

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311975

基于 L 型轮辐结构膜片的窄频光纤 F-P 声波传感器研究*

王巧云^{1,2,3}, 闻 妲¹, 王纪龙¹, 严重越¹, 朱子恒¹

(1. 东北大学秦皇岛分校 秦皇岛 066004; 2. 东北大学秦皇岛分校 秦皇岛 066004;
3. 河北省微纳精密光学传感与检测技术重点实验室 秦皇岛 066004)

摘要: 光纤声传感器被广泛应用在工业、医疗等领域。为了提高光纤 F-P 声传感器的性能, 本文提出了一种 L 型轮辐结构的 F-P 传感膜片。膜片的厚度为 15 μm 、梁宽度为 0.5 mm、中心膜片的半径为 1 mm。膜片由激光加工技术在 304 不锈钢上刻蚀而成。实验对 1 000 Hz 下的传感器灵敏度进行研究, 将传感器应用于光声池共振频率为 1 600 Hz 的光声光谱气体检测系统中, 并实现对 50~100 $\times 10^{-6}$ 的乙炔 (C_2H_2) 气体浓度测量。实验结果表明, 该传感器在 1 000 Hz 下的声压灵敏度为 25.4 nm/Pa, 传感器可实现的最小可探测声压 (MDP) 为 38.2 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ @1 kHz, 声压信噪比为 76.8 dB。实验所得到的光声光谱二次谐波信号的峰值与乙炔浓度呈现良好的线性关系, 乙炔浓度的响应度为 1.8 $\text{pm}/10^{-6}$ 。该传感器在光声光谱等单频声信号检测领域具有广泛的应用前景。

关键词: 光纤声传感器; F-P 干涉; L 型轮辐结构; 光声光谱

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Study on narrow-frequency fiber-optic F-P acoustic wave sensor based on L-shaped spoke structure diaphragm

Wang Qiaoyun^{1,2,3}, Wen Da¹, Wang Jilong¹, Yan Chongyue¹, Zhu Ziheng¹

(1. Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 3. Hebei Key Laboratory of Micro-Nano Precision Optical Sensing and Measurement Technology, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Fiber optic acoustic sensors are widely used in industry, medical and other fields. In order to improve the performance of fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensors, a L-shaped spoke structure Fabry-Perot sensing diaphragm is proposed in this work. The thickness of the diaphragm is 15 μm , the width of the beam is 0.5 mm, and the radius of the center diaphragm is 1 mm. The diaphragm is etched on 304 stainless steel by laser processing technology. In the experiment, the sensitivity of the sensor at 1 000 Hz was investigated, and the sensor was applied to a photoacoustic spectroscopic gas detection system with a photoacoustic cell resonance frequency of 1 600 Hz, and measurement of acetylene (C_2H_2) gas concentration from 50~100 $\times 10^{-6}$ was achieved. The experimental results indicate that the sound pressure sensitivity of the sensor is 25.4 nm/Pa at 1 000 Hz, the minimum detectable sound pressure (MDP) achievable by the sensor is 38.2 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ @1 kHz, and the acoustic pressure signal-to-noise ratio is 76.8 dB. The peak of the second harmonic signal of the photoacoustic spectroscopy obtained from the experiment shows a good linear relationship with the acetylene concentration, and the response of the acetylene concentration is 1.8 $\text{pm}/10^{-6}$. The sensor has a wide range of applications in the field of single-frequency acoustic signal detection, such as photoacoustic spectroscopy.

Keywords: fiber-optic acoustic sensor; F-P interference; L-shaped spoke structure; photoacoustic spectroscopy

收稿日期: 2023-09-27 Received Date: 2023-09-27

* 基金项目: 国家自然科学基金 (11404054)、河北省自然科学基金 (F2019501025, F2020501040)、中央高校基本科研业务费专项资金 (2023GFZD002) 项目资助

0 引言

声音是一种重要的信息载体,具有十分丰富的信息量,而声音检测技术作为一种通过检测、分析声波来获取所需信息的技术手段,具有无损、快速、准确等优势。因此,声传感器被广泛应用于用于工业、国防、医学诊断^[1-2]、水声监测^[3]、核电站管道泄露监测^[4]、地震监测^[5-6]等诸多领域。其中,在基于光声光谱的微量气体检测技术^[7-8]领域,声传感器作为关键器件被应用于共振光声池^[9-10]中。由于气体检测的环境通常较为复杂且具有易燃易爆等危险性,传统的电声传感器利用电信号进行检测,其有源的特性以及较低灵敏度,无法满足实际应用要求,而光纤声传感器利用光纤作为声音传递的介质,具有体积小、灵敏度高、无源且不受电磁等外界复杂环境干扰等优越特性,很好地弥补了电声传感器的不足,因此光纤声传感器取代传统电声传感器,在光声光谱气体检测领域发挥了重要的作用。因而,为了提高气体检测的性能,对于光纤声传感器的灵敏度等特性的研究尤为重要。

