optic microphone integrated with the photoacoustic cell; (d) right view of the fiber optic microphone integrated with the photoacoustic cell

考臂长度为 5 cm,制作完成的麦克风的传感单元右视图如图 5(c)所示。目标气体的激励激光经过调制后可以从光声池左侧的准直器,透过氟化钙光窗,射入光声池的共振管内。固定准直器的法兰和端盖通过 3 个螺柱以及碟形弹簧连接,激励光的入射角度可以通过调节法兰上的 3 个螺柱的拧入深度、压缩碟形弹簧来调整,如图 5(d)所示。

4 实验结果与分析

4.1 实验测试装置

采用共振声谱法中的稳态法^[22]对共光声池腔的光纤麦克风的性能进行了测试,实验测试装置示意图如图 6 所示。测试中光声池的非出纤端帽被去除,并正对扬声器。使用 B & K PULSE Labshop 软件中的信号发生器产生正弦扫频激励信号,扫频范围设置为 100~5100 Hz。扫频信号通过数据转

换面板(B & K 3160-A-022)送入功率放大器进行放大,然后驱动消音测试箱(B & K Type 4232)中的扬声器产生激励声压。激励声压被参考麦克风(B & K Type 4192)标定。光纤麦克风光源采用实验室自制的窄线宽(<0.5 kHz)光纤激光器^[23],波长为 1550 nm,频率调制量为 3.9 MHz。光源出射光经环形器进入干涉仪,携带声压信号的干涉光被光电探测器转换成电压信号并送入 PGC-DCM 解调电路,解调出的信号被数据转换面板(B & K 3160-A-022)采集。通过软件中 Steady State Response(SSR)分析仪将参考麦克风和测试麦克风在激励频率处的声压幅值和电压幅值记录下来,其中 SSR 分析仪的分辨率设置为 1 Hz,扫描点数为 500,每个点间隔 10 Hz。SSR 分析仪可以对扫描声压幅值进行恒值设置,本文将激励声压幅值设置为 0.1 Pa (74 dB re 20 μ Pa)。

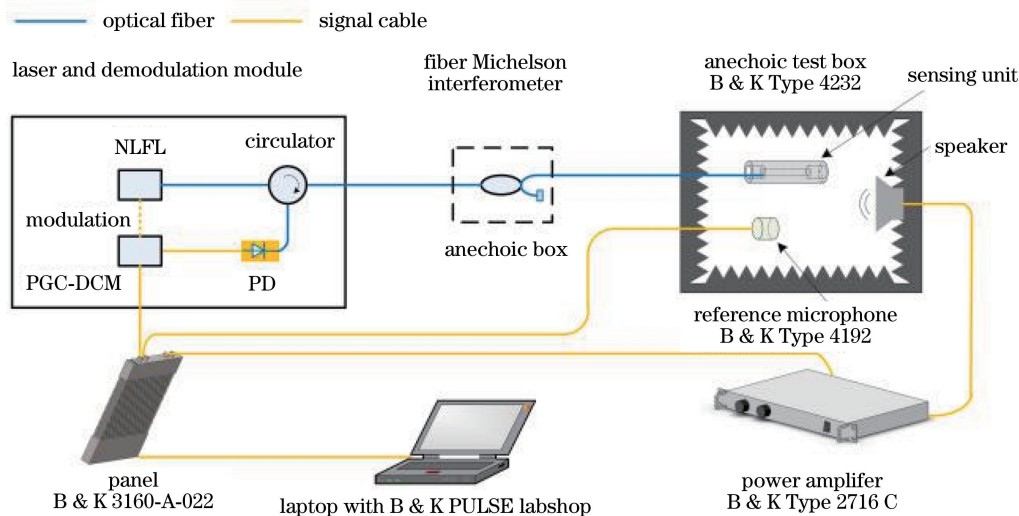


图 6 共光声池腔的光纤麦克风实验装置示意图

Fig. 6 Experimental setup of the fiber optic microphone integrated with a photoacoustic cell

