光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250827002

# 20 Hz~12 kHz宽频带光纤法布里-珀罗声波传感器

顾骏华[1,3]，黄天宇[1]，戚　昱[1]，张晓祥[1]，陶文卓[1]，常建华[1,2]*

（南京信息工程大学1. 电子与信息工程学院；2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心；
3. 浦口经开区创新港研究生联培基地，南京 210044）

**摘　要：** 文章提出一种基于银膜/聚二甲硅基氧烷（PDMS）复合振膜的光纤法布里-珀罗声波传感器，可有效检测20 Hz～12 kHz频带内的声波信号。该传感器的光纤F-P腔由单模光纤端面与银膜分别构成两个反射面，PDMS充当传感单元，将声音振动转化为机械变形，实现对环境声信号的探测。实验结果表明，在20 Hz～12 kHz范围内均表现出良好的频谱响应特性，信噪比均在40 dB以上，信号平坦度好；在20～80 Hz低频声信号作用下，灵敏度可达约43 mV/Pa；在固有频率声信号作用下，其声压灵敏度为53.66 mV/Pa@2kHz，最小检测压力为6.6 μPa/Hz$^{1/2}$@2kHz。该传感器结构简单、成本低廉，可高效检测宽频带声信号，且对低频信号具有高检测灵敏度，在水下目标探测等领域具有广阔的应用前景。

**关键词：** 法布里-珀罗干涉仪；声波传感器；湿法转移；磁控溅射

**中图分类号：** O436　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－0989－09

## 20 Hz~12 kHz Broadband Fiber Fabry Perot Acoustic Sensor

GU Junhua[1,3], HUANG Tianyu[1], QI Yu[1], ZHANG Xiaoxiang[1], TAO Wenzhuo[1], CHANG Jianhua[1,2]

(1. School of Electronic and Information Engineering; 2. Jiangsu Province Collaborative Innovation Center for Atmospheric Environment and Equipment Technology; 3. Pukou Economic Development Zone Innovation Port Graduate Joint Training Base, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, CHN)

**Abstract:** A fiber Fabry Perot acoustic sensor based on a silver film/polydimethylsiloxane (PDMS) composite diaphragm was developed, to effectively detect acoustic signals in the frequency band of 20 Hz to 12 kHz. The fiber F-P cavity of the sensor consisted of two reflecting surfaces: a single-mode fiber end face and a silver film. The PDMS acts as a sensing unit, converting sound vibrations into mechanical deformations to detect environmental sound signals. In experimental results, it exhibited good spectral response characteristics in the range of 20 Hz to 12 kHz, with a signal-to-noise ratio above 40 dB and good signal flatness. Under the action of low-frequency sound signals ranging from 20 to 80 Hz, the sensitivity could reach approximately 43 mV/Pa. Under natural frequency sound signals, the sound pressure sensitivity was 53.66 mV/Pa@2kHz, The minimum detection pressure was 6.6 μPa/Hz$^{1/2}$@2kHz. This low-cost sensor has a simple structure and can effectively achieve efficient detection of wideband acoustic signals, with high detection sensitivity to low-frequency signals. The sensor has broad application prospects for underwater target detection and other fields.

**Key words:** Fabry Perot interferometer; acoustic sensor; wet transfer; magnetron sputtering

**收稿日期：**2025－08－27.

**基金项目：**国家自然科学基金项目（62175114，62375137）.

*通信作者：常建华

## 0 引言

声波作为一种机械振动波，是信息传递的重要载体，蕴含着丰富的信息，声波检测技术在医学影像[1-4]、危险气体检测[5-6]、工业结构健康监测[7-9]以及电网安全监控[10-12]等诸多领域中具有重要的应用价值和现实意义。与传统的电声传感器相比，光纤传感器具有不受电磁场影响、高灵敏度与宽动态范围和易于复用与分布式传感等优势，因此光纤声波传感器正处于快速发展阶段[13]。常用的光纤声波传感机制有法布里-珀罗[14-16]、马赫-曾德尔[17-18]、迈克尔逊[19]、萨格纳克[20]和光纤布拉格光栅[21-22]等。