目前,应用于光声光谱领域的声波传感器有基于光纤F-P的声波传感器^[11]和石英音叉声波传感器^[12]等。其中,膜片式光纤F-P声传感器由于其简单紧凑的结构及高灵敏度,得到了广泛的研究。其中,传感膜片作为检测声波的首要结构,在膜片式光纤F-P声传感器检测声音的过程中起着至关重要的作用。目前,针对传感膜片的研究主要集中在膜片的结构和材料两个方面。为了提高传感器的性能,各种各样的材料被应用于声敏膜片的制作,如银^[13]、硅^[14-15]、金^[16]、氧化石墨烯^[17-18]、聚合物^[19-21]等。Ni等^[22]制作了基于超薄石墨烯膜的F-P光纤声传感器,石墨烯膜的厚度仅为10 nm,在10 kHz的频率下最小可探测声压水平(minimum detectable power, MDP)可以达到 $33.97 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 。石墨烯具有较高的机械弹性以及抗拉伸强度,但石墨烯膜的制备过程较为复杂,且将石墨烯薄膜转移到传感头的操作困难。与石墨烯相比,银膜的制作过程相对简单且银材料的反射率较高,Liu等^[13]提出了一种基于大面积银膜的光纤声压传感器,实现了 $-124.8 \text{ dB re V}/\mu\text{Pa}$ 的灵敏度以及 $83.7 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 的最小可探测声压。然而,为了提高周边固定的圆膜片的灵敏度,较大的膜片半径和超薄的膜片厚度会极大的增加加工难度和制作成本。近年来,为了改进传感膜片的结构,出现了波纹^[23]、悬臂^[24-25]、飞轮状^[26]等多种结构。Liu等^[23]利用单晶硅刻蚀出波纹结构并转移到银膜片上,制作了基于波纹银膜片的F-P光纤声学传感器,波纹结构可有效地释放膜片的表面张力,提高传感器的灵敏度。Qi等^[26]设计了一种飞轮式膜片,镂空的膜片结构可平衡F-P干涉腔内外压强,所提出传感器的声

压灵敏度达到了 $1.525 \text{ nm}/\text{Pa}$ 。然而,悬臂梁结构和飞轮状结构中的支撑梁为直梁结构,梁的长度会受到膜片整体尺寸的限制,从而限制膜片的灵敏度。

本文提出了一种L型轮辐结构的膜片式光纤声传感器,采用L型梁轮辐结构支撑中心圆膜片,打破了膜片的尺寸对于悬臂梁长度的限制,在相同膜片尺寸的情况下,能有效地增加梁的长度,提高膜片对于声压的灵敏度。采用激光加工技术在304不锈钢薄片上制作传感器的膜片。该传感器在声信号的检测实验中表现出较高的灵敏度,1 000 Hz下的灵敏度可达 $25.4 \text{ nm}/\text{Pa}$,在共振频率处的灵敏度可以达到 $286.9 \text{ nm}/\text{Pa}$,将其应用于光声光谱气体检测系统的共振光声池中检测乙炔浓度,所得到的二次谐波峰值和乙炔浓度呈现良好的线性关系。本文所提出的基于L型轮辐结构膜片的窄频光纤F-P声传感器具有灵敏度高,制作工艺简单,性价比较高,在光声光谱气体检测领域具有良好的应用前景。

1 传感器的理论分析

光纤F-P声传感器利用F-P干涉原理检测声信号,当外界声压作用于膜片时,膜片受压发生形变而引起腔长变化,因此,声波就转变为腔长的同步变化,从F-P腔中返回的调制光携带着腔长的信息,通过解调出F-P腔长的信息可以得到声压变化。

1.1 F-P干涉原理

在基于F-P干涉的膜片式光纤传感器中,F-P干涉腔的两个反射面由光纤端面和传感膜片内表面所构成,如图1所示。激光器发出的光沿着光纤进入F-P腔,一部分光在光纤端面发生反射,另一部分光通过折射进入空气腔,在传感膜片的内表面发生反射,并再度通过折射返回光纤,与前一部分反射光发生干涉。由于光纤端面的反射率较低(为4%),因此,可将干涉近似为双光束干涉,反射光强为:

$$I_r = 2R \left(1 - \cos \frac{4\pi L}{\lambda} \right) I_i \quad (1)$$

其中, R 为反射面的反射率, L 为腔长, λ 为入射波长, I_r 为反射光强, I_i 为入射光强。

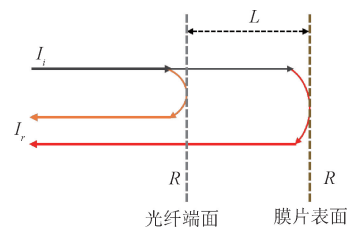


图1 F-P腔干涉原理

Fig. 1 F-P cavity interference principle

1.2 膜片的形变原理

光纤 F-P 声传感器中膜片的结构是影响传感器灵敏度等性能的重要因素,本文提出 L 型轮辐结构的传感膜片,如图 2(a)所示。当外界声压作用于膜片上时,膜片受力会发生形变,其中,中心圆膜片为主要的声压接触部分,由 L 型轮辐梁支撑,L 型轮辐为主要的形变部分,3 个 L 型轮辐梁尺寸相同且呈中心对称,因此可将膜片结构简化为悬臂梁模型进行受力分析,如图 2(b)所示。