4.2 实验结果和分析

参考麦克风和光纤麦克风的频率响应如图 7 所示,2020 年 6 月 14 日的测试结果如图 7(a)所示,参考麦克风在 100~5100 Hz 范围内实测激励声压的幅值为 0.1 Pa,光纤麦克风在 1443 Hz 和 1603 Hz 处出现了两个共振峰,分别对应光纤麦克风的结构共振频率和共振管的一阶纵向共振频率。2020 年 6 月 15 日的测试结果如图 7(b)所示,光纤麦克风在 1443 Hz 和 1643 Hz 处出现两个共振峰,分别对应光纤麦克风的结构共振频率和共振管的纵向共振频率。两次测试的共振频率与仿真值(1483 Hz 和 1651 Hz)略有偏差,主要原因是加工误差以及铜毛细管的参数(杨氏模量、密度等)存在偏差。两次实

验结果表明光纤麦克风的结构共振频率稳定,两次测试均为 1443 Hz,但共振管的共振频率随着环境(温度和湿度等)变化而略有变化,从 1603 Hz 变化为 1643 Hz。同时,两次测试中光纤麦克风分别在 250.3 Hz 和 270.4 Hz 处出现一个较大的共振峰,这是由于:测试时声压从一端进入共振管,从而激发了共振管的低频共振频率;当光声信号在共振管内产生时,不会出现低频共振峰。

保持消音测试箱外部环境安静的情况下,参考麦克风和光纤麦克风的本底噪声如图 8 所示。实验结果表明,光纤麦克风易受 300 Hz 以下的低频噪声的影响,但高频部分较为平坦。根据图 7 中所示的光纤麦克风电压幅值频率响应和图 8 的本底噪声,

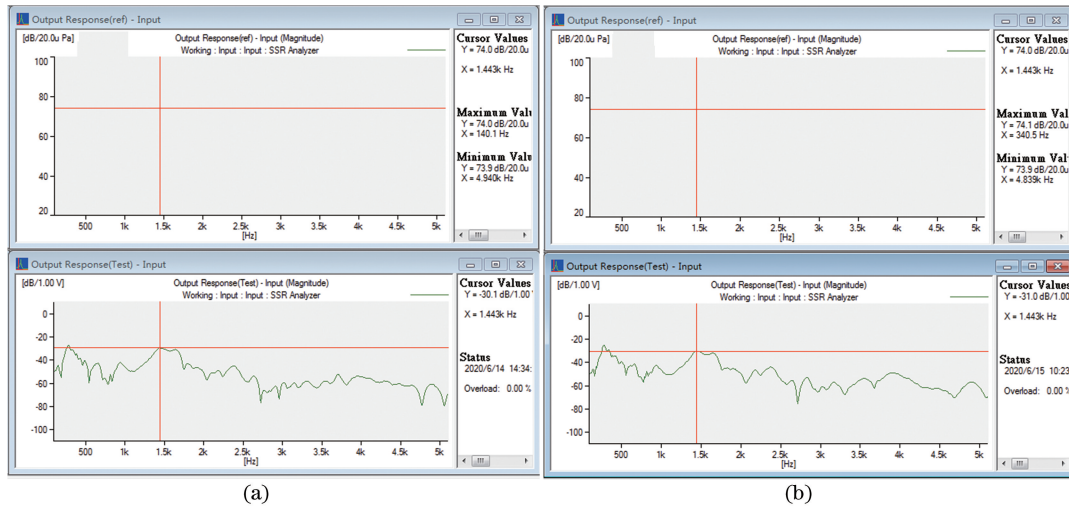


图 7 光纤麦克风在 0.1 Pa 声压(100~5100 Hz)激励下的输出电压响应。(a)2020 年 6 月 14 日;(b)2020 年 6 月 15 日
 Fig. 7 Output voltage response of the fiber optic microphone under the acoustic pressure of 0.1 Pa (100–5100 Hz).
 (a) 14th June, 2020; (b) 15th June, 2020