其中，光纤法布里-珀罗干涉仪（FPI）兼具高灵敏度、高精度和高稳定性，并凭借对电磁干扰免疫、耐腐蚀、低温度交叉影响等优势，可在极端或空间受限环境中长期可靠工作[23]。2018年，Zhao等[24]提出一种基于聚二甲基硅氧烷（PDMS）振膜嵌入空心光纤（HCF）的法布里-珀罗波（F-P）低频声压传感器，在10～50 Hz低频段的信噪比（SNR）达80 dB，声压灵敏度为0.427 mV/mPa，其低频探测能力使其适用于地震声探测和油气勘探等领域。然而，该结构利用毛细效应将PDMS振膜嵌入构成F-P干涉结构，制作工艺可控性较差，并且可测频率范围较窄限制了其应用领域。2021年，Zhang等[25]提出基于阿基米德螺旋金属振膜的声传感器，光纤端面与螺旋振膜内表面构成非本征法布里-珀罗干涉仪（EFPI），实验测得1～20 kHz频段内平均灵敏度为2.51 mV/Pa，最小检测压力（MDP）为3.9 mPa/Hz$^{1/2}$。相较于前者，该设计结构更为紧凑，且膜片材料耐腐蚀性增强，显著提升了传感器稳定性。然而，金属膜片的高杨氏模量导致其刚度过大，在相同声压作用下形变量减小，从而降低了传感器灵敏度，使其难以检测低声压级的声信号。2024年，丁武成等[14]提出一种基于微机电系统工艺制备的氮化硅（$Si_3N_4$）方形膜片光纤法布里-珀罗声波传感器，该传感器利用氮化硅窗口振膜与光纤端面构成F-P干涉腔。实验测得厚度为50 nm、边长为2 mm的氮化硅膜片在其16.5 kHz共振频率下的灵敏度为60.175 mV/Pa，*MDP*为2.57 μPa/Hz$^{1/2}$，在1～20 kHz频段内具有平坦的信噪比特性。该传感器同样基于F-P干涉原理，采用氮化硅作为敏感膜片。尽管氮化硅具有接近金属的材料刚度，但通过化学气相沉积技术将其膜厚控制在纳米级，显著增大了膜片的中心位移响应，从而有效提升了传感器的灵敏度。然而，该传感器的局限在于高杨氏模量导致器件固有频率偏高，对低频声学信号的灵敏度相对不足，制约了其在需低频探测应用领域的适用性。

本文提出一种基于银膜/PDMS复合振膜的光纤F-P声波传感器，器件由单模光纤（SMF）端面与附着于PDMS的银膜构成EFPI。得益于PDMS较低的杨氏模量和声阻抗，所设计的复合振膜整体刚度显著优于金属或氮化硅等膜片，使其在微弱声压下即可产生较大形变，有效提升了低频（小于100 Hz）声信号的检测灵敏度。同时，PDMS的低声阻抗特性降低了声波在传感介质与振膜界面处的反射损耗，提高了中高频声波的能量转化效率。实验结果表明，优化设计的PDMS振膜（厚度为85 μm，半径为2 mm）能够检测20 Hz～12 kHz的声波信号。而银膜作为高反射率金属层，弥补了PDMS材料本身透射率较高所带来的干涉性能不足，确保了F-P干涉腔的性能。该传感器结构简单、工艺可控，在显著提升低频声波灵敏度的同时，也在水下声探测及工业结构健康监测等领域具有广阔应用前景。

## 1 传感器原理分析

### 1.1 F-P干涉原理

实验中的薄膜式光纤F-P声波传感器探头结构如图1所示，该传感器探头主要由PDMS薄膜和银膜组成，将一小片银膜（尺寸为0.5 mm×0.5 mm×80 nm）粘附在PDMS薄膜上形成最终的敏感膜片。为精确控制敏感膜片的受力半径，将

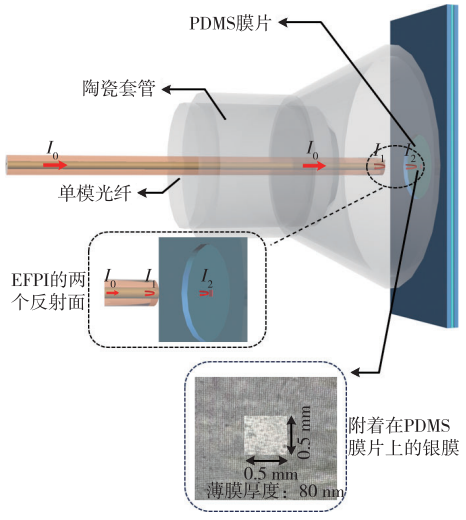



图1 声波传感器探头结构

PDMS薄膜固定于挖孔的玻璃片上，孔径为4 mm，并在受控环境下干燥。其中SMF端面作为第一个部分反射镜，附着在PDMS薄膜上的银膜作为第二个反射镜，干涉现象发生在两个反射镜的反射光之间，构成一个EFPI。当声波作用于传感器时，在F-P腔折射率保持不变的情况下，PDMS薄膜因受到声压作用发生形变，导致F-P腔腔长发生变化，其输出反射光光强随之改变，解调该反射光的强度变化信号，实现对声波信号的检测。