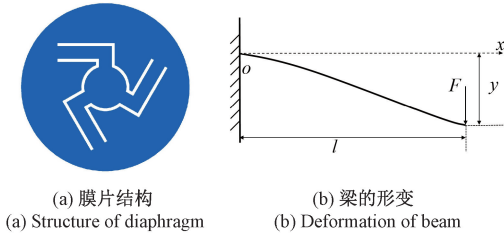


图 2 膜片结构模型
Fig. 2 Diaphragm structure model

L 型轮辐梁与中心圆膜片的交界处的挠度为:

$$y = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (2)$$

式中: y 为膜片的挠度变化, F 为压力, E 为杨氏模量, I 为惯性矩, l 为梁的等效长度。由于中心膜片由 3 个 L 型轮辐结构支撑,因此 F 应为中心膜片所受压强 P 的 $1/3$ 。

$$I = \frac{wh^3}{12} \quad (3)$$

式中: w 为梁的宽度, h 为梁的厚度。

根据式(2)、(3)可以得到梁末端的挠度方程:

$$y = \frac{4\pi r^2 Pl^3}{3Ewh^3} \quad (4)$$

式中: r 为中心圆膜片的半径, P 为外界压强。

1.3 理论仿真

膜片的振动结构由中心圆膜片和 L 型轮辐结构组成。其中 L 型轮辐的数量以及组成 L 型的两个直形梁的长度 L_1 和 L_2 (如图 3(a)所示)均会对传感器灵敏度产生影响。其中 L 型轮辐的数量与传感器的灵敏度关系如图 3(b)所示。仿真结果表明,在静态压力下,轮辐数量的增加会导致灵敏度降低,由于在实际加工制作中,两个及以下的轮辐结构会造成中心膜片的倾斜等情况,不利于 F-P 干涉腔的形成,因此本文采用 3 个 L 型轮辐结构在提高膜片的平整性的同时保证传感器有较高的灵敏度。

利用 COMSOL 软件对 L_1 和 L_2 长度对传感器灵敏度的影响进行仿真,如图 3(c)所示。通过结果可以看出,在静态压力下,减小 L_1 长度、增大 L_2 长度可提高传感器的灵敏度。为了避免激光加工过程中出现粘连、变形等

现象,同时兼顾灵敏度,本文中 L_1 的长度为 0.3 mm 、所对应的 L_2 长度为 2.67 mm 。

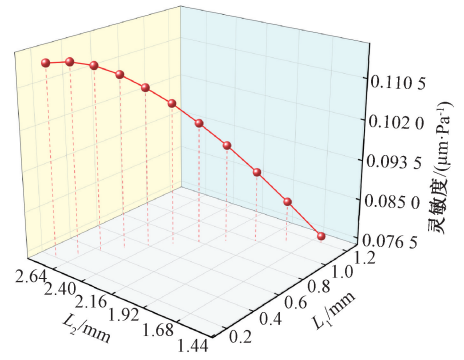
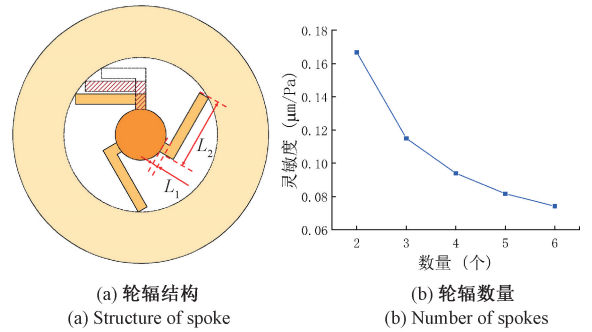


图 3 轮辐结构仿真
Fig. 3 Simulation of spoke structure

基于共振光声池的光声光谱气体检测技术的工作频率通常在 $1\,500 \sim 3\,000 \text{ Hz}$ ^[27]左右。由于传感膜片在共振频率附近拥有较高的灵敏度,为了准确控制膜片的共振频率,利用 COMSOL 软件对膜片的振动进行有限元分析。

膜片的一阶振动模态如图 4(a)所示。可以看出膜片在一阶振动模态下,中心膜片振幅平稳且梁的形变最大,因此,声学传感器通常使用一阶共振频率范围内的频段。通过 COMSOL 软件对膜片的一阶共振频率进行有限元仿真。膜片的一阶共振频率与膜片厚度和梁的宽度的曲线如图 4(b)所示。可以看出,膜片的结构尺寸参数对膜片的固有频率有直接影响,可以根据实际应用要求调整膜片的结构尺寸以达到所需要的固有频率。

针对膜片不同厚度及梁宽度进行频率响应的有限元仿真,如图 5 所示。根据图 5(a)、(b)的频率响应仿真结果可以看出,随着膜片厚度的增加,其共振频率随之右移,且共振频率处的峰值也随之降低;梁的宽度对膜片频响曲线趋势的影响与膜片厚度相同。膜片厚度以及梁宽度的降低可以有效提高膜片的灵敏度,但是过薄的厚度和过低的梁宽会降低膜片的机械性能,使膜片易损坏。

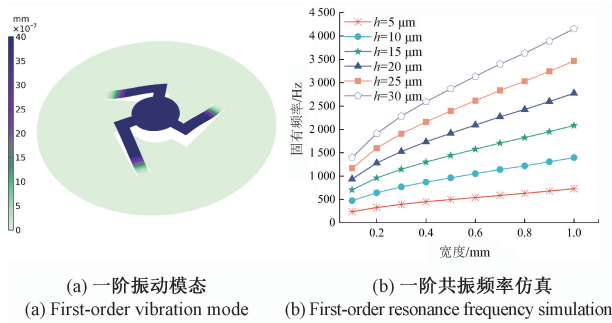


图 4 膜片振动仿真

Fig. 4 Vibration simulation of diaphragm

因此,结合共振光声池的工作频率,选择膜片的厚度为 $15\ \mu\text{m}$,梁的宽度为 $0.5\ \text{mm}$,膜片的整体外径为 $10\ \text{mm}$ 。

