

基于微机电系统波纹振膜的高灵敏度光纤传声器

王坤博^{*}, 周瑜, 刘超, 魏晓村

中国电子科技集团公司第三研究所, 北京 100015

摘要 提出了一种基于微机电系统(MEMS)波纹振膜的高灵敏度光纤传声器,通过波纹振膜研制法布里-珀罗干涉腔,可进一步提升光纤传声器的灵敏度。在理论分析中,应用有限元分析软件 COMSOL 对振膜进行建模,仿真分析了波纹宽度、波纹深度和波纹间距等参数对振膜灵敏度和工作频率的影响。实验结果表明,基于 MEMS 波纹振膜研制的光纤传声器样机灵敏度为 630 mV/Pa,频率响应范围为 50 Hz~8 kHz;且该光纤传声器的结构简单,能很好地应用于远场语音拾取等领域。

关键词 光纤光学; 传声器; 波纹振膜; 远场语音拾取

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1806002

High Sensitive Fiber Optic Microphone with Micro-Electro-Mechanical System Corrugated Diaphragm

Wang Kunbo^{*}, Zhou Yu, Liu Chao, Wei Xiaocun*The Third Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China*

Abstract This paper proposes a high sensitive fiber optic microphone based on a micro-electro-mechanical system (MEMS) corrugated diaphragm. The Fabry-Perot interference cavity is obtained with the corrugated diaphragm, which can further improve the sensitivity of the fiber optic microphone. In the theoretical analysis, the finite element analysis software COMSOL is used to model the diaphragm, and the effects of the corrugation width, corrugation depth, and the separation between two corrugations on the sensitivity and working frequencies of the diaphragm are analyzed by simulation. The experimental results show that the sensitivity of the fiber optic microphone based on the MEMS corrugated diaphragm is 630 mV/Pa, and the frequency response range is 50 Hz~8 kHz; and the structure of the fiber optic microphone is simple, which can be well used in the fields of far-field speech recognition and so on.

Key words fiber optics; microphone; corrugated diaphragm; far-field speech recognition

OCIS codes 060.2370; 230.1040

1 引言

20 世纪 70 年代,光纤传声器由于其探测端无源、抗电磁干扰能力强、损耗低、耐腐蚀性强、安全可靠等特点^[1-4],受到了人们的广泛关注。根据工作原理可将光纤传声器分为强度型^[5-6]、光纤光栅型^[7-8]和法布里-珀罗(F-P)干涉型^[9-19]。相比强度型和光纤光栅型传声器,F-P 干涉型光纤传声器具有灵敏度高、结构简单、易于加工等优势。振膜是光纤传声器的核心结构,决定了传声器的灵敏度和频响特性。

Wang 等^[14]采用聚合物薄膜研制的干涉型光纤传声器灵敏度为 31 mV/Pa、频率响应范围为 0.1~12.7 kHz。Ma 等^[15]采用厚度为 100 nm 的多层石墨烯薄膜,将声信号转化为谐振腔腔长的变化参数,研制了频率响应范围为 0.2~22 kHz 的传声器。赵鹏等^[16]研制出了一种基于聚合物薄膜的 F-P 干涉型光纤传声器,其灵敏度为 93 mV/Pa,频率响应范围 1~20 kHz。Liu 等^[17]研制了一种基于紫外胶薄膜的干涉型光纤传声器,可实现灵敏度为 57.3 mV/Pa、频率响应范围为 1 Hz~2 kHz 的声

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-03-26; 录用日期: 2021-04-07

通信作者: *wangkunbo_4@163.com

信号探测。Liu 等^[18]采用微机电系统 (MEMS) 工艺,制备出了厚度为 95 nm 的银薄膜,并研制出了频率响应范围为 1~6 kHz 的光纤传声器。李汉正等^[19]用厚度为 5 μm 的圆形镍膜研制了一种 F-P 干涉型传声器,其在 1 Hz 频率处的灵敏度为 285 mV/Pa,在 0.1~20 Hz 范围内均具有良好的频率响应特性。目前研制的 F-P 干涉型光纤传声器采用的振膜均为传统意义上的平膜,其灵敏度和频率响应范围仍受到一定限制。

本文提出了一种基于 MEMS 波纹振膜的光纤传声器,用带波纹结构的振膜和单模光纤组成 F-P 干涉腔,进一步提高了传声器的灵敏度。对波纹振膜进行了理论建模与仿真,优化设计了振膜的结构参数后用 MEMS 工艺加工出波纹振膜,并研制了 F-P 干涉型光纤传声器。声学测试结果表明,用该方法研制的光纤传声器灵敏度可达到 630 mV/Pa,频率响应范围为 50 Hz~8 kHz,可实现远距离声信号的拾取。