由图1可知，SMF端面和银膜表面充当干涉仪的两个反射面，其间由空气隔开，形成一个简易的F-P干涉腔。两个反射光束($I_1$,$I_2$)相互干涉，构成双光束光纤法布里-珀罗干涉仪。在该FPI传感器结构中，SMF，Air和Ag的折射率分别为1.46，1.0和1.333。折射率$R$可以表示为：

$$R=\left(\frac{n_0-n_1}{n_0+n_1}\right)^2 \tag{1}$$

式中，$n_0$，$n_1$表示两种介质的折射率。

由于介质折射率差异，其界面处发生菲涅尔反射，依据公式(1)计算得到两界面的反射率($R_1$,$R_2$)分别为3.49%，2.04%。考虑到银膜厚度仅为80 nm，在这种情况下，透射光可忽略不计，因此输入光几乎完全被这两个反射面反射回来。基于此，FPI可以看作是简易的双光束光纤法布里-珀罗干涉仪。

FPI的两个反射面由SMF端面和银膜表面构成，由于PDMS具有高泊松比和低杨氏模量特性，使得PDMS薄膜更容易接受到微弱的外部声振动信号。声音作用到膜片致使其变形，从而导致干涉仪腔长$L$不断变化，反射光强也随之改变。因此，可以通过检测反射光强的变化实现声波信号的采集，该双光束光纤法布里-珀罗干涉仪的反射光谱强度函数可以表示为：

$$I_{F\text{-}P}=I_0\left[R_1+R_2+2\sqrt{R_1R_2}\cos\left(\frac{4\pi nL_0}{\lambda}+\Delta\varphi\right)\right] \tag{2}$$

$$\varphi_0=\frac{4\pi nL_0}{\lambda} \tag{3}$$

式中，$I_0$为入射光的光强，$n$是传感腔内介质的折射率，$L_0$为空气腔初始腔长，$\lambda$为入射光波长，$\varphi_0$为初始相位，$\Delta\varphi$是相位随腔长的变化量。其中干涉光谱的自由光谱范围($FSR$)为：

$$FSR=\frac{{\lambda_0}^2}{2nL_0} \tag{4}$$

式中，$\lambda_0$为干涉峰波长。

由公式(2)和(4)可知，当F-P干涉腔的腔长发生变化时，反射光的相位和光强也会随之改变，从而可以通过检测光强的变化来解调外界物理量的信息。反射光谱通过快速傅里叶变换(FFT)能获得其空间频谱，其中空间峰值频率可表示为：

$$f=\frac{2nL}{{\lambda_0}^2} \tag{5}$$

在该传感系统中，采用强度解调方法[24]，即通过光电探测器(PD)实时监测干涉光强随腔长的动态响应。如图2所示的F-P腔反射谱表明，当初始相位被调控至正交工作点Q时，反射光谱随着光程差的变化近似呈现线性变化关系，此时传感器灵敏度达到最大。然而，在初始相位位于波峰或者波谷时，传感器的灵敏度显著降低，并且探测到的声信号也会出现部分失真。由公式(3)可知，在实验中需要精确控制F-P腔长以及窄带激光波长以寻找工作点Q，从而使得传感器性能达到最优状态。

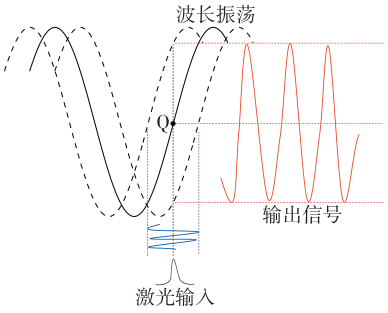



图2　强度解调原理图

### 1.2　圆形膜片形变理论

在均匀平面声波垂直作用下，边缘固定的圆形传感膜片会随声波频率的变化而产生同频振动，进而周期性地改变F-P干涉腔的腔长，实现声信号的光学转换与检测。由公式(2)可得此时通过检测反射光强$I_{F\text{-}P}$的变化继而解调声信号。

为了实现宽频带以及高灵敏度声信号的检测，本文设计的敏感薄膜PDMS膜片的厚度为$\delta$，当均匀声压作用于振膜时，膜片受到声压的形变。根据受迫振动原理，当声信号频率$f$达到膜片固有频率时，则膜片中心变形最大如图3所示，定义为[26]：

$$d=\frac{3(1-\mu^2)r^4P}{16\delta^3E}\frac{f_m^2}{\sqrt{(f_m^2-f^2)^2+4f^2\xi^2}} \tag{6}$$

式中，$\mu$，$E$和$r$分别为敏感膜的泊松比、杨氏模量和

半径，$\xi$为阻尼系数，$P$为薄膜所受压力，$f_m$为敏感膜的$m$阶固有频率。

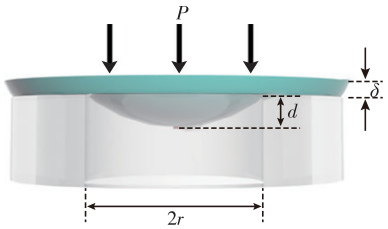



图3 膜片受压分析图

保证PDMS薄膜平整转移到挖孔玻璃片上，其零压力下一阶固有频率$f_0$可定义为：

$$f_0=\frac{10.17\delta}{r^2}\sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}} \tag{7}$$