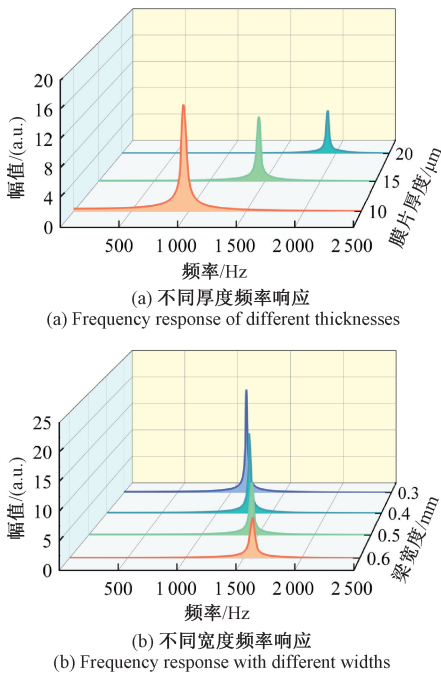


图 5 频率响应仿真

Fig. 5 Simulation of frequency response

为了从理论上验证 L 型轮辐结构的优势,利用 COMSOL 仿真软件,将 L 型轮辐结构与目前常用的悬臂梁、飞轮状和平膜片结构相比较。仿真中,膜片的材料统一选取 304 不锈钢,膜片的厚度选择 $15\ \mu\text{m}$,膜片振动结构的尺寸范围为 $6\ \text{mm}$ 。其中,悬臂梁的宽度选取常用的 $1\ \text{mm}$,长度为 $3.3\ \text{mm}$;飞轮膜片的中心圆膜片尺寸与 L 型轮辐结构一致,半径为 $1\ \text{mm}$,梁宽为 $0.5\ \text{mm}$;平膜片半径为 $3\ \text{mm}$ 。由于本传感器设计主要针对 $1\ 500\ \text{Hz}$ 左右的光声池。因此,对这 4 种结构在 $1\ \text{Pa}$ 静压力下的形变量以及频率为 $1\ 500\ \text{Hz}$ 下的灵敏度进行仿真,COMSOL 下的仿真图如图 6 所示。

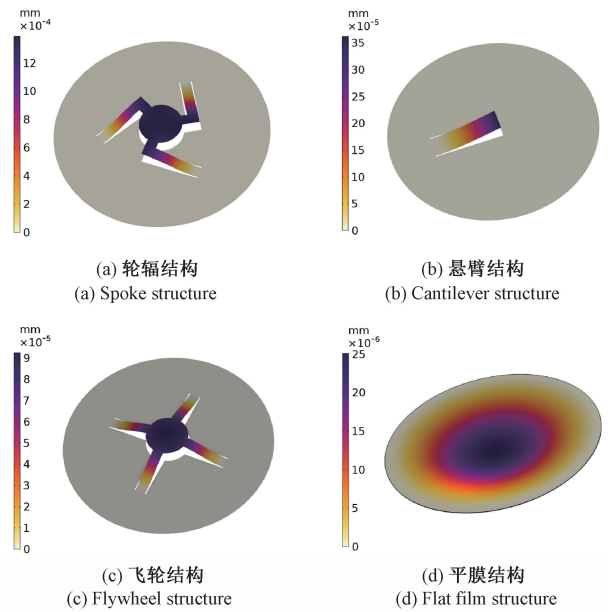


图 6 $1\ 500\ \text{Hz}$ 频率、 $1\ \text{Pa}$ 压力下膜片形变仿真

Fig. 6 Simulation of diaphragm deformation at $1\ 500\ \text{Hz}$ frequency and $1\ \text{Pa}$ pressure

仿真结果如表 1 所示,根据表中数据可以看出,在静压力下,L 型轮辐结构的形变量远大于飞轮状和平膜片结构,形变量小于悬臂梁结构。但在本研究所针对的 $1\ 500\ \text{Hz}$ 频率下,L 型轮辐结构的灵敏度是悬臂梁结构的 3.8 倍,是飞轮状膜片的近 15 倍,且远大于平膜片,大约为平膜片的 55 倍。因此,从理论上可以看出,L 型轮辐结构在所提出的膜片尺寸下,可以极大提高膜片在所应用光声池中的灵敏度,结合 304 不锈钢材料的低成本,所提出的传感器具有良好的应用前景。

表 1 本文所设计的膜片与其他结构的比较

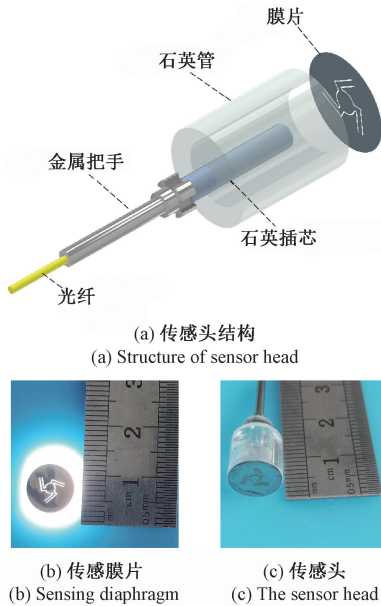
Table 1 Comparison of the diaphragm designed in this paper with other structures

