

光纤干涉次声传感器研制

李汉正^{1,2}, 吴高米^{1,2}, 马振钧^{1,2}, 任迪鹏^{1,2}, 张萌颖¹, 高然¹, 祁志美^{1,2*}

¹中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室, 北京 100190;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 设计并制作了一种基于光纤干涉仪的低频声传感器,用于检测频率小于 20 Hz 的次声信号。该传感器利用厚度为 5 μm ,半径为 1/2 inch(1 inch=2.54 cm)的圆形镍膜作为振膜,该振膜被平整地固定在金属腔体的一个端口,呈周边拉伸式。伸入腔室的单模光纤的端面与振膜内表面构成一个非本征型光纤法布里-珀罗干涉仪(EFPI),用于检测由声音导致的振膜的振动。为了优化传感器性能,基于弹性力学原理和有限元仿真软件,分析了振膜预应力和振膜厚度对传感器一阶谐振频率的影响。仿真结果表明在一定的膜厚范围内,一阶谐振频率对预应力非常敏感而对膜厚不敏感。利用 B&K 4193-L-004 型标准声传感器和 42AE 型标准次声发射腔对所制光纤次声传感器进行了测试,结果表明该传感器在 0.1~20 Hz 范围内具有良好的频率响应特性,对 1 Hz 声波的灵敏度高达 285 mV/Pa。

关键词 光纤光学; 低频声传感器; 光纤非本征法布里-珀罗干涉仪; 高灵敏度; 有限元仿真

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.150603

Preparation of Fiber-Optic Interferometer Based Infrasound Sensor

Li Hanzheng^{1,2}, Wu Gaomi^{1,2}, Ma Zhenjun^{1,2},

Ren Dipeng^{1,2}, Zhang Mengying¹, Gao Ran¹, Qi Zhimei^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A low-frequency acoustic sensor based on fiber optic interferometer was designed and fabricated for detection of infrasound signals with a frequency less than 20 Hz. The sensor contains a metallic diaphragm that is a circular nickel membrane with a thickness of 5 μm and a radius of 1/2 inch (1 inch=2.54 cm), and the diaphragm is flatly fixed to a port of the metal cylinder in a peripherally stretched manner. The end face of the single-mode fiber protruding into the cylinder and the inner surface of the diaphragm constitute an extrinsic fiber Fabry-Perot interferometer (EFPI) for detecting the diaphragm's vibration caused by sound. In order to optimize the sensor performance, the effects of the prestress applied to the diaphragm and the diaphragm thickness on the first-order resonant frequency of the sensor are analyzed based on the principle of elastic mechanics and finite element simulation software. The simulation results show that the first-order resonant frequency is sensitive to prestress rather than to the diaphragm thickness under the condition of the diaphragm thickness being within a certain small range. The above-prepared fiber optic infrasound sensor was characterized with the B&K 4193-L-004 standard acoustic sensor and the 42AE standard infrasound source. The results show that the sensor has good frequency response in the range from 0.1 Hz to 20 Hz and the sensitivity to 1 Hz sound is as high as 285 mV/Pa.

Key words fiber optics; low-frequency acoustic sensor; optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer; high sensitivity; finite element simulation

OCIS codes 060.2310; 120.3180; 230.1040

收稿日期: 2019-01-28; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(61501425,61601436,61801456)

* E-mail: zhimei-qi@mail.ie.ac.cn

1 引言

声传感器是一种基于声光换能或声电换能机理将被测声信号转换为光信号或电信号的器件。低频次声测量在众多领域都有广泛的应用。地震、海啸、泥石流等自然灾害的发生都会伴有次声波的产生,因此,对次声信号的采集和分析是预防一些自然灾害的重要手段^[1-2]。