对于PDMS膜片，不同的材料性能值为：杨氏模量$E$为750 kPa，材料密度$\rho$为970 kg/m$^3$，泊松比$\mu$为0.49；考虑半径为2 mm，厚度为85 μm，可计算出一阶固有频率为1 990.396 Hz。

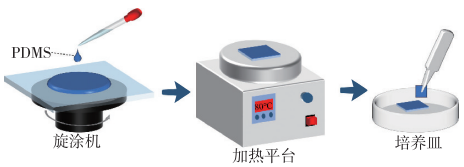
除了传感器对声波信号的灵敏度，MDP也是薄膜式F-P声波传感器的重要性能指标之一，其代表了传感器的灵敏度极限。$MDP$可通过以下公式进行计算[27-28]：

$$MDP=\frac{P}{10^{\frac{SNR}{20}}\sqrt{\Delta f}} \tag{8}$$

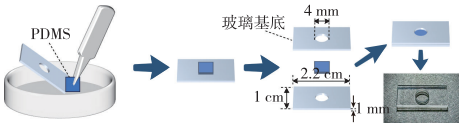
式中，$P$表示声压，$\Delta f$表示快速傅里叶变换频域最小间隔，$SNR$表示时域谱经过快速傅里叶变化得到的频率谱的信噪比。$MDP$的值越小说明该传感器能适用于微弱压力检测领域。

## 2 传感器的制备

采用湿法转移[29]和磁控溅射[30]技术制备敏感膜片，传感膜片的制备流程图如图4所示。




(a) PDMS薄膜的制备




(b) 湿法转移封装隔膜

图4 传感膜片的制备流程图

如图4(a)所示，首先将PDMS的主剂和固化剂按10∶1的质量比例混合，充分搅拌至均匀后放置20 min，待气泡自然消除。同时，将洁净的玻璃基片(2.5 cm×2.5 cm)固定于匀胶机的吸盘上，取适量混合均匀的PDMS，滴加在玻璃片中央。随后，采用两步旋涂程序：第一步，以500 rpm的转速旋涂70 s，使PDMS液滴均匀铺展形成初始液膜；第二步，将转速提升至800 rpm旋涂120 s，获得均匀薄膜。旋涂完成后，将载有PDMS薄膜的玻璃基片置于80℃加热台上固化2 h。固化后，利用PDMS固有的疏水性，在去离子水中使用镊子缓慢剥离PDMS薄膜，获得一张完整且均匀的薄膜。然后采用湿法转移技术将薄膜转移至一块带有挖孔(半径为2 mm)的定制玻璃片上，确保薄膜在挖孔区域平整覆盖。如图5所示，所得PDMS薄膜在玻璃片中间的均匀厚度为84.75 μm，基底边缘出现的不规则现象是由于在将固化的PDMS膜片转移到玻璃基底后，使用刀片修整去除边缘多余部分所致。最后，在其上方覆盖另一片相同规格的玻璃片，并使用紫外固化胶(UV胶)对两片玻璃片进行粘合封装，完成结构固定，具体步骤如图4(b)所示。

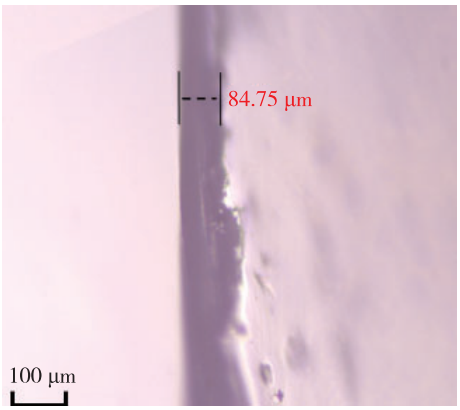
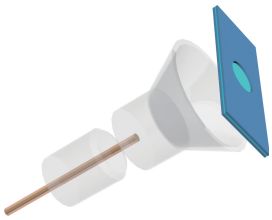


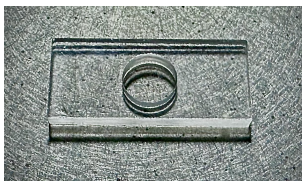

图5 光学显微镜下的PDMS薄膜

采用磁控溅射技术在玻璃基底上沉积银膜，溅射时间为4 min，获得目标厚度为80 nm的银层。随后，在银膜表面滴涂适量质量分数为4%的聚乙烯醇(PVA)溶液，并于匀胶机上依次进行低速(500 rpm，50 s)和高速(800 rpm，80 s)旋涂成膜。将旋涂后的样品置于30℃加热台上加热，待溶剂挥发完全成膜。使用刻刀在干燥的PVA/银复合膜上刻出约0.5 mm×0.5 mm的方形区域，并用镊子剥离该复合膜片。将此膜片浸入水中，PVA层溶解，最终得到独立厚80 nm的银膜。最后，将其精确粘