结构	材料	形变量/ nm	灵敏度/ $(\mu\text{m}\cdot\text{Pa}^{-1})$
悬臂梁	不锈钢	25.00	0.362
飞轮状	不锈钢	51.23	0.093
平膜片	不锈钢	21.60	0.025
本文	不锈钢	116.00	1.390

2 实验设计

光纤传感头的结构如图 7 所示,图 7(a) 是所设计的光纤声传感头的结构示意图,传感头主要是由石英管、光纤、L 型轮辐结构的膜片组成。所加工的 L 型轮辐结构的膜片实物如图 7(b) 所示,所制作的膜片利用激光加工

技术在厚度为 $15\ \mu\text{m}$ 的 304 不锈钢薄片上刻蚀而成,在背光状态下可以清楚地看出激光蚀刻出的 L 型轮辐结构。传感器实物图如图 7(c) 所示。



(a) 传感头结构
(a) Structure of sensor head

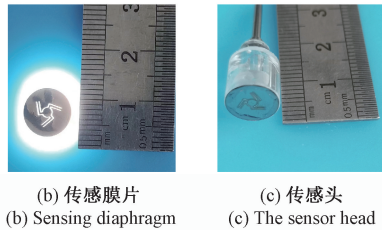


图 7 光纤传感头结构

Fig. 7 The structure of fiber optic sensor head

在进行传感器装配时,首先,利用 UV 胶将加工完成的不锈钢膜片固定于石英管一侧的端面,然后从石英管的另一端插入石英插芯,石英插芯起到光纤准直的作用。石英插芯须接近膜片,然后将石英插芯与石英管外壳固定在一起;最后将光纤插入插芯中,光纤端面与膜片内表面构成 F-P 干涉腔,通过光谱仪观察 F-P 干涉腔长,待调整至合适距离,利用 UV 胶将光纤固定。不锈钢材料成本低廉且加工制作技术成熟,所制作的传感器外径仅为 $10\ \text{mm}$,简单的加工工艺,加之较小的体积,使所制作的传感器具有良好的应用前景。

3 实验结果与分析

传感器的实验测试系统如图 8 所示,系统装置包括放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 光源、环形器、光纤声传感器、参考麦克风 (B&K 4189)、光电探测器、数据采集卡、扬声器、信号发生器。实验采用 ASE 光源,光源发出的光通过环形器进入传感器的 F-P 腔中,光在其中发生干涉。反射回的干涉光携带着腔长的信息,经过环形器进入光电探测器,并被转换为计算机可识别的电信号,并用数据采集卡采集转换后的电信号,将其输入解调程序中进行数据解调,最终得到所检测的声压。为了更好的检测作用于传感器的声压,采用参考麦克风进行声压的校准,以扬声器为基准,参考麦克风与

传感头并排对称放置。为了避免外界噪声的干扰,将扬声器、传感器与参考麦克风放置于隔音盒。

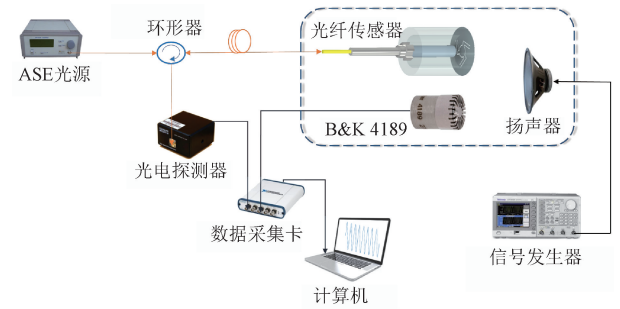


图 8 实验系统图

Fig. 8 Experimental system diagram

在实验过程中,信号发生器控制扬声器发出一定频率和幅值的声音信号,声音信号作用于传感膜片上,使传感膜片发生形变,从而使得 F-P 腔的腔长同步发生变化。ASE 光源下测量的光纤声传感头的干涉光谱如图 9 所示。通过解调腔长信息可得到声压的振幅。传感器系统采用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 对传感器的腔长信息进行解调,通过解调方法计算可以得到传感头静态腔长的值约为 $205\ \mu\text{m}$ 。

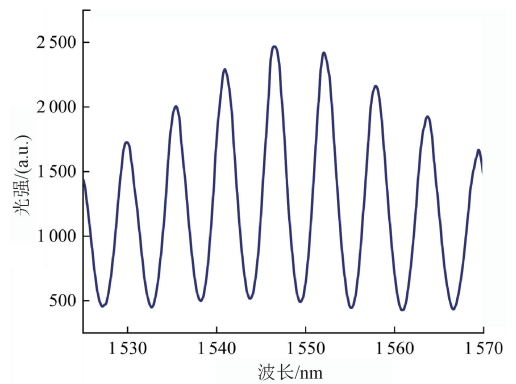


图 9 光纤声传感器干涉光谱

Fig. 9 Interference spectrum of fiber optic acoustic sensor

为了测试传感器的频率响应,利用信号发生器控制扬声器产生一定振幅、不同频率的声波信号,通过参考麦克风进行校准和比较。参考麦克风的灵敏度为 $45.7\ \text{nm}/\text{Pa}$,频率响应范围在 $20\ \text{kHz}$ 以内,输出信号为电信号,可直接被数据采集卡检测转换为数字信号并输入计算机。为了更好的检测声音的变化,将扬声器放置于参考麦克风与传感器之间中轴线上,距离为 $20\ \text{cm}$ 。扬声器由信号发生器控制,调节信号发生器,使之分别产生频率为 500 、 $1\ 000$ 、 $1\ 500$ 、 $2\ 000\ \text{Hz}$ 的声信号,图 10 为传感器在这 4 种频率下传感器的腔长的时域波形。可以看出,在不同频率声波下,传感器具有良好的响应。