2 结构与原理

基于 MEMS 波纹振膜的 F-P 干涉型光纤传声器的原理如图 1 所示,其核心结构包括波纹振膜和单模光纤,波纹振膜的中心反光面和光纤端面组成了光纤 F-P 干涉腔。

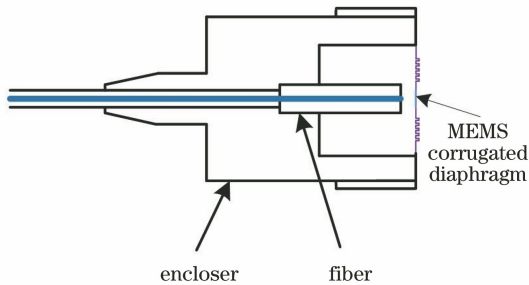


图 1 F-P 干涉型光纤传声器的结构
Fig. 1 Structural of the F-P interferometric fiber optic microphone

在 F-P 干涉型光纤传声器中,振膜反射光与光纤端面反射光在光纤端面形成多光束干涉。由于单模光纤端面的反射率很低(约为 4%),振膜反射的光经光纤端面反射后的强度非常弱,因此可将 F-P 干涉腔的输出近似为双光束干涉^[20-21],干涉光强 I 可表示为

$$I = I_0 [1 + \gamma \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi)], \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2)$$

式中, $I_0 = (I_{\max} + I_{\min})/2$, I_{\max} 为干涉光谱的光强最大值, I_{\min} 为干涉光谱的光强最小值, γ 为干涉光谱的可见度, $\varphi_0 = 4\pi nL/\lambda$ 为初始相位, λ 为光波长, $n=1$ 为空气腔的折射率, L 为 F-P 干涉腔的有效腔长, $\Delta\varphi$ 为外界声音导致振膜振动引起的干涉光相位变化。由(1)式得到 F-P 干涉腔的输出谐振谱如图 2 所示,基于强度解调方式实现光纤传声器的信号解调^[22-24],将光谱的线性区作为工作区,工作点对应上升沿的中心点(Q 点)。声音信号为周期性的正弦波,通过声压改变 F-P 腔的腔长,使谐振曲线左右偏移,工作波长对应谐振曲线的不同点,从而得到不同强度的输出信号,并通过检测信号的变化量得到声波特性。为了实现较高的灵敏度,声信号导致的振膜中心振动位移量需要尽可能大,对振膜特性也提出了较高要求。

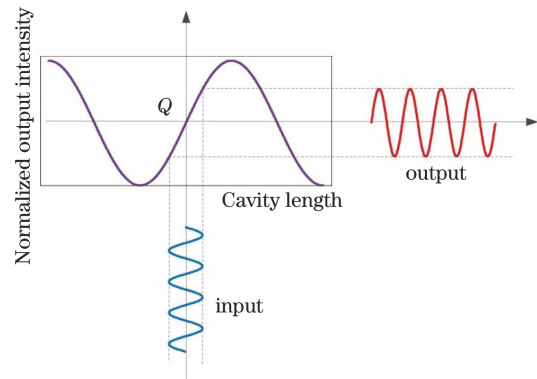


图 2 光纤传声器的强度解调方法原理
Fig. 2 Principle of intensity demodulation method for the fiber optic microphone

3 仿真分析与讨论

振膜在外界声音作用下发生的形变属于弹性力学范畴问题,当形变量小于振膜厚度的 30% 时,可以按照薄板小挠度弯曲理论进行处理^[25-26]。振膜的机械灵敏度和频响特性决定了声敏感元件的灵敏度和频响特性,其机械灵敏度和谐振频率可表示为^[27]

$$Y(0) = \frac{PR^4}{64D} = \frac{3PR^4(1-\mu^2)}{16Eh^3}, \quad (3)$$

$$f_1 = 0.4693 \frac{h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\mu^2)}}, \quad (4)$$

式中, $Y(0)$ 为振膜中心位移的幅值, P 为压力, R 为圆膜的半径, D 为膜片的弯曲刚度, h 为膜片的厚度, μ 为泊松比, E 为弹性模量, f_1 为一阶谐振频率, ρ 为膜片材料的体密度。可以发现,减小振膜的厚度能提升其机械灵敏度,但也会减小振膜的一阶谐振频率。为了使振膜同时具备高机械灵敏度和宽

频率响应范围,采用了基于同心微环的波纹振膜结构。

基于 MEMS 工艺制备的波纹振膜结构如图 3 所示。振膜材料选用低应力的氮化硅(SiN_x),振膜

形状为方形,表面加工多条波纹。波纹结构的叠加可释放膜片应力,提高膜片的机械灵敏度,同时减小外界温度对膜片性能的影响^[28-32]。此外,在膜片中心蒸镀金薄膜,可实现入射光的反射。