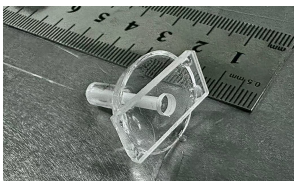
附于预先封装的PDMS薄膜中心位置，完成敏感膜片的组装，实物图如图6(b)所示。



(a) 传感器结构



(b) 传感膜片



(c) 传感器实物

图6　光纤F-P宽频带声波传感器

最后将敏感膜片、陶瓷套管与定制的喇叭状套管用UV胶粘固定，如图6(a)所示。同时，准备一段SMF，将其端面切割平整并用酒精清洁处理。制备过程中使用光纤光栅解调仪(SM125, Micron Optical)对F-P腔的反射光谱进行实时动态监测，将处理后的SMF固定于微距位移平台上，精确控制其插入陶瓷套管的深度，并通过精细调节光纤端面与敏感膜片之间的距离，使传感器工作点处于如图2所示的Q点。各个部分都用UV胶进行固定，最后完成传感器探头的设计与组装，实物图如图6(c)所示。

## 3　实验分析与讨论

### 3.1　光纤F-P腔声波传感实验装置

本实验搭建了如图7所示的声波检测系统。系统中使用电容式声传感器(AWA5636，频率响应范围为20 Hz~12.5 kHz，灵敏度为15 mV/Pa)来校准声压。其中光源部分采用可调谐窄带激光器，光源与光纤环形器的端口1连接，所制备的光纤声波传感器和PD分别连接光纤环形器的端口2和3。使用信号发生器(FY2300)作为信号源，驱动共振喇叭工作，激发声波信号，其发出的声音信号频率范围为20 Hz~20 kHz。声波驱动膜片振动，F-P腔随之调制，反射光强发生周期性变化，携带着声音信号的反射光通过环形器进入PD，光信号转换为电信号。

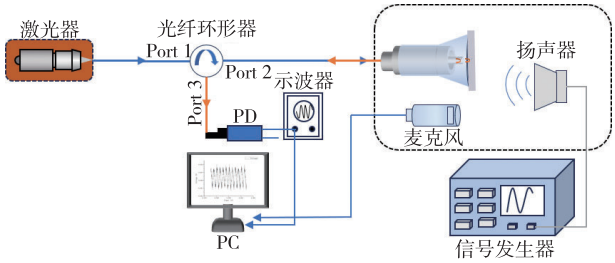
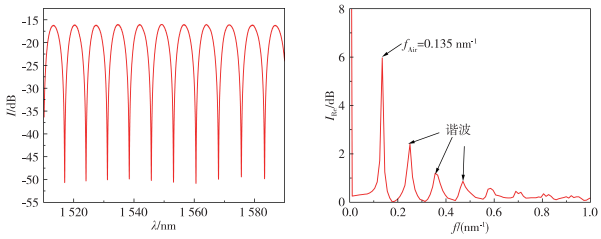
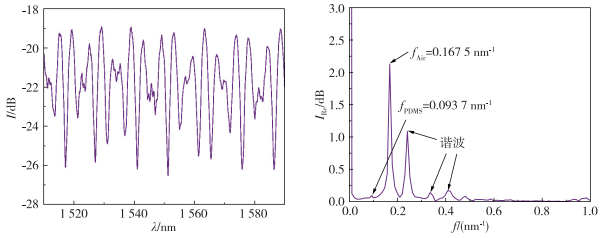



图7　实验系统示意图

银膜作为第二个反射面的FPI反射光谱如图8(a)所示，消光比为34.36 dB，其$FSR$为7.33 nm，由公式(3)计算得到空气腔长为163.89 μm。对应的空间频谱如图8(b)所示，其中空气腔的空间峰值频率$f_{\mathrm{Air}}$理论值为0.136 $\mathrm{nm^{-1}}$，与空间谱稳合较好，其余较高的空间峰值频率是空气腔的谐波频率。由于银膜的高反射率，有效提高了反射光的强度，从而增加反射光谱的消光比，相较于只有PDMS提升了4倍。图8(c)展示了仅有85 μm厚PDMS薄膜(无银膜)的反射光谱，PDMS折射率为1.405，理论计算得到$f_{\mathrm{PDMS}}$为0.099 43 $\mathrm{nm^{-1}}$，与空间谱稳合较好，空间峰值频率相对较弱是由于PDMS的高透射率，大部分光都从PDMS腔内投射出去。从图8(b)和图8(d)中可以观察到，两种传感器的空间频谱均呈现出单一尖锐主峰，能量高度集中。相比之下，高阶分量的幅值极低，几乎不参与信号形成，对传感器的灵敏度与线性度影响可忽略。




