

引用本文:殷泽轩. 球拍型悬臂梁光纤 Fabry-Perot 腔声传感器的研究[J]. 光通信技术,2025,49(4):19-23.

球拍型悬臂梁光纤 Fabry-Perot 腔声传感器的研究

殷泽轩

(西安石油大学 理学院, 西安 710065)

摘要:为提高光纤法布里-珀罗(F-P)腔声传感器的灵敏度,设计了一种球拍型悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器。首先,基于 COMSOL 仿真软件对悬臂梁进行模态分析和尺寸优化;其次,采用激光加工技术制备了 304 不锈钢材质的球拍型悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器,并通过显微测量验证了加工精度;最后,搭建声学测试系统,在 20~3 000 Hz 频率范围内对传感器的性能进行测试。实验结果表明:该传感器的谐振频率为 1 750 Hz,在 400~3 000 Hz 范围内灵敏度均高于 350 mV/Pa;在 1 400 Hz 工作频率下,0.01~0.17 Pa 声压范围内的灵敏度达到 3 619.57 mV/Pa,线性度为 0.999 8,信噪比(SNR)为 49.1 dB,最小可检测声压(MDP)为 15.03 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

关键词:法布里-珀罗腔;声传感器;球拍型悬臂梁;谐振频率;最小可检测声压

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)04-0019-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on fiber Fabry-Perot cavity acoustic sensor of racket type cantilever beam

YIN Zexuan

(College of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: To enhance the sensitivity of fiber Fabry-Perot (F-P) cavity acoustic sensors, a novel racket-shaped cantilever fiber F-P cavity acoustic sensor was designed. First, modal analysis and dimensional optimization of the cantilever were performed using COMSOL simulation software. Subsequently, a racket-shaped cantilever fiber F-P cavity acoustic sensor made of 304 stainless steel was fabricated via laser processing technology, with its machining accuracy verified through microscopic measurements. Finally, an acoustic testing system was established to evaluate the sensor's performance across a frequency range of 20~3 000 Hz. Experimental results demonstrate that the sensor exhibits a resonant frequency of 1 750 Hz, with sensitivity exceeding 350 mV/Pa over the 400~3 000 Hz range. At the operational frequency of 1 400 Hz, the sensitivity reaches 3 619.57 mV/Pa under acoustic pressures of 0.01~0.17 Pa, with a linearity of 0.999 8, a signal-to-noise ratio (SNR) of 49.1 dB, and a minimum detectable pressure(MDP) of 15.03 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$.

Key words: Fabry-Perot cavity, acoustic sensor, racket-type cantilever beam, resonant frequency, minimum detectable sound pressure

0 引言

光纤法布里-珀罗(F-P)传感器因其高灵敏度和强大的抗干扰能力,在多个领域如医疗检测^[1]、水声探

测^[2]、电力监测^[3-5]、油气管道检测^[6-8]以及地震检波^[9]中得到了广泛应用。其中,非本征法 F-P 干涉仪(EFPI)是目前技术最成熟且应用最广泛的一种器件。EFPI 传感器通常由一个光纤端面和一个声学传感膜片组成。根据不同的应用场景和需求,声学传感膜片可以设计为封闭薄膜或悬臂式膜片。悬臂式膜片的设计形式多样,包括矩形、U 型和三角形等形状。KAUPPINEN J 等人^[10]最早将硅微悬臂梁光学声传感器应用于声光光谱系统,提出了悬臂式增强型声光光谱(CEPAS)检测方案。2016 年,张晓星等人^[11]采用硅微悬臂梁传声器构

收稿日期:2024-11-18。

作者简介:殷泽轩(1997—),男,陕西省西安人,2019 年毕业于齐齐哈尔大学电子与通信工程系电子信息专业,现为西安石油大学理学院硕士研究生,主要研究方向为声光光谱气体传感技术、光纤声波传感器、光纤传感、单片机、嵌入式技术等。