目前应用最广泛的次声传感器是电容式次声传感器^[3],但是电容式次声传感器易受电磁干扰,且不易长距离传输。光纤式次声传感器以其抗电磁干扰、适宜远距离传输等优点成为近年声传感器领域的重点研究方向^[4]。2010年,蒋冰莉等^[5]提出了一种基于微光机械(MOEMS)敏感的光纤低频声传感结构,探测灵敏度达到 200 mV/Pa,探测下限达到 4 Hz;2011年,李双信等^[6]提出了一种基于马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪的单模光纤声波传感器,探测下限也达到了 4 Hz;2016年,王顺等^[7]设计并研发了基于有机膜片的光纤外腔式法布里-珀罗干涉仪(EFPI)次声传感器,探测下限达到 1 Hz,灵敏度达到 121 mV/Pa。

EFPI 由于结构简单、灵敏度高,已被广泛应用于温度、应力、电压和位移等物理量的测量^[8-10]。关于 EFPI 膜片结构和固有频率对灵敏度的影响的文献报道较少,为此,本文在理论分析和仿真的基础上,设计并制作了以直径为 1 inch (1 inch = 2.54 cm)、膜厚为 5 μm 的镍膜作为振膜的膜片式 EFPI 传感器,获得了较高的灵敏度。

2 膜片式 EFPI 传感器结构和原理

膜片式 EFPI 传感器的原理结构如图 1 所示,其核心结构包括用于感应声信号的振膜和用于传输光信号的光纤,其中振膜的反光面和光纤端面构成光纤法布里-珀罗腔。

图 1 中,从光纤导入的入射光在光纤端面会发生反射,形成反射光 I_1 ,从光纤端面透射的光经过振膜反光面反射,重新耦合进入光纤,形成反射光 I_2 。由于光纤端面的反射率很低(约为 4%),振膜反射的光经光纤端面再次反射后强度非常微弱,可以忽略。因此,该结构为低精细度法布里-珀罗腔,其输出的光信号等效于双光束干涉信号。根据干涉理论,干涉光强满足

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (1)$$

式中: $\varphi = 4\pi nL/\lambda$, L 为光纤法布里-珀罗腔的腔长, λ 为光波长, n 为介质折射率。

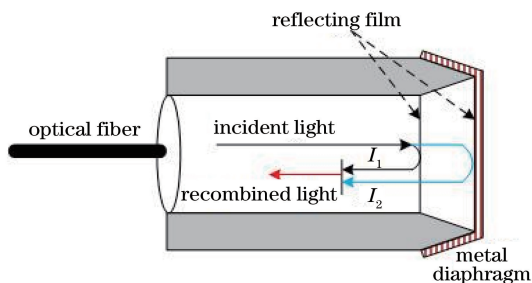


图 1 膜片式 EFPI 传感器结构

Fig. 1 Structure of diaphragm EFPI sensor

当敏感振膜在外界声波作用下作受迫振动时,光纤法布里-珀罗腔长度发生变化,从而引起相位差改变。通过对干涉信号进行检测和解调,可以得到原始的外界声波信号。

图 2 为传感器的低频次声扰动与输出信号的转化关系。当传感器工作在干涉光谱一个线性区间的中点(静态工作点,简称 Q 点)时,光强的变化率最大,对应灵敏度最高。同时,为保证经光电转换后的输出信号不失真,声波引起的相位变化最大不能超过干涉光谱的一个线性区间,即

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi n \Delta L}{\lambda} < \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

故

$$\Delta L < \frac{\lambda}{8n} = 193.75 \text{ nm}, \quad (3)$$

式中:介质折射率 $n \approx 1$,工作波长为 1550 nm,即当传感器工作在 Q 点,且振膜的最大振幅不超过 193.75 nm 时,可以获得最大灵敏度和无失真输出波形。

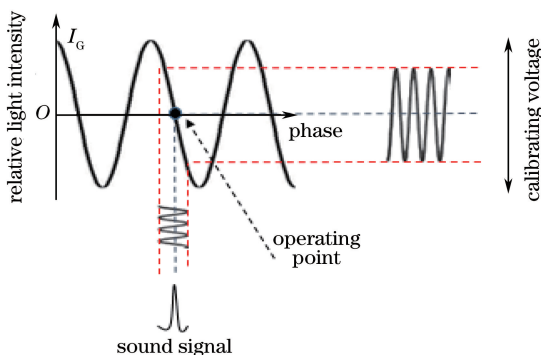


图 2 低频次声扰动与输出信号的转化关系

Fig. 2 Relationship between output signal and low-frequency infrasound disturbance