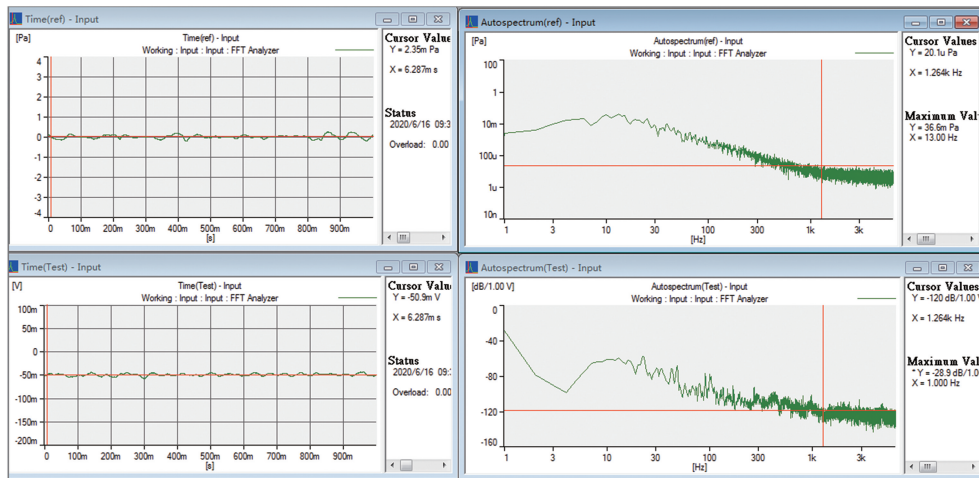


图 8 光纤麦克风在安静环境下的本底噪声
 Fig. 8 Noise factor of the fiber optic microphone in a quiet condition

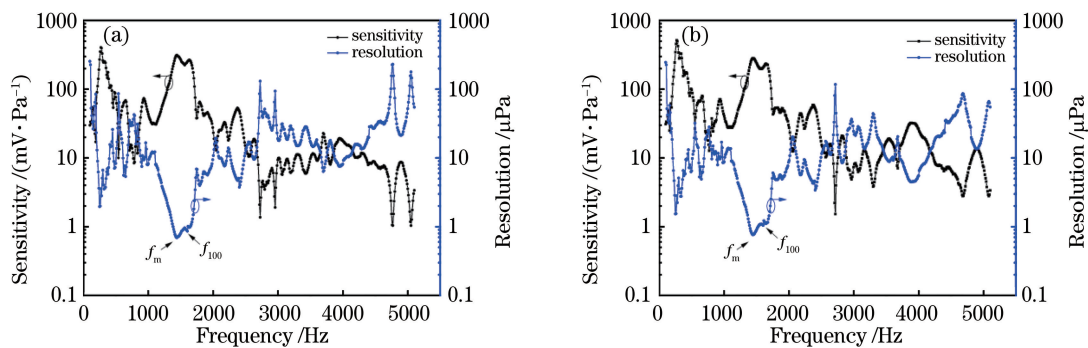


图 9 光纤麦克风测得的电压灵敏度、声压分辨率和声压频率的关系。(a) 2020 年 6 月 14 日;(b) 2020 年 6 月 15 日
 Fig. 9 Measured voltage sensitivity and acoustic pressure resolution of the fiber optic microphone versus the frequency.
 (a) 14th June, 2020; (b) 15th June, 2020

计算得到光纤麦克风的电压灵敏度和最小可检测声压,如图 9 所示。图 9(a)是 2020 年 6 月 14 日的测试

结果,光纤麦克风结构共振频率处的电压灵敏度为 312 mV/Pa,最小可检测声压为 0.69 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

图 9(b)2020 年是 6 月 15 日的测试结果, 光纤麦克风结构共振频率处的电压灵敏度为 283 mV/Pa, 最小可检测声压为 $0.76 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。光纤麦克风的理论电压灵敏度和最小可探测声压为 3.44 mV/Pa 和 $62.5 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$, 因此两次测得的光纤麦克风在结构共振频率处的 Q 值分别为 90.57 和 82.23。这是由于环境温度等因素变化, 引起共振管的一阶纵向共振频率从 1603 Hz 变化为 1643 Hz, 导致光纤麦克风结构共振频率处声压放大倍数降低。

在激励声压频率为 1 kHz 时, 改变激励声压幅值大小, 光纤麦克风在 1 kHz 处输出电压幅值如图 10 所示。在 5 mPa~3 Pa 声压范围内, 电压幅值响应呈线性, 线性度为 99.98%。