殷泽轩:球拍型悬臂梁光纤 Fabry-Perot 腔声传感器的研究

建了痕量气体检测系统,对 H_2S 气体的检测下限达 8.4×10^{-7} 。2020 年,CHEN K 等人^[12]开发了管-悬臂双共振增强光纤光声光谱技术,通过声谐振管和悬臂的谐振频率匹配实现灵敏度提升。同年,杨天荷等人^[13]基于悬臂梁光纤 F-P 声传感器实现了对乙炔气体的检测,线性拟合度为 0.99,检测极限为 1.5×10^{-8} 。2022 年,于清旭课题组^[14]优化的硅悬臂结构在 2 500 Hz 和 3 233 Hz 下分别实现 1 506 nm/Pa 和 26 773 nm/Pa 的灵敏度,最小可检测声压(MDP)达 $0.93 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 。2023 年,郑怡雯等人^[15]制备的硅橡胶微悬臂梁传感器在 300 Hz 下灵敏度达 675 mV/Pa,线性拟合度为 0.994。目前,悬臂式光纤麦克风多采用矩形悬臂梁设计,其灵敏度受限于受压面积和反光面积。

因此,本文设计一种球拍型悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器,以突破现有传感器的性能限制。

1 非本征光纤 F-P 腔膜片式传感器原理

非本征光纤 F-P 腔由光纤端面与非光纤反射膜构成。当外界声压作用时,反射膜产生位移,导致腔长和光程差变化,进而调制干涉光强。通过解调该光强信号即可实现高灵敏度测量,其位移检测灵敏度可达纳米量级。这种微型干涉结构兼具高灵敏度和紧凑尺寸的特点,尤其适用于动态声波检测应用场景。非本征光纤 F-P 腔原理图如图 1 所示。

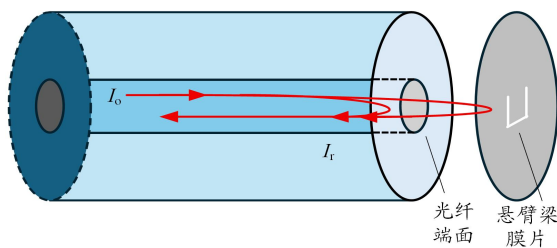


图 1 非本征光纤 F-P 腔原理图

由于膜片的有效反射率较低,因此在光纤端面和膜片表面间的干涉可以近似为双光束干涉^[16],如式(1)所示。

$$I_r = 2I_0 \left[1 + \gamma \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} (d_0 + \Delta d \sin(\omega t)) + \pi \right) \right] \quad (1)$$

其中, I_0 是入射光的强度, I_r 是反射光的强度, γ 是条纹可见度, λ 是激光的波长, d_0 是静态腔长, Δd 是腔长变化的幅度, ω 是声压的角频率, t 是时间。

悬臂梁具有多种振动模态,其第一阶谐振可采用谐振子形式的一维质点模型近似替代三维结构模型,其运动方程为

$$m\ddot{x} + D\dot{x} + kx = F_{\text{ex}}(t) \quad (2)$$

其中, m 是有效质量, D 是阻尼系数, k 是悬臂的有效弹簧常数, $F_{\text{ex}}(t)$ 是作用在悬臂梁上的外力, x 为悬臂梁的自由端相对于平衡点的位移。一阶谐振频率^[17]可以表示为

$$\omega_0 = \frac{(1.875)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EW^3}{12\rho}} \quad (3)$$

其中, ρ 为悬臂梁的密度, L 为悬臂梁后端矩形长度, W 为悬臂梁厚度。对于 304 不锈钢材料, 杨氏模量 $E=193 \text{ GPa}$, 密度 $\rho=7.93 \text{ g/cm}^3$ 。

2 球拍型悬臂梁膜片模型仿真

传统矩形悬臂梁的光纤 F-P 腔声传感器在灵敏度和谐振频率方面受限于其几何结构^[18]。为此,本文提出一种球拍型悬臂梁设计,其结构如图 2 所示。图中, R 表示为膜片的半径, H 为悬臂梁后端矩形宽度, r 为悬臂梁前端圆形半径。本文设计的前端圆形结构可显著增大反射面积(提升约 40%),确保激光光斑完全覆盖。基于 COMSOL 仿真,通过参数化扫描确定关键尺寸,使谐振频率优化至 1 400 Hz 的目标值。