3 传感器设计及制作

3.1 圆形膜片理论与仿真

膜片式 EFPI 声传感器性能的关键点在于振膜的振动特性。根据不同振膜的结构参数,传感器圆形

振膜的安装方式分为周边拉伸和周边固支两种^[11]。由于周边拉伸式安装方式通常用于安装厚度较薄、弯曲刚度小的振膜,并且可以减小声信号的失真,因此本文采用这种安装方式。根据弹性力学原理,利用集中参数计算圆形膜片的一阶谐振频率,表示为^[12]

$$f = \frac{2.405}{2\pi a} \sqrt{\frac{T}{\rho h}}, \quad (4)$$

式中: a 、 ρ 和 h 分别为圆形振膜的半径、体密度和厚度; T 为施加在圆形振膜上的预应力。

采用 ANSYS 有限元分析软件,选取参数 $a = 12.7 \text{ mm}$ 、 $h = 3 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $\rho = 8800 \text{ kg/m}^3$ 、 $T = 400 \text{ MPa}$,求解一阶模态,结果如图3所示,一阶谐振频率为

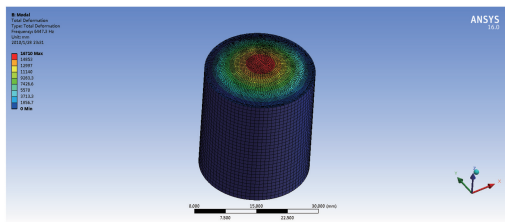


图3 ANSYS 一阶模态分析结果

Fig. 3 Result of first-order modal analysis by ANSYS

6447.3 Hz。

将仿真分析所用的参数代入(4)式,可计算出 $f = 6420 \text{ Hz}$ 。在施加同样大小的预应力情况下,仿真值与理论值的偏差不足 0.5%,说明仿真模型正确,结果真实可靠。

谐响应分析可以获得振膜在外界作用下的频率响应特性。由于本文所设计的低频声传感器要求在较低频率下具有很好的响应,因此需要通过设计模型参数来降低振膜的一阶谐振频率。图4为通过 ANSYS 有限元仿真软件改变不同模型参数得到的仿真结果。

图4(a)中,保持其他参数一致,改变振膜材料为铜、铝、镍时,得到一阶谐振频率分别为 6400、11700、6450 Hz;图4(b)中,改变振膜厚度分别为 10、5、3 μm 时,得到的一阶谐振频率均在 6450 Hz 附近,随厚度变化很小;图4(c)中,改变振膜半径为 6.35 mm 和 12.7 mm 时,得到一阶谐振频率分别为 12950 Hz 和 6450 Hz;图4(d)中,改变振膜预应力为 200 MPa 和 400 MPa,得到的一阶谐振频率分别为 4550 Hz 和 6450 Hz,随振膜预应力变化很大。