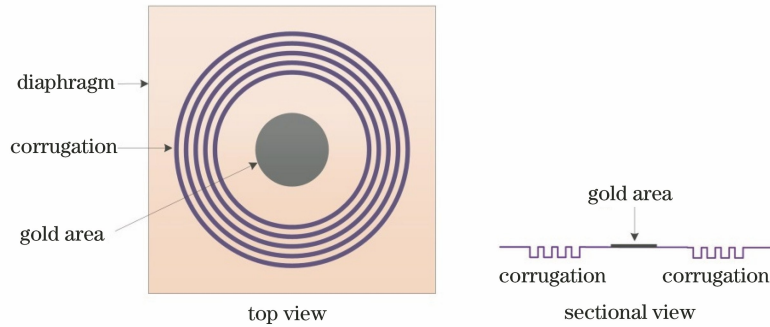


图 3 波纹振膜结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of the corrugated diaphragm

MEMS 波纹振膜的主要结构参数包括振膜厚度、振膜尺寸、膜片应力、波纹数量、波纹宽度和间距、

波纹深度等。因此,用有限元仿真软件 COMSOL 对 MEMS 振膜进行建模,结果如图 4 所示。

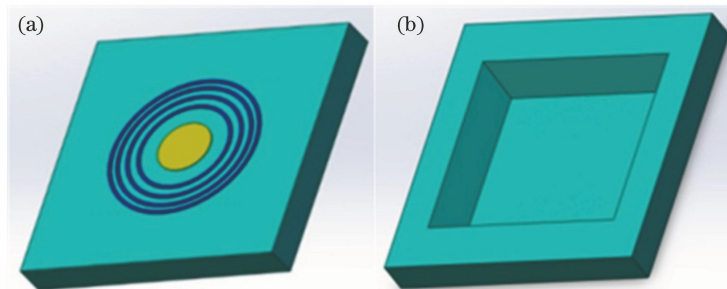


图 4 MEMS 波纹振膜的结构。(a)俯视图;(b)底视图

Fig. 4 Structural of the MEMS corrugated diaphragm. (a) Top view; (b) bottom view

通过仿真得到不同结构尺寸振膜的机械灵敏度和谐振频率值, MEMS 振膜的仿真参数如表 1 所示。仿真振膜的响应规律时,保证其他参数不变,只改变其中一个参数,从而得到膜片的中心位移(加载 1 kPa)和一阶谐振频率。

表 1 MEMS 波纹振膜的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the MEMS corrugated diaphragm

Characteristic	Value
Diaphragm thickness / μm	1
Diaphragm size /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	1900 \times 1900
Separation between the corrugation and the diagram center / μm	500
Corrugation number	5
Corrugation width / μm	20
Separation between two corrugations / μm	20
Corrugation depth / μm	5

图 5 为波纹与中心间距对振膜位移和一阶谐振频率的影响,可以发现,随着波纹与振膜中心间距的

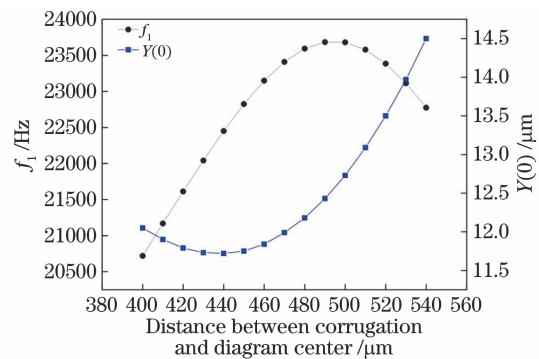


图 5 波纹与中心间距对振膜特性的影响

Fig. 5 Influence of the distance between the corrugation and center on the diaphragm characteristics

增加,振膜受声压导致的位移逐渐减小,在间距为 440 μm 处达到最小值,随后开始增大;随着波纹与振膜中心间距的增加,振膜的谐振频率逐渐增大,在间距约为 495 μm 处达到最大值,之后逐渐减小;且位移的增大速度和谐振频率的减小速度基本相同。因此,为了实现较高的灵敏度和较宽的频率响应范

围,将最大谐振频率点右侧的区域作为工作区域。

分别改变波纹间距、波纹深度和波纹宽度,得到振膜位移和谐振频率与波纹结构参数的变化关系如图 6 所示。从图 6(a)可以发现,随着波纹间距的增大,振膜位移先减小后增大,在间距约为 16 μm 处达到最小值;而谐振频率先增大后减小,在间距约为 18 μm 处达到最大值。为了同时获得较高的灵敏度和较宽的频率响应范围,波纹间距应大于等于 18 μm 。从图 6(b)可以发现,随着波纹宽度的增大,