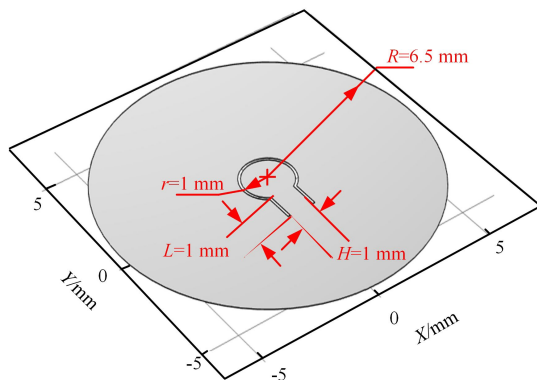


图 2 球拍型悬臂梁膜片结构图

2.1 球拍型悬臂梁模态分析

本文使用 COMSOL 仿真软件对球拍型悬臂梁进行谐振频率仿真,添加压力声学-特征频率物理场研究,悬臂梁材料添加为 304 不锈钢。经仿真,球拍型悬臂梁的前 6 阶谐振频率所对应的谐振模态仿真图如图 3 所示。球拍型悬臂梁的 1~6 阶谐振模态对应的谐振频率分别为 756, 2 769, 5 652, 14 002, 14 378, 21 323 Hz。图中,浅绿色表示振动位移小,深蓝色表示振动位移大。当悬臂梁膜片工作在 2~6 阶谐振模态时,声场能量激发的振动呈现多节点分布特征,振动发生的面积较

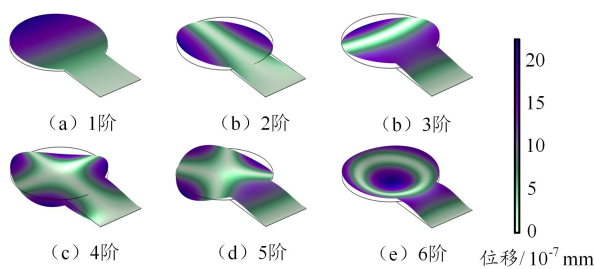
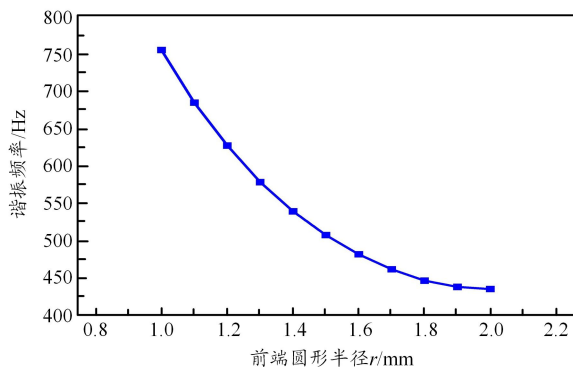


图3 悬臂梁前6阶谐振模式仿真图

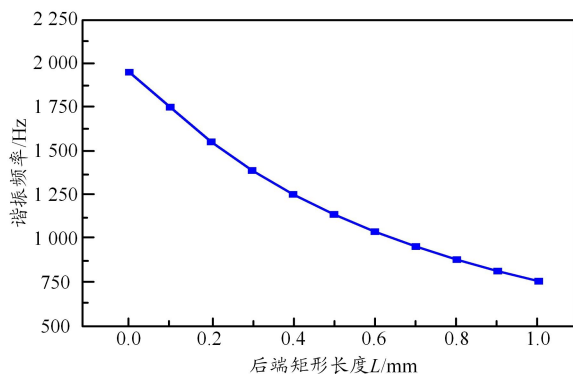
小;而在1阶共振模式下,振动能量集中表现为悬臂梁前端圆形区域产生最大位移,且有效振动面积显著增大。因此,在悬臂梁1阶谐振模式下振动时,所得信号强度更强,灵敏度也更高。