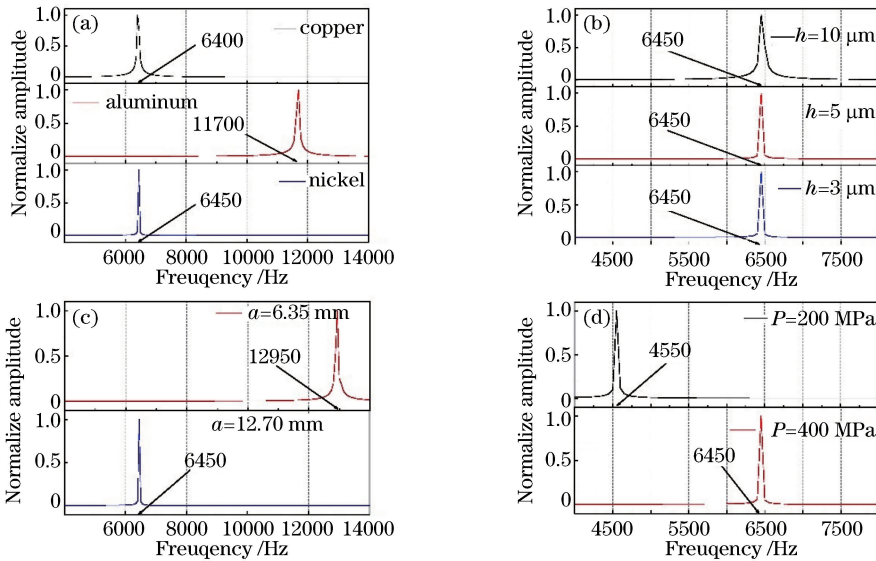


图4 不同模型参数与一阶谐振频率的关系。(a)振膜材料;(b)振膜厚度;(c)振膜半径;(d)振膜预应力

Fig. 4 Relationship between different model parameters and first-order resonant frequency. (a) Diaphragm material; (b) diaphragm thickness; (c) diaphragm radius; (d) diaphragm prestress

从上述结果可知:要得到更低的一阶谐振频率,需要增大振膜半径、选取密度更大的振膜材料、减小振膜的预应力。结合实际,业内金属振膜材料常选用钛、镍、不锈钢等,其中镍的密度最大,因此材料选择镍;声学领域传感器探头的直径尺寸都是以 1 inch(25.4 mm)、1/2 inch(12.7 mm)、1/4 inch(6.35 mm) 等为标准,因此本文尺寸半径选取

1/2 inch(12.7 mm);定量控制振膜预应力比较困难,因此只能通过膜片的张弛程度定性地控制预应力大小。

综上,选取振膜半径 1/2 inch(12.7 mm)、厚度 5 μm 、振膜材料为镍这组参数进行谐响应分析,结果如图5所示,着重关注低频(0.1~20 Hz)频段。可以看出,在 0.1~20 Hz,振膜的最大振幅在

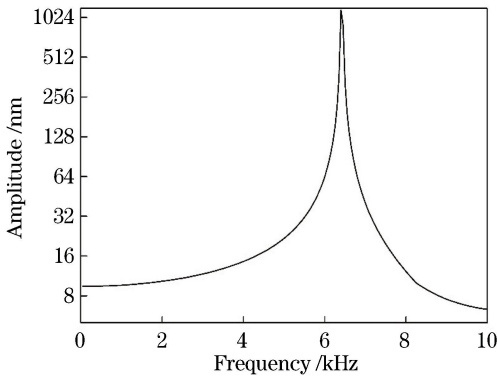


图5 ANSYS有限元谱响应分析结果(0~10 kHz)
Fig. 5 Results of finite element harmonic response analysis by ANSYS (0-10 kHz)

9.42 nm以上。仿真结果从理论上说明该传感器可以在 0.1 Hz 下获得很好的响应。

根据模型参数仿真结果,本文制作了四周拉伸型光纤 EFPI 声传感器,振膜半径为 1/2 inch

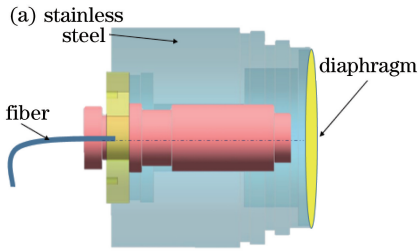


图6 EFPI传感器。(a)结构示意图;(b)实物
Fig. 6 EFPI sensor. (a) Structural diagram; (b) photograph

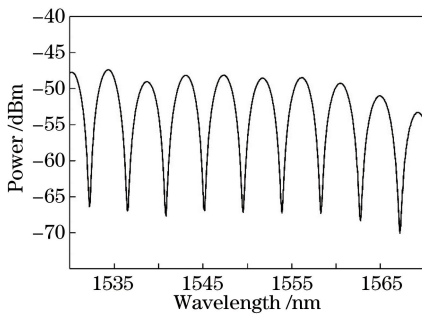


图7 EFPI传感器探头干涉光谱
Fig. 7 Interference spectrum of EFPI sensor

4 分析与讨论

4.1 测试系统

光纤 EFPI 声传感器测试系统如图 8 所示。整套系统由光学部分和电学部分组成。其中光学部分包含 1550 nm 的激光光源、光纤环形器与 EFPI 低频声传感器探头。以低频声发射腔(B&K42AE)作