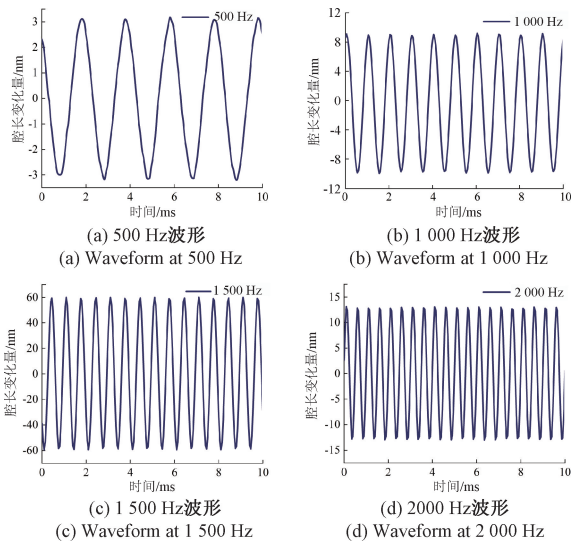


图 10 传感器的时域波形

Fig. 10 Time-domain waveforms of the sensor

在频率响应实验中,对传感器施加频率为 100 ~ 2 500 Hz 的声压信号,传感器频率响应如图 11 所示。根据仿真结果可知该传感器的共振频率为 1 442 Hz,图中显示频率曲线的峰值在 1 410 Hz 左右,与仿真结果相一致。通过频响曲线可以看出,传感器在共振频率附近的检测灵敏度高达 286.9 nm/Pa,在 1 500 Hz 处的灵敏度可以达到 143.5 nm/Pa,在 1 000 Hz 处的灵敏度为 25.4 nm/Pa。

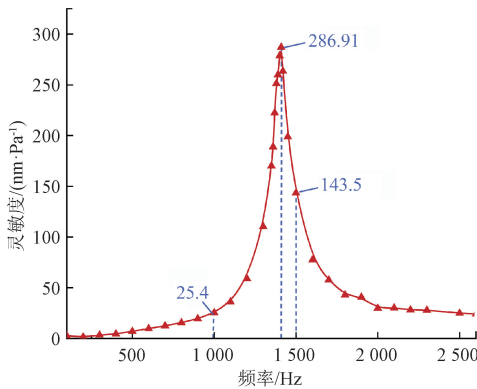


图 11 传感器频率响应曲线

Fig. 11 Frequency response curve of the sensor

为了测试传感器的声压响应,在传感器上施加 1 000 Hz 的声压信号,幅值从 0.1 Pa 增加至 3 Pa,传感器的输出信号随声压幅值同步变化。传感器的腔长随声压的变化如图 12 所示,由拟合曲线可知,传感器具有极好的线性响应,线性度为 0.999 95。

声信号频率为 1 000 Hz,声压为 0.3 Pa 时的频谱如图 13 所示。其中,声压级为 82.4 dB,本底噪声为

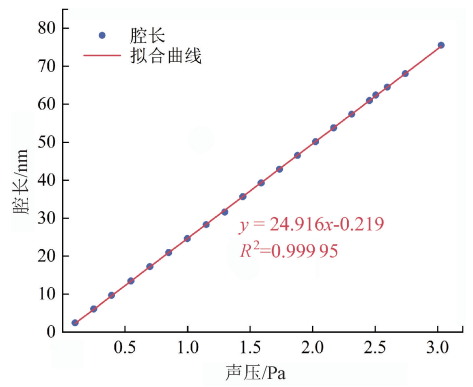


图 12 不同声压下传感器的腔长变化

Fig. 12 Cavity length variation of sensor at different sound pressures

5.5 dB。频谱图中的结果显示,该传感器在 1 000 Hz 频率下的信噪比为 76.8 dB。根据定义,MDP 为使输出信号等于噪声的声压,即传感器所能探测到的最小声压的阈值。根据上述测得声压为 0.3 Pa,信噪比为 76.8 dB,频谱分辨率为 1 Hz,通过计算可得,在 1 000 Hz 下,所设计传感器的最小可探测声压为 38.2 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 1 kHz。

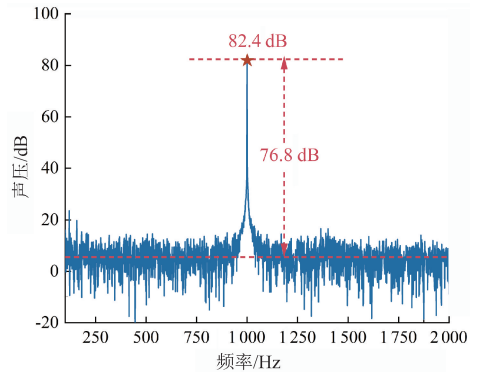


图 13 声压级 82.4 dB 下 1 000 Hz 的频谱

Fig. 13 Frequency spectrum of the sensor at 1 000 Hz when the sound pressure level is 82.4 dB