2.2 球拍型悬臂梁尺寸的优化

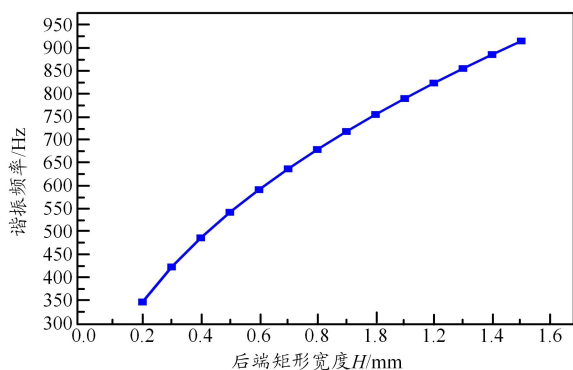
本研究采用控制变量法,通过仿真分析了前端圆形半径 r 、后端矩形长度 L 、宽度 H 以及膜片厚度 W 对谐振频率的影响,结果如图4所示。从图4(a)可以看出,随着前端圆形半径 r 递增,膜片的谐振频率呈递减态势。从图4(b)可以看出,膜片的谐振频率随悬臂梁后端矩形长度 L 增加而递减。在 $L=0.3\text{ mm}$ 时,悬臂梁的一阶谐振频率为 $1\,387\text{ Hz}$ 。从图4(c)可以看出,随后端矩形宽度 H 的增加,悬臂梁的谐振频率成递增



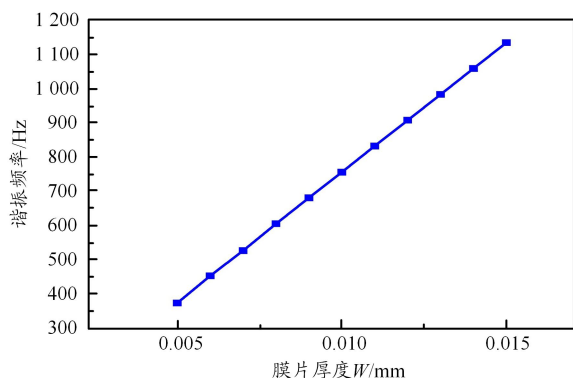
(a) 悬臂梁前端圆形半径与1阶谐振频率关系图



(b) 悬臂梁后端矩形长度与1阶谐振频率关系图



(c) 悬臂梁后端矩形宽度与1阶谐振频率关系图



(d) 悬臂梁厚度与1阶谐振频率关系图

图4 球拍型悬臂梁尺寸对谐振频率的影响

趋势,但是变化仅在 $350\sim 950\text{ Hz}$,变化范围较小。从图4(d)可以看出,随悬臂梁膜片厚度 W 的增加,悬臂梁的谐振频率成递增趋势,变化在 $350\sim 1\,150\text{ Hz}$ 。

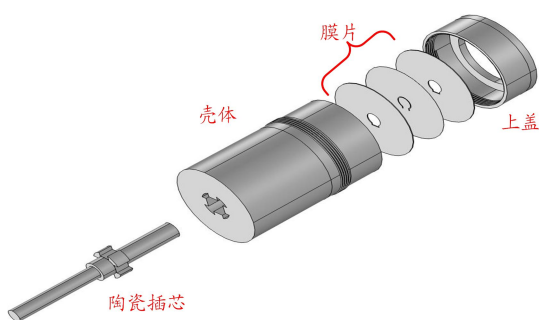
3 传感器制作与性能测试

3.1 传感器制作

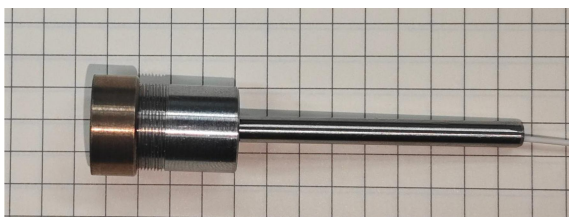
光纤 F-P 腔声传感器由陶瓷插芯、壳体、膜片和上盖组成,其结构图如图5(a)所示。该传感结构采用激光加工技术制备球拍型悬臂梁膜片,传感膜片的核心部件由3层不锈钢结构组成:中间为悬臂薄膜,两侧各有1个 $100\text{ }\mu\text{m}$ 厚的圆形夹片,通过冷焊工艺点焊成型。悬臂梁内表面与光纤端面构成非本征 F-P 干涉仪。封装壳体采用螺纹连接设计,由上盖和套筒组成。装配时先将膜片组件置入上盖,再旋紧套筒完成整体组装。这种结构设计既保证了悬臂梁的振动自由度,又实现了光学干涉腔的精确对准与稳定封装。球拍型悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器实物图如图5(b)所示。传感器头直径为 12.9 mm ,总长为 21.9 mm 。