(12.7 mm)、厚度为 5 μm,振膜材料为镍。

3.2 传感器制作

图 6(a)为传感器探头的结构示意图,主要由光纤、光纤内芯、振膜和不锈钢外壳组成,图 6 (b)为传感器探头成品实物。

图 7 为采用放大自发辐射(ASE)宽带光源和光谱分析仪(AQ6376B,横河电机公司,日本)测得的 EFPI 传感器的干涉光谱,谱线分布平整均匀,在 1550 nm 光波附近干涉谱线调制度接近 20 dB。自由光谱范围与腔长的关系为

$$F_{SR} = \frac{\lambda^2}{2nL}, \quad (5)$$

式中:条纹自由光谱范围 $F_{SR} = 4.31 \text{ nm}$;光源波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$;介质折射率 $n = 1$ 。

根据(5)式可求得制得样品的腔长 $L = 278.7 \mu\text{m}$,符合设计要求,并且腔长可以通过结构的螺纹自由调节,即 F_{SR} 可以自由调节。

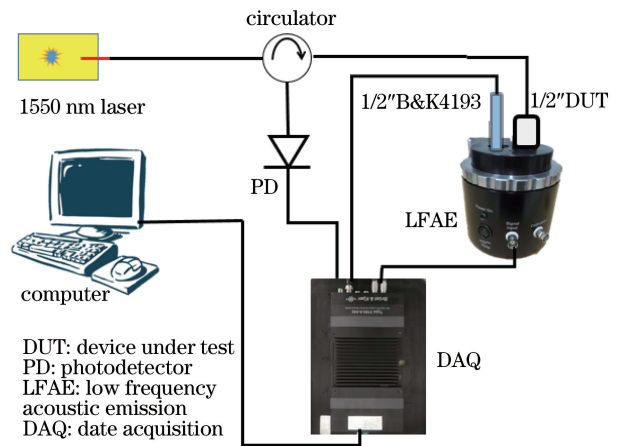


图8 光纤 EFPI 声传感器测试装置

Fig. 8 Test device of optical fiber EFPI acoustic sensor
为声源,将 B&K4193 电容式低频声传感器与待测 EFPI 低频声传感器插入其中,待测 EFPI 低频声传感器探测到的声信息以光信号的形式输出,再由光电探测器(PD)转换为电信号,与 B&K4193 探测声

信息所产生的电信号一同由声音振动分析模块(B&K 3160)采集,然后在计算机上的软件中处理并显示数据。

B&K 3160 是一个理想的声测试设备,结合了标准驱动信号输出与检测信号输入的功能。在本测试系统中,由 B&K 3160 输出设定幅值与频率的电压信号,驱动低频声发射腔发出所需声压与频率的声信号。

4.2 实验结果和分析

为了表征所设计的低频声传感器的性能(频率响应特性和灵敏度特性),实验使用低频耦合腔产生了 40 dB、0.1~20 Hz 的扫频信号,图 9(a)所示分别为待测传感器和标准传感器的频率响应曲线。根据频率响应-灵敏度换算[(6)式]可以得到图 9(b)所示的灵敏度曲线。

$$K = 12.9 \times 10^{\Delta/20}, \quad (6)$$

式中: K 为待测声传感器的灵敏度, mV/Pa ; Δ 为图 9(a)两条频率响应曲线的纵坐标差值。可以看出,所研制的低频声传感器在 0.1~20 Hz 范围内具有良好的频率响应特性;1 Hz 时灵敏度高达 285 mV/Pa 。

图 10~12 为低频耦合腔分别产生 5、1、0.5 Hz 单频声音时,声传感器所采集的时域信号和经变换得到的频谱。可以看出,所设计的传感器能够很好地检测低频信号,信噪比均在 20 dB 以上。上述实验数据均来自传感器解调电路输出,未经任何后期软件数据处理,后期工作可以在此基础上实现软件滤波,消除频谱中谐波分量,以达到更好的测量效果。