(a) PDMS/Ag传感器干涉光谱　(b) PDMS/Ag传感器空间频谱



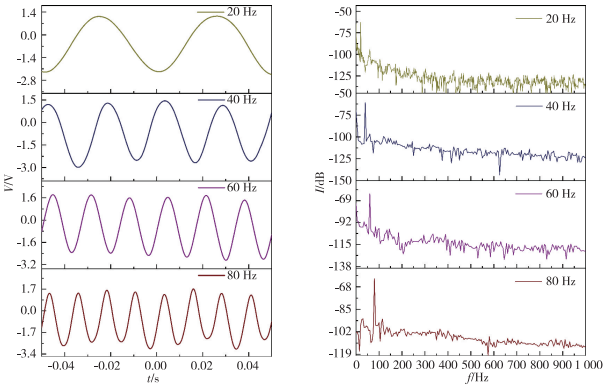

(c) PDMS传感器干涉光谱　(d) PDMS传感器空间频谱

图8　传感器反射光谱和空间频谱

### 3.2　实验结果与讨论分析

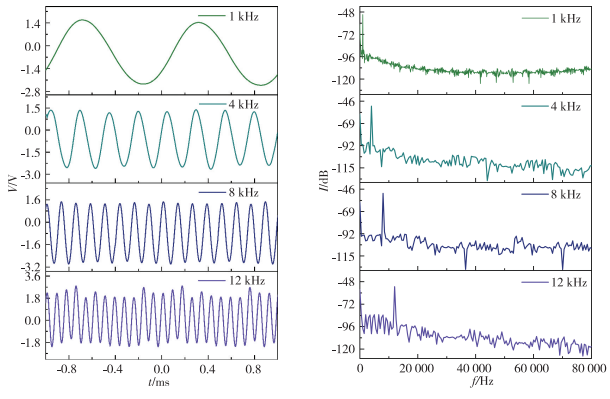
将参考声传感器(AWA5636)精确固定与待测传感器相同的位置，以接收来自扬声器的声场信号。通过信号发生器调控频率参数，声源发出低频声信号20~80 Hz以及高频声信号1~12 kHz。同

时精确调节信号发生器的输出电压，读取参考声传感器测得的声压分贝值，并将其换算成声压级，从而控制声压均为0.1 Pa，对设计的光纤声传感器进行测试。测试得到反射光强度经过PD转换成电压信号随着时间变化曲线如图9(a)和10(a)所示，可以看出在等幅变频声压激励下，传感器输出波形在时域内均呈现良好的幅值一致性与对称性。为了分析声传感器的频域特性，对检测到的时域信号进行频谱分析，得到如图9(b)和10(b)所示不同时域相对应的频率谱。可以看出在不同频率、相同声压的信号作用下，低频信号(20 Hz，40 Hz，60 Hz和80 Hz)的*SNR*分别为46.12 dB，43.48 dB，42.89 dB和45.4 dB；高频声信号(1 kHz，4 kHz，8 kHz和12 kHz)的*SNR*分别为53.17 dB，49.41 dB，49.96 dB和46.17 dB。这些结果表明，该传感器在低频和高频声信号都具有良好的频谱响应，且频谱中未出现倍频分量，这一特征表明其