由于悬臂梁尺寸很小,普通的激光打标机的精度较差,加工出的悬臂梁膜片与理论尺寸有所偏差,经电

殷泽轩：球拍型悬臂梁光纤 Fabry-Perot 腔声传感器的研究



(a) 悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器结构图



(b) 悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器实物图

图 5 球拍型悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器结构图和实物图

子显微镜测量,该结构前端圆形直径为 2.010 mm,后端矩形尺寸为 0.254 mm(长)×1.028 mm(宽)。将该尺寸导入 COMSOL 模型中得到该尺寸的悬臂梁第一阶谐振频率为 1 458.6 Hz,其模态振型如图 6 所示。

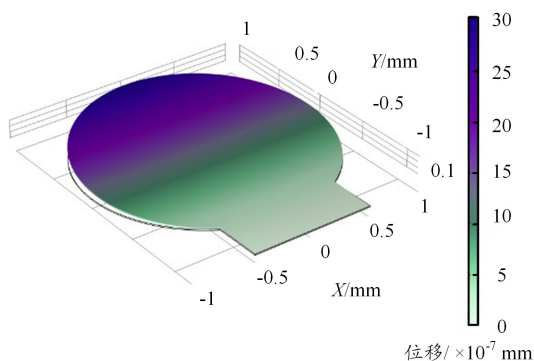


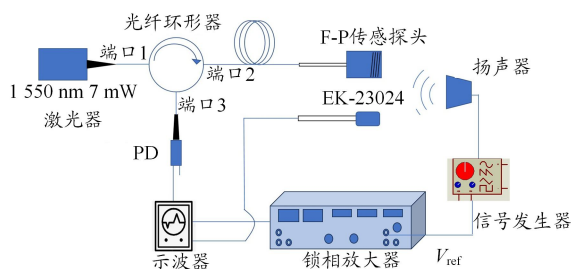
图 6 悬臂梁膜片仿真的模态振型

在使用激光加工过程中,材料会经历一个快速升温至其熔点(例如 1 400 ℃)随后在空气中冷却的过程。此过程可能导致材料的杨氏模量和密度发生变化,这些变化属于材料属性的变化,会对悬臂梁的频率响应产生影响,进而引起谐振频率的改变。由于激光加工期间材料参数的变化,这种效应引入的误差范围大约为±15%。

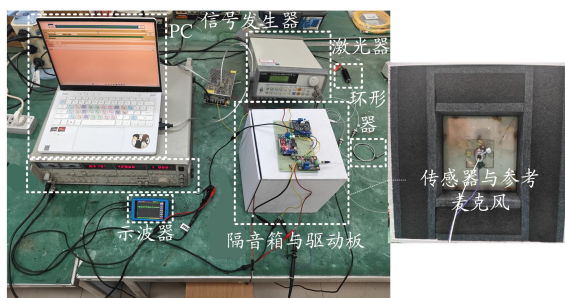
3.2 传感器性能测试

测试系统原理图如图 7(a)所示。本文采用中心波长为 1 550 nm、功率为 3 mW 的激光光源,通过光

纤环形器将激光导入非本征 F-P 腔声传感器,并将携带声波信息的光信号传输至光电探测器 (PD) 转换为电流信号,经电流/电压(I/V)转换放大模块处理为电压信号后,同步接入示波器和锁相放大器进行监测与解调;采用锁相放大器控制的扬声器作为标准声源,同时使用灵敏度 33 mV/Pa 的电容传声器 (EK-23024-000) 进行声压标定;实验时通过精密位移台调节传感器陶瓷插芯与膜片探头的相对位置,利用测微计精确控制 F-P 腔长,实测确定腔长 0.185 mm 为最佳工作点 Q 。测试系统实物图如图 7(b)所示。