振膜位移先减小后增大,在宽度为 10 μm 处达到最小值;而谐振频率先增加后减小,在宽度为 10 μm 处达到最大值。考虑到加工时波纹宽度越小,加工难度越大,因此,波纹宽度应大于 10 μm 。从图 6(c)可以发现,随着波纹深度的增加,振膜位移逐渐减小,谐振频率逐渐增加,原因是波纹深度的增加导致振膜的等效厚度增加,从而降低了机械灵敏度,增大了谐振频率,与(3)式、(4)式的分析结果一致。由于波纹深度越大,加工难度越大,因此,初步选择波纹深度为 5 μm 。

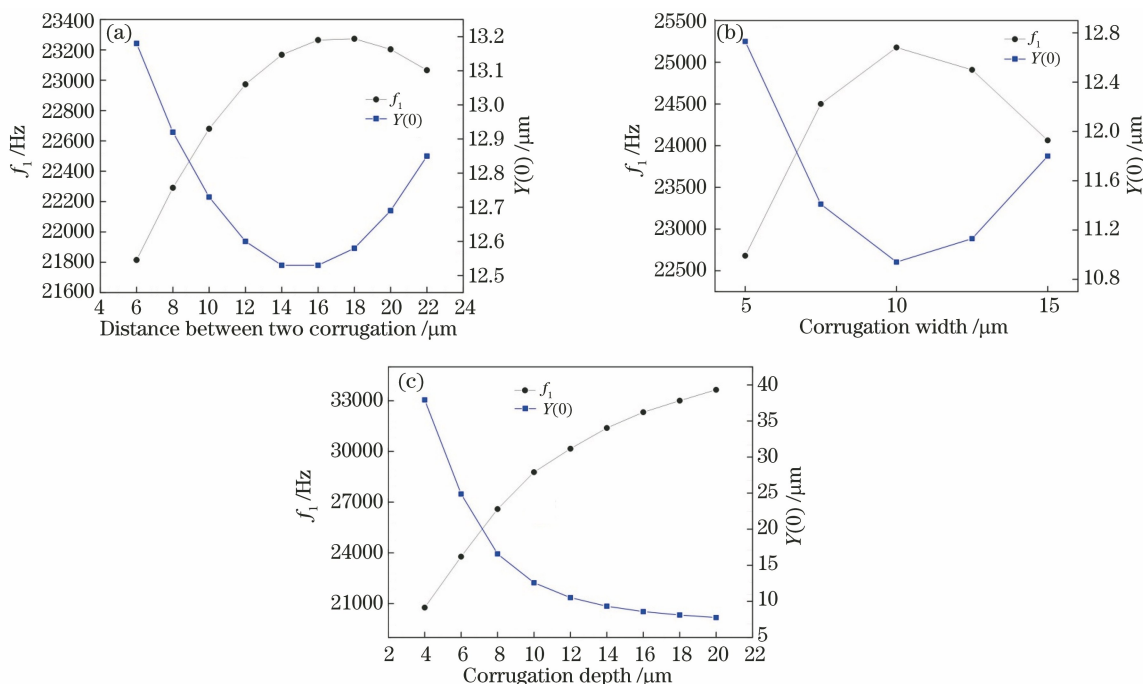


图 6 波纹结构参数对振膜特性的影响。(a)波纹间距;(b)波纹宽度;(c)波纹深度

Fig. 6 Influence of corrugation structural parameters on the diaphragm characteristics. (a) Distance between two corrugations; (b) corrugation width; (c) corrugation depth

文献[25]的研究结果表明,膜片本身的应力特性对振膜特性的影响较大。为了分析波纹振膜应力对声振动特性的影响,以温度应力模拟膜片应力,得到温度变化为-1 $^{\circ}\text{C}$ 和1 $^{\circ}\text{C}$ 时膜片谐振频率变化量随波纹深度的变化关系,如图 7 所示。可以发现,温度变化会影响谐振频率,从而影响振膜应力^[28];且随着波纹深度的增大,温度变化对谐振频率的影响变小,即膜片应力减小,这表明增加波纹能缓和膜片应力,在一定程度上增加膜片的机械灵敏度。

从仿真结果可以发现,机械灵敏度和谐振频率的变化趋势随振膜结构参数增加的变化趋势基本相反。同时,波纹深度对振膜谐振频率和灵敏度特性的影响较大;而波纹宽度、波纹间距以及波纹与振膜中心的间距对振膜输出特性的影响较小,因此,在振膜加工时需严格控制波纹的加工深度。在设计过程