将所设计的传感器应用于光声光谱气体检测系统中,其中光声池共振频率为 1 600 Hz,乙炔(C_2H_2)气体浓度变化范围为 $50 \sim 100 \times 10^{-6}$,经过锁相放大器获取的二次谐波光声信号如图 14 所示,其中二次谐波光声信号的峰值随浓度的增加而增大。

利用线性回归算法对二次谐波光声信号幅值与气体浓度的关系进行分析,结果如图 15 所示。当乙炔浓度变化范围为 $50 \sim 100 \times 10^{-6}$ 时,二次谐波的峰值和乙炔浓度呈现良好的线性关系,乙炔浓度的响应度为 $1.8 \text{ pm}/10^{-6}$ 。实验结果证明,本文提出的 L 型轮辐结构膜片的光纤 F-P 声传感器在光声光谱等单频声信号检测方向具有良好的应用前景。

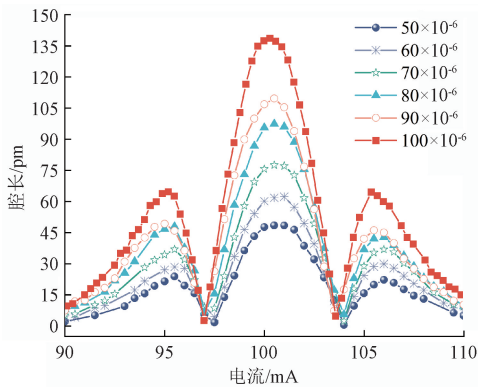


图 14 不同浓度乙炔的二次谐波信号

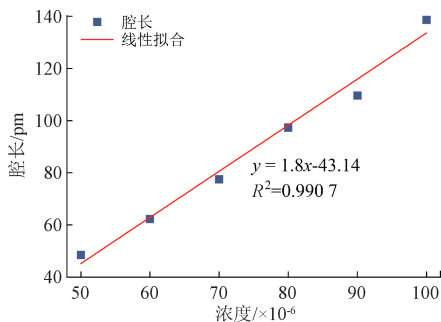
Fig. 14 Second harmonic signals for different concentrations of C_2H_2 

图 15 二次谐波峰值拟合

Fig. 15 Second harmonic peak fit

4 结 论

本文提出了一种高灵敏度的光纤声传感器。传感器采用 L 型轮辐结构膜片,利用激光刻蚀技术在 304 不锈钢薄片上加工而成,加工工艺简单、低成本使传感器具有极高的性价比。为了优化传感器的设计,利用 COMSOL 软件对膜片的结构进行了有限元分析,对膜片结构的固有频率以及频响特性进行了仿真分析,根据仿真结果选取了最佳的结构尺寸:膜片的外直径为 10 mm,中心圆膜片的半径为 1 mm,梁的宽度为 0.5 mm,膜片的厚度为 15 μm 。在上述尺寸下,仿真结果显示膜片的共振频率为 1 442 Hz,接近光声光谱检测中共振光声池 1 500 Hz 左右的工作频率。实验结果表明,该传感器的共振频率在 1 410 Hz 左右,与仿真结果相一致,共振频率处的灵敏度为 286.9 nm/Pa,在 1 500 Hz 处的灵敏度可达 143.5 nm/Pa。当声信号的频率为 1 000 Hz 时,传感器的检测灵敏度可以达到 25.4 nm/Pa,最小可探测声压为 38.2 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 1 kHz。当外界声压从 0.1 Pa 增加至 3 Pa 时,传感器具有良好的线性响应,线性度 $R^2=0.99995$ 。将所设计的传感器应用于光声光谱气体

检测系统中,乙炔气体浓度变化范围为 $50\sim 100\times 10^{-6}$ 时,实验所获取的二次谐波的峰值和乙炔浓度呈现良好的线性关系,乙炔浓度的响应度为 1.8 pm/ 10^{-6} 。因此,所提出的传感器有望在光声光谱气体检测等领域得到广泛的应用。

参考文献

- [1] MAURIN N, ROUSSEAU R, TRZPIL W, et al. First clinical evaluation of a quartz enhanced photo-acoustic CO sensor for human breath analysis [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 319: 128247.
- [2] CUI J, LI Y, YANG Y, et al. Design and optimization of MEMS heart sound sensor based on bionic structure [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 333: 113188.
- [3] ZHANG P, WANG S, JIANG J, et al. A fiber-optic extrinsic fabry-perot hydrophone based on archimedes spiral-type sensitive diaphragm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(23): 22654-22660.
- [4] YANG T, XIAO Y, RAN Z, et al. Design of a weak fiber Bragg grating acoustic sensing system for pipeline leakage monitoring in a nuclear environment [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(20): 22703-22711.
- [5] FERNÁNDEZ-RUIZ M R, MARTINS H F, WILLIAMS E F, et al. Seismic monitoring with distributed acoustic sensing from the near-surface to the deep oceans [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(5): 1453-1463.
- [6] MA W, SHAO Z, ZHANG W, et al. Sensitivity-enhanced fiber-optic sensor based on a drilled pdms diaphragm for ultrasound imaging of seismic physical model [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-6.
- [7] 陈伟根,周恒逸,黄会贤,等.基于半导体激光器的乙炔气体光声光谱检测及其定量分析[J].*仪器仪表学报*, 2010, 31(3): 665-670.
CHEN W G, ZHOU H Y, HUANG H X, et al. Diode laser based photoacoustic spectroscopy detection of acetylene gas and its quantitative analysis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(3): 665-670.
- [8] 郑洪全,戴景民.光声光谱技术应用于痕量气体浓度测量的研究进展[J].*光谱学与光谱分析*, 2024, 44(1): 1-14.
ZHENG H Q, DAI J M. Research development of the application of photoacoustic spectroscopy in measurement of trace gas concentration [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(1): 1-14.
- [9] ZHANG C, WANG Q, YIN X. Photoacoustic spectroscopy for detection of trace C_2H_2 using ellipsoidal photoacoustic cell [J]. *Optics Communications*, 2021, 487: 126764.
- [10] 王巧云,尹翔宇,杨磊,等.共振光声光谱系统中椭