(a) 悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器性能测试系统原理图

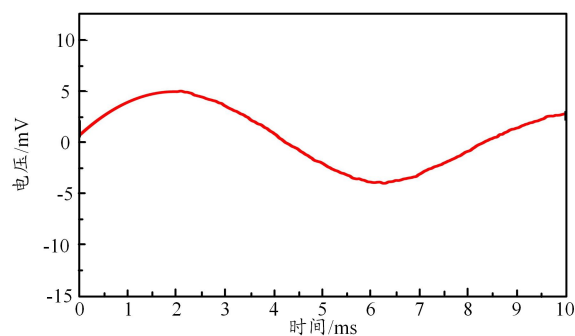


(b) 测试系统实物图

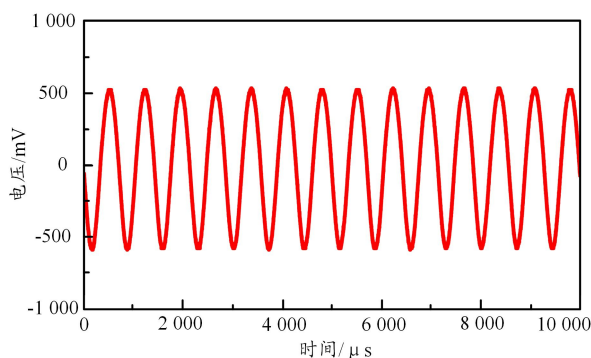
图 7 测试系统原理图与实物图

在 0.1 Pa 声压下,对悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器进行了多频段时域响应测试。通过信号发生器驱动扬声器依次产生 120、1 400、2 400、3 000 Hz 的激励声波(声压幅值恒定 0.1 Pa),利用示波器实时采集传感器的动态响应信号,如图 8 所示。可以看出,4 个测试频率对应的时域波形与正弦波较为接近,无波形畸变和倍频现象。这表明在此声压条件下,系统输出信号幅值完全处于声压响应的线性工作区间内。而当声压突破线性响应范围时,时域波形会出现明显的畸变,并伴随倍频成分。这一现象的产生,本质上是由于悬臂梁自由端的摆动幅度过大,超过了自由光谱范围所允许的 F-P 腔长变化阈值,导致系统工作点偏离线性区域。

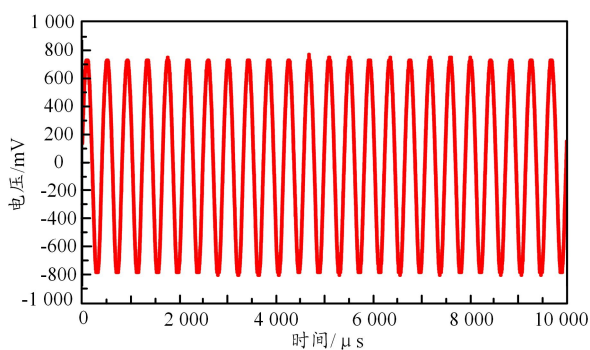
测试采用分段变频扫描策略:在 20~400 Hz 内,以 20 Hz 为步长进行扫描;在 400~1600 Hz 以及 1 900~3 000 Hz 内,以 100 Hz 为步长进行扫描;特别是在 1 600~