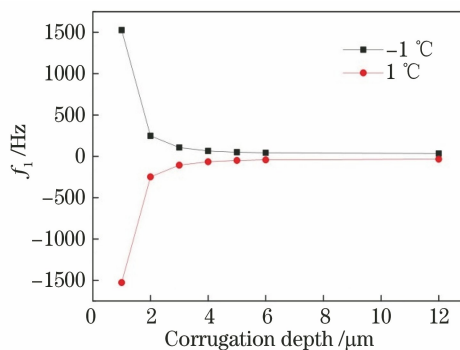


图 7 温度应力对谐振频率的影响

Fig. 7 Influence of temperature stress on the resonant frequency

中,为了实现远距离语音信号的拾取,在满足语音频段声信号响应的基础上,需尽可能地增大振膜灵敏度,实现对参数的优化选择。

4 波纹振膜加工

采用低压化学气相沉积(LPCVD)法实现低应力 SiN_x 振膜的制备,该方法制备的 SiN_x 薄膜均匀性好、缺陷少、质量高、效率高,且能同时在大批量基板上沉积薄膜,易于实现自动化,现已成为半导体工业中制备 SiN_x 薄膜的主要方法之一,其加工工艺流程如图 8 所示。具体步骤:1)准备厚度为 $450\ \mu\text{m}$ 、 $\langle 100 \rangle$ 晶向的单晶硅片;2)光刻出波纹图案,制备等离子刻蚀(ICP)掩模;3)采用 ICP 刻蚀出深为 $5\ \mu\text{m}$ 的硅槽;4)去除表面光刻胶,清洗圆片,准备生长 SiN_x ;5)在清洗后的硅片上用 LPCVD 生长厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 的 SiN_x ;6)在圆片表面涂覆光刻胶,光刻出金属图形;7)采用溅射工艺,在圆片表面沉积厚度分别为 $10\ \text{nm}$ 和 $50\ \text{nm}$ 的 Cr 和 Au;8)采用 Lift-off 剥离工艺,制备圆形的金属图形;9)在圆片背面进行光刻,形成刻蚀介质窗口图形;10)用反应离子刻蚀(RIE)设备刻蚀厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 的 SiN_x 介质,并将表面的光刻胶去除干净,漏出湿法腐蚀的窗口;11)采用湿法腐蚀工艺,腐蚀 $\langle 100 \rangle$ 晶向的单晶硅片,将波纹式的 SiN_x 膜片结构完全释放。

图 8 中的振膜加工工艺流程可根据实际加工条件进行调整,以加工出性能优良的振膜。实际加工的振膜如图 9 所示,可以发现,加工后的波纹图形清

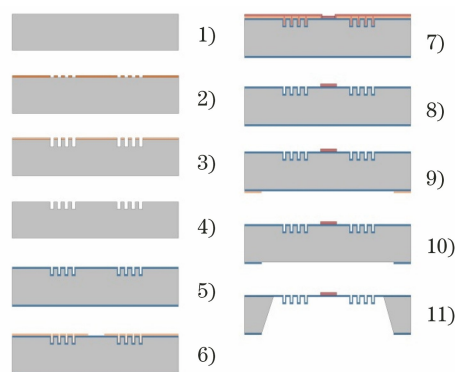


图 8 波纹振膜的工艺流程

Fig. 8 Process flow of the corrugated diaphragm

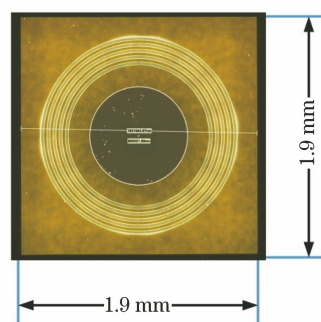


图 9 MEMS 波纹振膜的实物图

晰,均匀度较好,用其研制的 F-P 干涉型声敏感探头如图 10 所示。

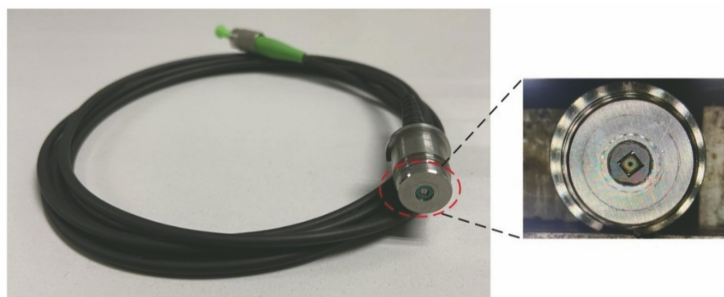


图 10 F-P 干涉型光纤传声器的实物图

Fig. 10 Physical image of the F-P interferometric fiber optic microphone

5 实验测试

用研制的 F-P 干涉型声敏感探头搭建了强度解调的光纤传声器及测试系统,如图 11 所示。光纤传声器系统主要由光收发器(激光器、光电探测器、光源驱动电路和信号处理电路)、环形器、光纤传声器敏感探头组成。测试装置包括标准测量传声器及驱动、采集模块和声源。其中,标准测量传声器为 GRAS 46AE^[33],灵敏度为 $50\ \text{mV}/\text{Pa}$,最大可测量声压为 $138\ \text{dB}$ (约 $158.5\ \text{Pa}$)。采用 GENELEC