(a) 20～80 Hz的时域谱　(b) 20～80 Hz的频率谱

图9　声压为0.1 Pa低频声信号下声传感器的时域响应和频率响应

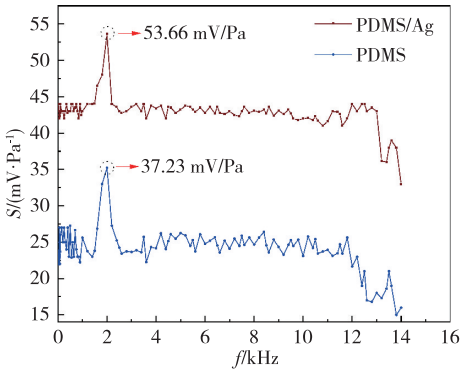



(a) 1～12 kHz的时域谱　(b) 1～12 kHz的频率谱

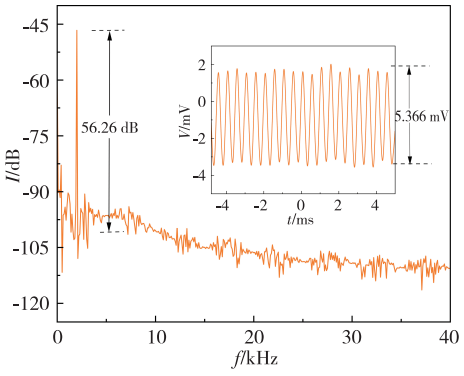
图10　声压为0.1 Pa高频声信号下声传感器的时域响应和频率响应

工作在图2所定义的正交工作点Q，此时器件性能达到最佳。

为了分析声波传感器在不同频率声信号作用下的灵敏度，分别制备了两种传感器：一种是采用PDMS/Ag的复合振膜，另一种是仅使用单层PDMS振膜(厚为85 μm，半径为2 mm)。通过重复上述的声压的标定方式，在保持声压恒定为0.1 Pa的条件下，在20 Hz～14 kHz的频率范围内，取若干频率点进行测试。信号发生器输出对应频率的正弦波，驱动扬声器产生稳定的声场，并在每个频率点记录示波器上电压值，得到不同频率声波作用下传感器的灵敏度如图11(a)所示。分析表明，在2 kHz的声波频率下，表面附着银膜的传感器灵敏度为53.66 mV/Pa，相比单层PDMS薄膜作为振膜相比，其灵敏度提升了约1.5倍。因此，后续研究均采用PDMS/Ag复合振膜作为敏感薄膜。在2 kHz的声信号频率下传感器灵敏度达到最大，为该PDMS膜片的固有频率，这与上文计算所得半径为2 mm、厚度为85 μm的PDMS膜片固有频率基本吻合。固有频率出现的轻微偏移的原因可能是在工艺上粘贴银箔，采用环氧树脂胶时引入的初始应力影响了PDMS膜片的固有频率。当




(a) 不同频率响应曲线

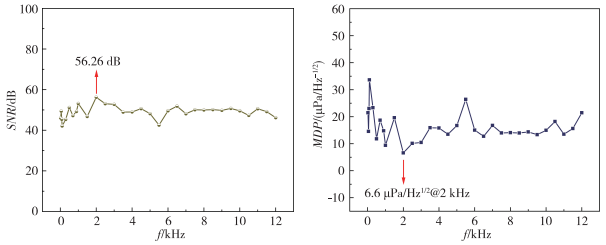



(b) 固有频率2 kHz声波作用下传感器的时频图

图11　传感器的频率响应曲线

2 kHz,0.1 Pa的声信号作用于传感器时,所测得到的时域和频率谱如图 11(b)所示,此时的 *SNR* 达到 56.26 dB,具有较高的信噪比。

在此基础上,测试并分析了传感器在 20 Hz~14 kHz 频率范围内的 *SNR*,其响应曲线如图 12(a)所示。可以看出,传感器在该频率范围内的 *SNR* 均在 40 dB 以上,这得益于 PDMS 的低声阻抗特性以及优化腔长的协同设计,使得该传感器获得了较高的信噪比。此外,通过公式(7)对 20 Hz~12 kHz 频率范围内不同的频率点进行计算,得到传感器 *MDP* 的特性曲线如图 12(b)所示。从图中可以得到基于 PDMS 的光纤法布里-珀罗声波传感器在谐振频率 2 kHz 的 *MDP* 为 6.6 μPa/Hz$^{1/2}$@2kHz。



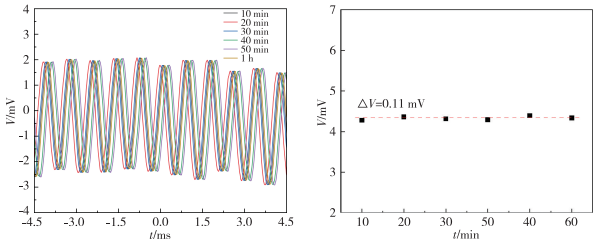

(a) 传感器的 *SNR* 响应　　(b) 传感器的 *MDP* 响应

图 12　传感器的 *SNR* 和 *MDP* 响应

为评估声波传感器的声压响应特性,采用信号发生器驱动扬声器产生功率为 100 Hz 的正弦声信号。在保持声信号频率恒定的条件下,通过调节信号发生器的输出电压,在声波频率固定的条件下,使扬声器发出声波的声压级在 0.1~1 Pa 范围内变化,传感器的输出电压随声压的变化呈现线性关系。对该实验数据进行线性拟合,计算得到该传感器在 100 Hz 声信号作用下的声压灵敏度为 42.751 mV/Pa,线性拟合系数为 0.998。这种结构的传感器对不同声压级和宽频率范围的声信号均表现出较高的灵敏度,能够精准捕捉外界声波的微小变化,具有出色的声压分辨率。同时,其较宽的频率响应范围拓展了应用场景,使其适用于更多领域的高精度检测需求。