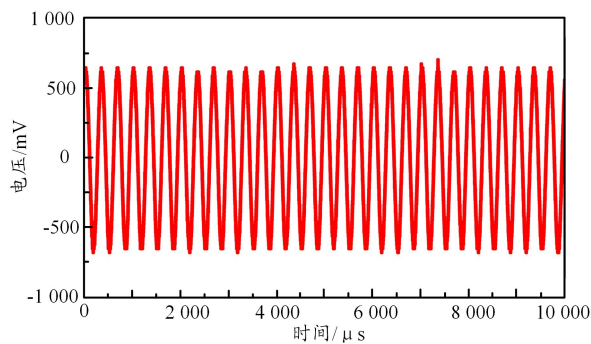
(a) 频率为 120 Hz



(b) 频率为 1400 Hz



(c) 频率为 2400 Hz

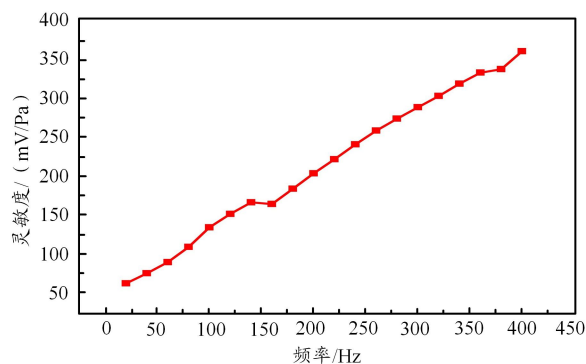


(d) 频率为 3000 Hz

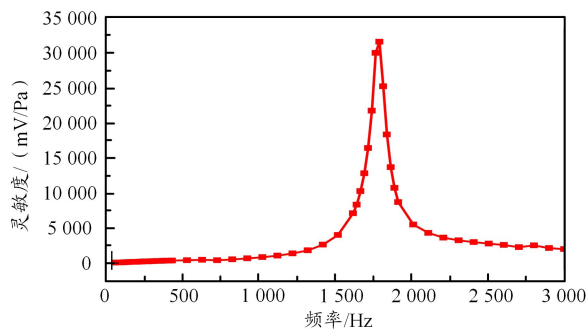
图 8 0.1 Pa 声压不同频率下悬臂梁光纤 F-P 声传感器的时域响应

1 900 Hz 内,以 25 Hz 为步长进行扫描。锁相放大器的时间常数设置为 30 ms,且具有 24 dB/倍频的滚降特性。测量悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器频率响应,结果如图 9 所示。从图 9(a)可以看出,在 20~400 Hz 的低频范围内,频率响应曲线接近线性,其灵敏度较低;从图 9(b)可以看出,在 400~3 000 Hz 内,传感器灵敏度均保持在 350 mV/Pa 以上,并在 1 750 Hz 附近出现显著峰值,该峰值对应悬臂梁的实际 1 阶谐振频率,与 COMSOL 仿真得到的 1 458.6 Hz 存在约 20% 的偏差,这主要源于激光加工过程中的材料热效应(杨氏模量变化 $\pm 15\%$)和几何尺寸加工误差的共同影响。而 1 400 Hz 处于频率响应的平坦区域,传感器受到频率漂移带来的影响较小,又能与 1 400 Hz 谐振频率的光声池实现最佳匹配,从而保证系统稳定性和检测灵敏度。

在 1 400 Hz 频率下,当声压从 0.01 Pa 增加到 0.17 Pa 时,球拍型悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器在的声压响应结果如图 10(a)所示。通过声压响应的实验结果进行线性拟合可得在 1 400 Hz 频率工作时其灵敏度为 3 619.57 mV/Pa,其声压响应线性度为 0.999 8。



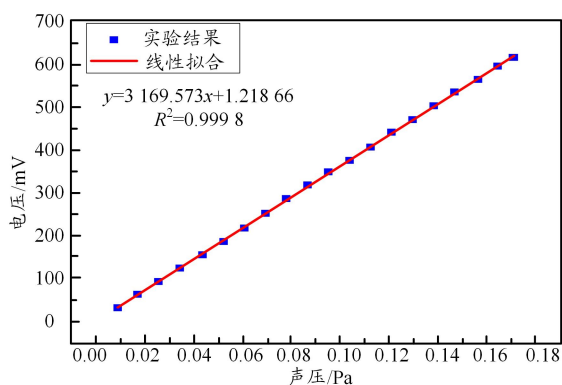
(a) 20~400 Hz 频率响应



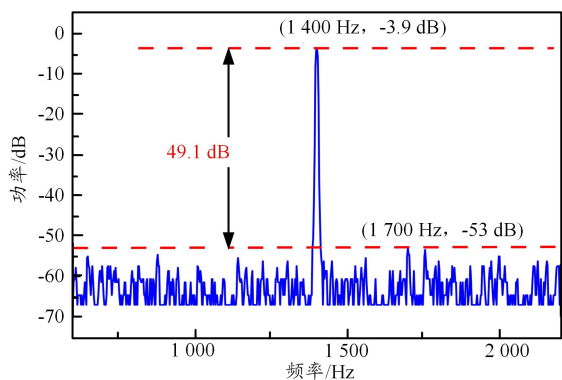
(b) 400~3000 Hz 频率响应

图 9 悬臂梁光纤声传感器的频率响应

殷泽轩：球拍型悬臂梁光纤 Fabry-Perot 腔声传感器的研究



(a) 悬臂梁光纤 F-P 腔传感器的声压响应



(b) 悬臂梁光纤 F-P 腔传感器功率谱

图 10 在 1 400 Hz、0.17 Pa 声压条件下,传感器的声压响应与功率谱图

悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器在 1 400 Hz、0.17 Pa 声压条件,通过示波器测量得到的悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器的功率谱如图 10(b)所示。在 250 Hz 频谱分辨率下,测量信噪比(SNR)约为 49.1 dB,经计算^[19]得到球拍型悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器在 1 400 Hz 频率的 MDP 为 $15.03 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