8351A 音响发出声源,采集卡模块为 NI 9234。首先,测试光纤传声器的灵敏度,将传声器探头和标准测量传声器并行放置在距离声源约 $1\ \text{m}$ 处;然后,控制声源发出频率为 $250, 500, 1000, 2000\ \text{Hz}$ 的声信号,采集两个传感器的输出信号,并用计算机进行数据对比,得到的灵敏度测试曲线如图 12 所示。可以发现,光纤传声器的灵敏度远高于标准测量传声器,测试值为 $630\ \text{mV}/\text{Pa}@1\ \text{kHz}$,为标准测量传声器灵敏度的 12.6 倍。

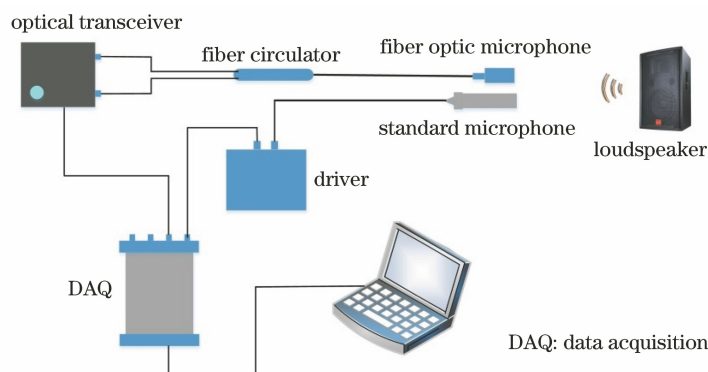


图 11 光纤传声器的性能测试系统

Fig. 11 Performance test system of the fiber optic microphone

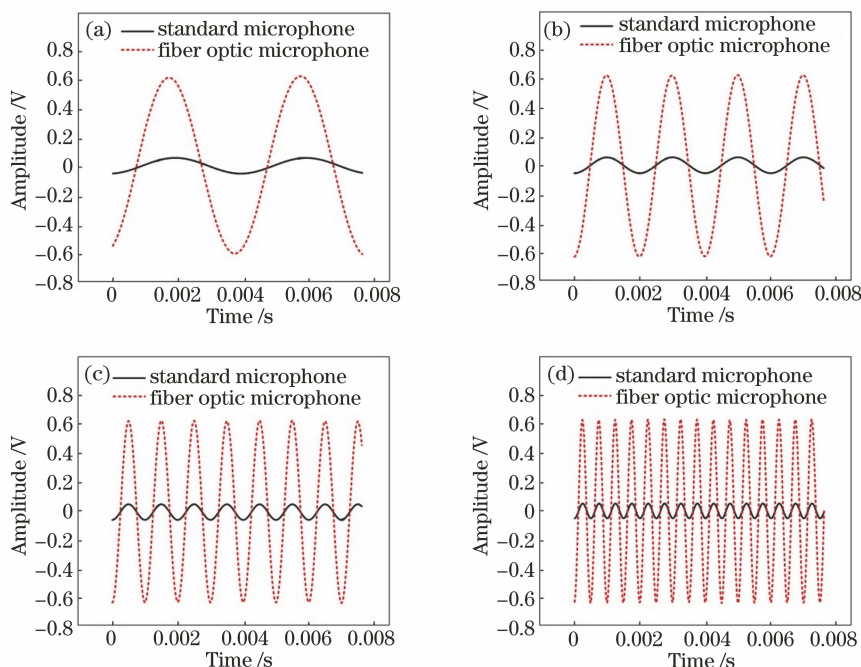


图 12 基于 MEMS 波纹振膜的光纤传声器测试结果。(a) 250 Hz; (b) 500 Hz; (c) 1000 Hz; (d) 2000 Hz

Fig. 12 Test results of fiber optic microphone based on MEMS corrugated diaphragm.