为了测试光纤麦克风的动态范围, 使用 B & K PULSE Labshop软件的总谐波失真(THD)测量功能。

继续增大 1 kHz 激励声压的幅值至 10.4 Pa, 此时实测总谐波失真为 0.999%, 如图 11 所示。此时光纤麦克风在 1 kHz 处的电压幅值为 -7.48 dB, 本底噪声为 -120 dB, 因此实测动态范围为 112.52 dB(1% THD)。

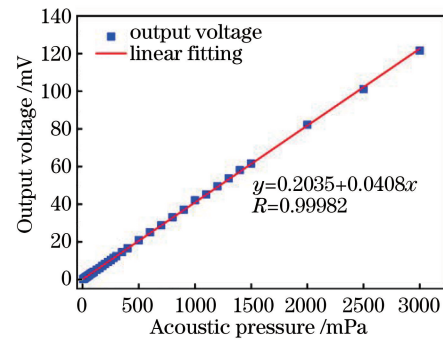


图 10 光纤麦克风输出电压和激励声压(@1 kHz)幅值关系
Fig. 10 Output voltage of the fiber optic microphone versus the amplitude of acoustic pressure at 1 kHz

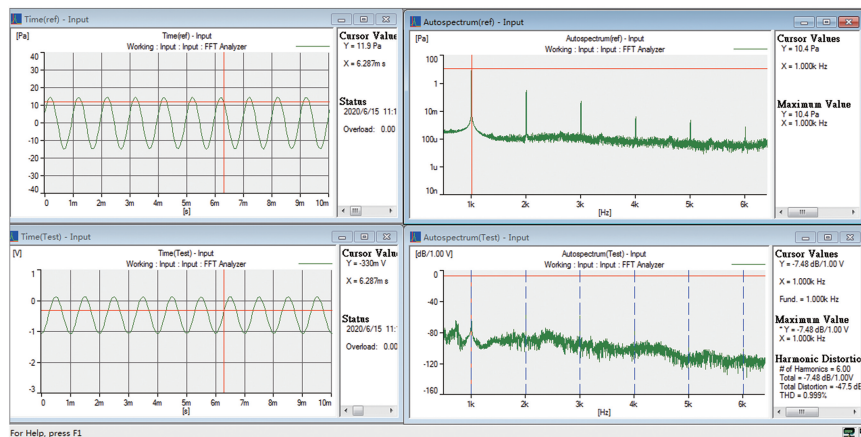


图 11 光纤麦克风的动态范围(@1 kHz)
Fig. 11 Dynamic range of the fiber optic microphone at 1 kHz

5 结 论

提出一种共光声池腔的芯轴型空气衬底光纤麦克风。光纤麦克风采用光纤迈克耳孙干涉仪结构、共光声池共振管、芯轴型空气衬底设计, 并使用相位载波解调方案。针对结构共振频率稳定的特点, 光纤麦克风的结构共振频率和光声池的一阶纵向共振频率分别设计为 1483 Hz 和 1651 Hz 以实现准双共振。实验结果表明, 该麦克风的结构共振频率稳定, 实测的结构共振频率为 1443 Hz, 最小可检测声压为 $0.69 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在 1 kHz 处, 声压电压响应线性度为 99.98% (5mPa~3 Pa), 动态范围为 112.52 dB (1% THD)。该共光声池共振管光纤麦克风为高温、易爆和高电磁干扰等特殊环境中痕量气体检测提供了新的工具。

参 考 文 献

- [1] Bell A G. On the production and reproduction of sound by light [J]. American Journal of Science, 1880, 20: 305-324.
- [2] Ma F, Zeng Y, Du C W, et al. Soil variability description using Fourier transform mid-infrared photoacoustic spectroscopy coupling with RGB method[J]. Catena, 2017, 152: 190-197.
- [3] Cheng G, Chen J J, Cao Y N, et al. Influence of cylindrical photoacoustic cell structure and environmental factors on acoustic eigenfrequency[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 0230001. 程刚, 陈家金, 曹亚南, 等. 圆柱形光声池结构及环境因素对声学本征频率的影响[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 0230001.
- [4] Cao Y, Xie Y C, Wang R F, et al. Recent advances