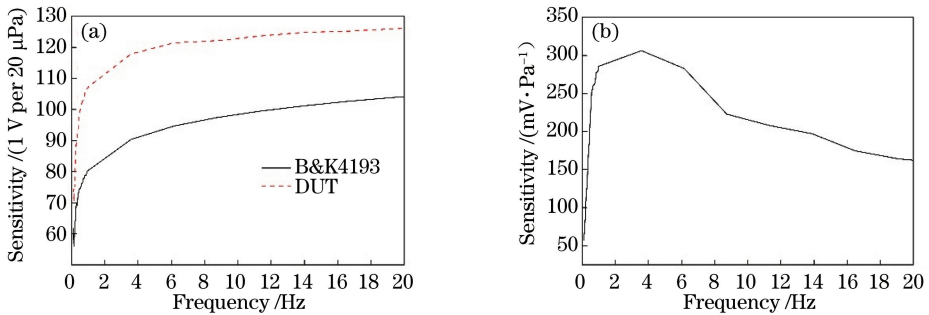


图 9 传感器特性表征。(a)频率响应;(b)灵敏度

Fig. 9 Characterization of sensor characteristics. (a) Frequency response; (b) Sensitivity

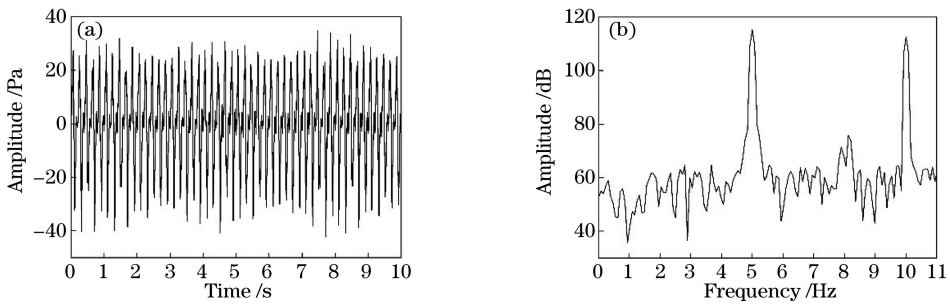


图 10 5 Hz 声源激励下的传感器信号输出。(a)时域;(b)频谱

Fig. 10 Signal output of sensor under 5 Hz sound source excitation. (a) Time domain; (b) frequency domain

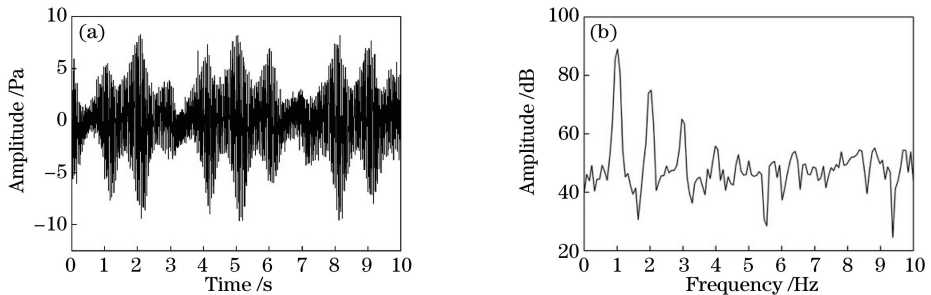


图 11 1 Hz 声源激励下的传感器信号输出。(a)时域;(b)频谱

Fig. 11 Signal output of sensor under 1 Hz sound source excitation. (a) Time domain; (b) frequency domain