(a) 250 Hz; (b) 500 Hz; (c) 1000 Hz; (d) 2000 Hz

光纤传声器的灵敏度较高,限制了其测量范围。图 13 为加载不同声压信号时,光纤传声器的输出有效值。可以发现,当加载声压超过 2.8 Pa 时,输出不再线性增加,此时输出曲线开始过载,不再是标准的正弦曲线。原因是目前光电解调模块的供电电压仅为 5 V,若输出有效值为峰峰值的 $1/(2\sqrt{2})$,则可测试的最大有效值为 1.77 V,当灵敏度为 630 mV/Pa 时,可测量的最大声压为 2.8 Pa。这表明研制的高灵敏度光纤传声器量程较小,可适用于微弱声信号的拾取。若想增加光纤传声器的量程,则需要增大光电解调模块的供电电压。

将标准测量传声器和光纤传声器探头并排放置,接收声源发出的声音,用采集模块同时采集两个

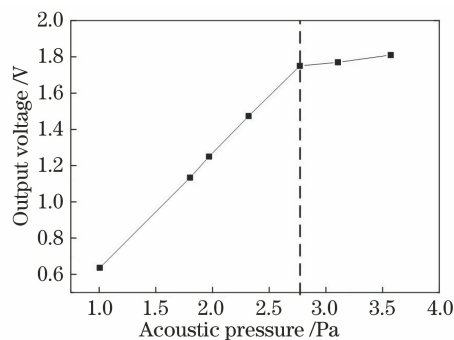


图 13 不同声压信号下光纤传声器的测试结果

Fig. 13 Test results of fiber optic microphone for different acoustic pressure

传声器的模拟输出信号并在电脑端进行显示。假设

标准测量传声器的输出频响在 20 Hz~20 kHz 范围内是平坦的,以此来校准声源的频响特性。测试得到光纤传声器的频响特性曲线如图 14 所示,其中,纵坐标为输出灵敏度的对数值,对标基准为 50 kV/Pa。可以发现,在 50 Hz~8 kHz 内,光纤传声器的频响曲线相对平坦,可用于语音信号的拾取。

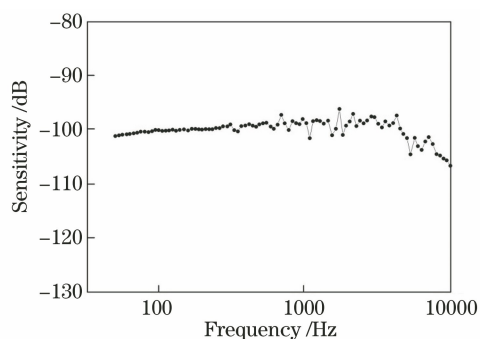


图 14 基于 MEMS 波纹振膜的光纤传声器频响特性曲线
Fig. 14 Frequency response of fiber optic microphone with MEMS corrugated diaphragm

6 结 论

提出了一种基于 MEMS 波纹振膜的高灵敏度光纤传声器,并对其特性进行了研究。仿真分析结果表明,波纹深度对振膜机械灵敏度和谐振频率的影响较大,而波纹宽度、波纹间距以及波纹与中心的间距对振膜特性的影响较小。实验测试结果表明,光纤传声器的灵敏度可达 630 mV/Pa,是标准测量传声器的 12.6 倍;频率响应范围为 50 Hz~8 kHz。基于 MEMS 波纹振膜的光纤传声器具有灵敏度高、频响范围宽、结构简单等优点,能为光纤传声器在远场拾音领域的应用提供良好的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Zhou Y, Liu C, Wang K B, et al. Double-beam thin-film interferometric fiber microphone based on phase demodulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0106001.
周瑜, 刘超, 王坤博, 等. 基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0106001.
- [2] Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1006005.
王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1006005.
- [3] Wang X H, Zhang W C, Zhao H, et al. Impact of liquid insulation on characteristic parameters of fiber Fabry-Perot partial discharge induced ultrasound sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0406005.
王学会, 张伟超, 赵洪, 等. 液体绝缘对光纤法布里-珀罗局放超声传感器特性参数影响[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0406005.
- [4] 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.
- [5] Optoacoustics Ltd. Sound solutions from light technology[EB/OL]. [2021-01-10]. <http://www.optoacoustics.com/industrial/optimic-microphones>.
- [6] Ding P, Dong X P. Theoretical and experimental research on fiber-optic microphone using multimode fiber lens[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060603.
丁朋, 董小鹏. 采用多模光纤透镜的光纤麦克风理论与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060603.
- [7] Iida T, Nakamura K, Ueha S. A microphone array using fiber Bragg gratings[C]//2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002(Cat. No.02EX533), May 10, 2002, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2002: 239-242.
- [8] Bandutunga C P, Fleddermann R, Gray M B, et al. All-optical low noise fiber Bragg grating microphone[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(21): 5570-5574.
- [9] Mao X F, Tian X R, Zhou X L, et al. Characteristics of a fiber-optical Fabry-Perot interferometric acoustic sensor based on an improved phase-generated carrier-demodulation mechanism[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(4): 046107.
- [10] Xu F, Shi J, Gong K, et al. Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaphragm[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2838-2840.
- [11] Wang S, Lu P, Liu L, et al. An infrasound sensor based on extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometer structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(11): 1264-1267.
- [12] Tan Y Z, Zhang C Z, Jin W, et al. Optical fiber photoacoustic gas sensor with graphene nanomechanical resonator as the acoustic detector[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(2): 199-209.