- of photoacoustic spectroscopy techniques for gases sensing[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 1152-1159.
- 曹渊, 解颖超, 王瑞峰, 等. 光声光谱气体传感技术研究进展[J]. *应用光学*, 2019, 40(6): 1152-1159.
- [5] Chen Y, Gao G Z, Cai T D. Detection technique of ethylene based on photoacoustic spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0511001.
- 陈颖, 高光珍, 蔡廷栋. 基于光声光谱的乙烯探测技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0511001.
- [6] Chen K, Yuan S, Gong Z F, et al. Ultra-high sensitive photoacoustic spectrometer for trace gas detection based on fiber-optic acoustic sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328015.
- 陈珂, 袁帅, 宫振峰, 等. 基于光纤声波传感的超高灵敏度光声光谱微量气体检测[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328015.
- [7] Ma F X, Tian Y, Chen K, et al. Technique for detection of dissolved gas in oil based on miniature photoacoustic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0730003.
- 马凤翔, 田宇, 陈珂, 等. 基于微型光声传感器的油中溶解气体检测技术[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0730003.
- [8] Dewey C F, Jr, Kamm R D, Hackett C E. Acoustic amplifier for detection of atmospheric pollutants [J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 23(11): 633-635.
- [9] Kosterev A A, Bakirkin Y A, Curl R F, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(21): 1902-1904.
- [10] Leslie D H, Trusty G L, Dandridge A, et al. Fibre-optic spectrophone [J]. *Electronics Letters*, 1981, 17(17): 581-582.
- [11] Breguet J, Pellaux J P, Gisin N. Photoacoustic detection of trace gases with an optical microphone [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1995, 48(1): 29-35.
- [12] Wilcken K, Kauppinen J. Optimization of a microphone for photoacoustic spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 2003, 57(9): 1087-1092.
- [13] Chen K, Yu Z, Yu Q, et al. Fast demodulated white-light interferometry-based fiber-optic Fabry-Perot cantilever microphone [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3417-3420.
- [14] Chen K, Deng H, Guo M, et al. Tube-cantilever double resonance enhanced fiber-optic photoacoustic spectrometer [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 123: 105894.
- [15] Rao Q M, Zhang Q, Xin X J, et al. Fiber acoustic sensor resisting temperature interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1306002.
- 饶俏萌, 张琦, 忻向军, 等. 抗温度干扰光纤声传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1306002.
- [16] Peng B J, Liao M, Liao Y B, et al. Study on measuring sensitivity of fiber-optic hydrophone [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(11): 1633-1638.
- 彭保进, 廖茂, 廖延彪, 等. 光纤水听器灵敏度测试研究[J]. *光子学报*, 2005, 34(11): 1633-1638.
- [17] Murray M J, Davis A, Redding B. Fiber-wrapped mandrel microphone for low-noise acoustic measurements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3205-3210.
- [18] Pechstedt R D, Jackson D A. Design of a compliant-cylinder-type fiber-optic accelerometer: Theory and experiment [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(16): 3009-3017.
- [19] Dandridge A, Tveten A, Giallorenzi T. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(10): 1647-1653.
- [20] Miklós A, Hess P, Bozöki Z. Application of acoustic resonators in photoacoustic trace gas analysis and metrology [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(4): 1937-1955.
- [21] Yun Z Q, Luo H, Hu Z L, et al. Fiber optic hydrophone used for thin line towed array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1206004.
- 运朝青, 罗洪, 胡正良, 等. 应用于拖曳细线阵的光纤水听器研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1206004.
- [22] Yang Z Y, Lu R J, Wang S C. Measurement method of resonance frequency for longitudinal resonant photoacoustic cells [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(3): 387-391.
- 杨志远, 卢荣军, 王生春. 一种纵向共振光声池谐振频率测量方法[J]. *激光技术*, 2019, 43(3): 387-391.
- [23] Yu B L, Qian J R, Luo J T, et al. Stable single-frequency fiber ring laser with linewidth less than 0.5 kHz [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(4): 345-348.
- 俞本立, 钱景仁, 罗家童, 等. 线宽小于 0.5 kHz 稳态的单频光纤环形腔激光器[J]. *量子电子学报*, 2001, 18(4): 345-348.