4 结束语

本文提出了一种球拍型悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器。该传感器设计用于悬臂增强型光声光谱系统的痕量气体检测中,可实现高灵敏度的声压检测。在 20~3 000 Hz 频率范围内测试球拍型悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器的频率响应。测试结果表明:悬臂梁光纤传感器的谐振频率约为 1 750 Hz,在 400~3 000 Hz 频率范围内悬臂梁光纤传感器的灵敏度均在 350 mV/Pa 以上。在 1 400 Hz、0.17 Pa 声压条件下测试悬臂梁传感器的声压响应,其灵敏度为 3 619.57 mV/Pa,线性度为 0.999 8,SNR 和 MDP 分别为 49.1 dB 和 $15.03 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 。本文提出的球拍型悬臂梁光纤 F-P 腔声传感器具有

不受电磁干扰,体积小巧,灵敏度高,便于安装等优点,在光声光谱学技术领域有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 孙嘉懿. 用于鼾声检测的光纤声波传感器研究[D]. 大连:大连理工大学,2022.
- [2] 邓虎,段慕白,叶林祥,等. 基于电磁式声波发射的环空液面连续监测技术研究与应用[J]. 钻采工艺,2024,47(4):56-64.
- [3] 刘卫东,刘宏祯,毕国轩,等. 声波在线测温系统在神头电厂 500MW 机组塔式锅炉中的应用[J]. 中国新技术新产品,2023(21):10-12.
- [4] 何梦阳. 结合光纤声波传感的电缆放电故障在线检测研究[D]. 焦作:河南理工大学,2023.
- [5] 李子帆,邹希岳,梁晓瑜,等. 无源无线应变传感器中压电材料接触力学模型研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(2):243-251.
- [6] 刘建冲,王立学,胡伟. 油气管道完整性在线检测技术研究进展[J]. 中国石油和化工标准与质量,2023,43(20):64-66,70.
- [7] 周怡娜. 基于变分模态分解算法的天然气管道多工况声波信号特征提取方法研究[D]. 大庆:东北石油大学,2024.
- [8] 尹渊博,李玉星,杨文,等. 成品油管道泄漏次声波监测及信号处理方法[J]. 油气储运,2024,43(8):905-915.
- [9] 邵志华,阴欢欢,王若晖,等. 地震物理模型光纤超声成像技术研究(特邀)[J]. 光子学报,2022,51(10):135-157.
- [10] KAUPPINEN J, WILCKEN K, KAUPPINEN I, et al. High sensitivity in gas analysis with photoacoustic detection[J]. Microchemical Journal, 2004, 76(1-2): 151-159.
- [11] 张晓星,李新,刘恒,等. 基于悬臂梁增强型光声光谱的 SF6 特征分解组分 H2S 定量检测[J]. 电工技术学报,2016,31(15):187-196.
- [12] CHEN K, DENG H, GUO M, et al. Tube-cantilever double resonance enhanced fiber-optic photoacoustic spectrometer[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 123: 105894.
- [13] 杨天荷,陈伟根,李志军. 基于悬臂梁光纤 F-P 腔传感器的光声光谱检测法及其对微量乙炔气体的检测[J]. 高电压技术,2020,46(6):1922-1928.
- [14] WU G, LI H, YE H, et al. Ultra-high-sensitivity, miniaturized Fabry-Perot interferometric fiber-optic microphone for weak acoustic signals detection[J]. Sensors, 2022, 22(18): 6948.
- [15] 郑怡雯,陈永璋,唐前浩,等. 飞秒激光加工微悬臂梁薄膜光纤声波传感器[J]. 光子学报,2023,52(10):216-226.
- [16] CHEN K, GONG Z, GUO M, et al. Fiber-optic Fabry-Perot interferometer based high sensitive cantilever microphone[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279: 107-112.
- [17] CHEN K, ZHOU X, GONG Z, et al. Research on fiber-optic cantilever-enhanced photoacoustic spectroscopy for trace gas detection[C]//SPIE. Proceedings of 2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems. SPIE, 2018: 54-60.
- [18] 闫星宇. 基于光声光谱技术的甲烷浓度检测关键性技术研究[D]. 西安:西安石油大学,2024.
- [19] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础(第三版)[M]. 南京:南京大学出版社,2012.