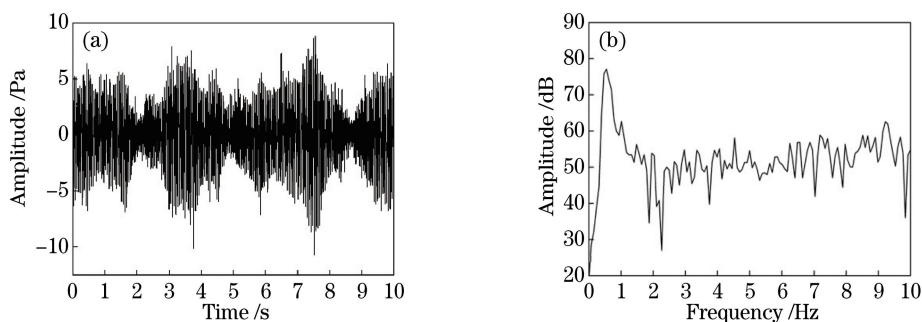


图 12 0.5 Hz 声源激励下的传感器信号输出。(a)时域;(b)频谱

Fig. 12 Signal output of sensor under 0.5 Hz sound source excitation. (a) Time domain; (b) frequency domain

5 结 论

对基于光纤 EFPI 结构的低频声传感器进行了优化设计,通过理论分析和 ANSYS 有限元仿真,确定了传感器结构的最佳参数,并采用四周拉伸式振膜安装方式,成功制备出改进型传感器。研究表明:该改进型光纤式低频声传感器在 0.1~20 Hz 范围内具有良好的频率响应特性,1 Hz 时灵敏度高达 285 mV/Pa,在低频下限和灵敏度两个方面取得了明显的突破。

参 考 文 献

- [1] Jiang H. A study of the direction of infrasonic origin on earthquake forecast [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2002: 1-4.
蒋灏. 地震预报中次声波声源方向的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2002: 1-4.
- [2] Xia Y Q, Cui X Y, Li J Z, *et al.* Research of abnormal infrasound signals before worldwide earthquakes [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(3): 463-469.
夏雅琴, 崔晓艳, 李均之, 等. 震前次声波异常信号的研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(3): 463-469.
- [3] Guo Q. Research of infrasound sensor and detecting technology [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2009: 2-4.
郭泉. 次声传感器及次声检测技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2009: 2-4.
- [4] Gong Z F, Chen K, Zhou X L, *et al.* High-sensitivity Fabry-Perot interferometric acoustic sensor for low-frequency acoustic pressure detections [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(24): 5276-5279.
- [5] Jiang B L, Yang K T, Wang J A, *et al.* Design and experimental research of the MOEMS low frequency

sensor[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(10): 1096-1100.

蒋冰莉, 杨坤涛, 王江安, 等. MOEMS 低频声传感器的设计与实验研究 [J]. 激光与红外, 2010, 40(10): 1096-1100.

- [6] Li S J, Liang J S, Wang F J, *et al.* Experiment of a single-mode fiber acoustic sensor based on Mach-Zehnder interferometer [J]. College Physics, 2011, 30(6): 52-56.

李双倩, 梁景舒, 王福娟, 等. 基于 Mach-Zehnder 干涉仪的单模光纤声波传感器的研究 [J]. 大学物理, 2011, 30(6): 52-56.

- [7] Wang S. Research and application of fiber-optic low-frequency acoustic sensing technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 73-76.

王顺. 光纤低频声波传感技术研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 73-76.

- [8] 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.

- [9] Liu J P, Wang Y, Liu J H. Temperature characterization of extrinsic fiber Fabry-Perot interferometric sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 110601.

刘加萍, 王彦, 刘吉虹. 非本征光纤法布里-珀罗干涉传感器的温度特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 110601.

- [10] Zhu J L, Wang M, Cai D Y, *et al.* A fiber Fabry-Perot micro pressure sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0428002.

朱佳利, 王鸣, 蔡东艳, 等. 光纤法布里-珀罗微压传感器 [J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0428002.

- [11] Xu Z B. Research on key technology of reflective optical fiber acoustic sensor [D]. Quanzhou: Huaqiao

- University, 2008: 17-19.
- 徐志保. 反射式光纤声音传感器的关键技术研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2008: 17-19.
- [12] Du G H, Zhu Z M, Gong X F. Fundamentals of acoustics[M]. 3rd ed. Nanjing: Nanjing University Press, 2012: 62-63.
- 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础 [M]. 3 版. 南京: 南京大学出版社, 2012: 62-63.