- 球形光声池的理论分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(5): 1351-1355.
- WANG Q Y, YIN X Y, YANG L, et al. Geometrical optimization of resonant ellipsoidal photoacoustic cell in photoacoustic spectroscopy system[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(5): 1351-1355.
- [11] CHEN K, WANG N, GUO M, et al. Detection of SF₆ gas decomposition component H₂S based on fiber-optic photoacoustic sensing [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 378: 133174.
- [12] 房超, 乔顺达, 何应, 等. T字头石英音叉的设计及其气体传感性能[J]. 光学学报, 2023, 43(18): 142-148.
- FANG CH, QIAO SH D, HE Y, et al. Design and sensing performance of t-shaped quartz tuning forks[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(18): 142-148.
- [13] LIU B, LIN J, LIU H, et al. Extrinsic Fabry-Perot fiber acoustic pressure sensor based on large-area silver diaphragm[J]. Microelectronic Engineering, 2016, 166: 50-54.
- [14] GONG Z, LI H, JIANG X, et al. A miniature fiber-optic silicon Cantilever-based acoustic sensor using ultra-high speed spectrum demodulation[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 20086-20091.
- [15] LI H, WANG X, LI D, et al. MEMS-on-fiber sensor combining silicon diaphragm and supporting beams for on-line partial discharges monitoring [J]. Optics Express, 2020, 28(20): 29368-29376.
- [16] XIANG Z, DAI W, RAO W, et al. A gold diaphragm-based Fabry-Perot interferometer with a fiber-optic collimator for acoustic sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(16): 17882-17888.
- [17] MONTEIRO C S, RAPOSO M, RIBEIRO P A, et al. Acoustic optical fiber sensor based on graphene oxide membrane[J]. Sensors, 2021, 21(7): 2336.
- [18] CHEN Y, WAN H, LU Y, et al. An air-pressure and acoustic fiber sensor based on graphene-oxide Fabry-Perot interferometer[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 68: 102754.
- [19] YANMING S, ZHE D, ZHEZHE D, et al. Carbon nanocoils and polyvinyl alcohol composite films for fiber-optic fabry-perot acoustic sensors[J]. Coatings, 2022, 12(10): 1599-1599.
- [20] SHAO M, CAO Z, GAO H, et al. Optical fiber ultrasonic sensor based on partial filling PDMS in hollow-core fiber[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 167: 109648.
- [21] LI S, ZHANG Y, MA C, et al. MEMS optical fiber F-P hydrophone based on corrugated PET diaphragm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-10.
- [22] NI W, LU P, FU X, et al. Ultrathin graphene diaphragm-based extrinsic Fabry-Perot interferometer for ultra-wideband fiber optic acoustic sensing [J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20758-20767.
- [23] LIU B, ZHENG G, WANG A, et al. Optical fiber Fabry-Perot acoustic sensors based on corrugated silver diaphragms [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(6): 3874-3881.
- [24] GUO M, CHEN K, YANG B, et al. Ultrahigh sensitivity fiber-optic Fabry-Perot interferometric acoustic sensor based on silicon cantilever [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-8.
- [25] SHEN T, YINGYING Q, MU L, et al. Sensitivity-enhanced Fabry-Perot interferometric fiber-optic microphone using hollow cantilever [J]. Optics Express, 2023, 31(13): 21796-21805.
- [26] QI X, WANG S, JIANG J, et al. Study on the sensitization effect of flywheel-like diaphragm on fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor [J]. IEEE Access, 2020, 8: 99286-99293.
- [27] CHEN K, YU Q, GONG Z, et al. Ultra-high sensitive fiber-optic Fabry-Perot cantilever enhanced resonant photoacoustic spectroscopy [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 268: 205-209.

作者简介



王巧云(通信作者),2010年于大连理工大学获博士学位,现为东北大学秦皇岛分校副教授、硕士生导师,主要研究方向为光纤传感与光谱分析。

E-mail: wangqiaoyun@neuq.edu.cn

Wang Qiaoyun (Corresponding author)

received her Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2010. She is currently an associate professor and a master advisor at Northeastern University at Qinhuangdao. Her main research interests include fiber sensing and optical spectroscopy analysis.



闻妲,2020年于山东科技大学获得学士学位,现为东北大学秦皇岛分校硕士研究生,主要研究方向为光纤声传感。

E-mail: wenda1717@163.com

Wen Da received her B.Sc. degree from Shandong University of Science and Technology

in 2020. She is currently a master student at Northeastern University at Qinhuangdao. Her main research interest is optical fiber acoustic sensing.