- [13] Beard P C, Mills T N. Miniature optical fibre ultrasonic hydrophone using a Fabry-Perot polymer film interferometer[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(9): 801-803.
- [14] Wang Q Y, Yu Q X. Polymer diaphragm based sensitive fiber optic Fabry-Perot acoustic sensor[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(3): 266-269.
- [15] Ma J, Xuan H F, Ho H L, et al. Fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(10): 932-935.
- [16] Zhao P, Liu T G, Jiang J F, et al. Fiber optic acoustic vibration sensor for the monitoring of water sublimator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0106003.
赵鹏, 刘铁根, 江俊峰, 等. 用于水升华器监测的光纤声振动传感器研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0106003.
- [17] Liu L, Lu P, Wang S, et al. UV adhesive diaphragm-based FPI sensor for very-low-frequency acoustic sensing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1-9.
- [18] Liu B, Lin J, Wang J, et al. MEMS-based high-sensitivity Fabry-Perot acoustic sensor with a 45° angled fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(5): 581-584.
- [19] Li H Z, Wu G M, Ma Z J, et al. Preparation of fiber-optic interferometer based infrasound sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 150603.
李汉正, 吴高米, 马振钧, 等. 光纤干涉次声传感器研制[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 150603.
- [20] Yu B, Kim D W, Deng J, et al. Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(16): 3241-3250.
- [21] Chen W M, Lei X H, Zhang W, et al. Recent progress of optical fiber Fabry-Perot sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328010.
陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328010.
- [22] Yang C, Fu H W, Yong Z, et al. Research on extrinsic fiber F-P interference acoustic sensor[J]. *Optical Communication Technology*, 2020, 44(2): 28-32.
杨冲, 傅海威, 雍振, 等. 非本征光纤 F-P 干涉声传感器的研究[J]. *光通信技术*, 2020, 44(2): 28-32.
- [23] Zhang G J, Yu Q X, Song S D. Fiber optic temperature sensor based on F-P cavity interferometric/intensity modulation mechanism[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(2): 228-231.
张桂菊, 于清旭, 宋世德. 基于 F-P 腔的干涉/强度调制型光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2005, 32(2): 228-231.
- [24] Deng J D, Xiao H, Huo W, et al. Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(5): 305-311.
- [25] Giovanni M D. Flat and corrugated diaphragm design handbook[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1982.
- [26] Ouyang Y, Zheng H M. Forced vibration of circular membrane with mini-amplitude[J]. *Audio Engineering*, 2004, 28(1): 7-8, 11.
欧阳毅, 郑虎鸣. 微小振幅的圆形振膜的受迫振动[J]. *电声技术*, 2004, 28(1): 7-8, 11.
- [27] Wang K B, Zhou Y, Liu C, et al. The F-P interferometric fiber optic microphone with intensity demodulation[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2017, 36(5): 438-444.
王坤博, 周瑜, 刘超, 等. 强度解调的 F-P 干涉型光纤传声器[J]. *应用声学*, 2017, 36(5): 438-444.
- [28] Scheeper P R, Olthuis W, Bergveld P. The design, fabrication, and testing of corrugated silicon nitride diaphragms[J]. *Journal of Microelectro mechanical Systems*, 1994, 3(1): 36-42.
- [29] Zhu J L, Wang M, Chen L, et al. An optical fiber Fabry-Perot pressure sensor using corrugated diaphragm and angle polished fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 34: 42-46.
- [30] Taybi M. The effect of corrugations on mechanical sensitivity of diaphragm for MEMS capacitive microphone[J]. *International Journal of Engineering*, 2013, 26(11B): 1323-1330.
- [31] Wang W J, Lin R M, Ren Y. Design and fabrication of high sensitive microphone diaphragm using deep corrugation technique[J]. *Microsystem Technologies*, 2004, 10(2): 142-146.
- [32] Kressmann R, Klaiber M, Hess G. Silicon condenser microphones with corrugated silicon oxide/nitride electret membranes[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, 100(2/3): 301-309.
- [33] GRAS. GRAS 46AE 1/2" CCP free-field standard microphone set[EB/OL]. [2021-01-10]. <https://www.grasacoustics.com/products/measurement-microphone-sets/product/140-46ae>.