### 3.3　传感器稳定性测试

稳定性是评估传感器性能的关键指标之一,尤其对于声波传感器来说。声波传感器作为声波信息检测的核心环节,其稳定性测试具有重要的研究意义。在上述实验中,当 PDMS 厚度为 85 μm、银膜厚度为 80 nm 的复合膜片作为声敏薄膜且空气腔长为 163.89 μm 时,传感器的性能最好,故选择该传感器进行稳定性测试。在室温条件(26℃±0.5℃)下,将声传感器与扬声器固定,控制声信号频率为 1.2 kHz,声压为 0.1 Pa,调节窄带光源波长使其工作在 Q 点,待传感器时域谱达到稳定状态后,在 1 h 内以 10 min 为间隔采集数据。如图 13 所示,图中显示了传感器时域谱随时间的变化曲线及其峰峰值数据。结果表明,该传感器在 1 h 内的峰峰值波动幅度极小,验证其具有长期稳定性。




(a) 时域谱变化　　(b) 峰值大小变化

图 13　稳定性测试结果

如表 1 所示,将所提出的基于 F-P 声传感器与其他类型的光纤声传感器性能进行比较。通过对比可见,传感器受限于结构设计与薄膜材料特性,难以同时兼顾宽频带以及对低频声信号的高灵敏度检测。其中,文献[24]主要聚焦于低频检测,其较窄的频响特性限制了其应用场景,其他文献报导的传感器最低检测频率通常为 100 Hz。相比之下,本文提出的传感器利用 PDMS 材料固有的低杨氏模量和低声阻抗特性,实现了 20 Hz~12 kHz 宽频带声波的有效检测,在显著拓宽频率响应范围的同时,亦具备优异的低频响应能力。此外,在 PDMS 膜片上附着银膜,弥补了 PDMS 材料本身透射率较高所带来的干涉性能不足,确保 F-P 干涉腔的性能。

**表 1　不同类型光纤声波传感器的比较**

| 结构 | 测量范围 | 灵敏度/(mV/Pa) | *SNR*/dB | *MDP* | 文献 |
|---|---|---|---|---|---|
| SMF-$Si_3N_4$ | 1~20 kHz | 60.175 | 69.15 | 2.57 μPa/$\sqrt{Hz}$ @16.5kHz | [14] |
| SMF-HCF-PDMS | 10~50 Hz | 0.427 | 80 | — | [24] |
| SMF-metal diaphragm | 1~20 kHz | 2.57 | 60.82 | 3.9 mPa/$\sqrt{Hz}$ @12kHz | [25] |
| SMF-PDMS Packaged | 100~10 kHz | 0.92 | 29.92 | 5.42 mPa/$\sqrt{Hz}$ @1kHz | [31] |
| SMF-Polymer cavity | 200~10 kHz | 23.58 | 25 | 1.38 mPa/$\sqrt{Hz}$ @4kHz | [32] |
| SMF-Ag/PDMS | 20~12 kHz | 53.66 | 52.26 | 6.6 μPa/$\sqrt{Hz}$ @2kHz | 本文 |

## 4 结论

本文针对不同领域对于宽频带以及低频声波的检测需要，提出并制备了一种基于银膜/PDMS复合振膜的光纤F-P宽频带声波传感器，实现20 Hz～12 kHz宽频带响应，并在低频段表现出较高灵敏度与高信噪比。传感核心采用PDMS薄膜作为振膜，表面附着纳米级银膜与SMF端面构成F-P腔的两个反射面，反射光谱消光比为34.36 dB。实验结果表明，当声波信号频率在厚度为85 μm、半径为2 mm的PDMS膜片的固有频率时，声压灵敏度为53.66 mV/Pa@2kHz，*MDP*为6.6 μPa/Hz$^{1/2}$@2kHz。在20 Hz～12 kHz范围内，声波信号平均灵敏度为42.83 mV/Pa，能应用于检测低频以及声压较小的领域。该传感器具有结构简单、成本低、宽频带响应和灵敏度高等的特点，在多种应用场景中展现出良好的应用前景。

**参考文献：**


[1] Bao X, Tatel G. Micro-structured and telecom fibers for acoustic and ultrasound sensing and imaging[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(4): 1581-1594.

[2] Lanzara G, Chinnam K C, Magnafico E, et al. Moving towards materials with humanoid functionality: sensing their speech with piezoelectric nanowebs[J]. Materials Today, 2025, 83: 198-212.

[3] de Fatima Domingues M, Rosa V, Nepomuceno A C, et al. Wearable devices for remote physical rehabilitation using a Fabry-Perot optical fiber sensor: ankle joint kinematic[J]. IEEE Access, 2020, 8: 109866-109875.

[4] Fang Z, Gao F, Jin H, et al. A review of emerging electromagnetic-acoustic sensing techniques for healthcare monitoring[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2022, 16(6): 1075-1094.

[5] 王巧云，严重越，朱子恒，等. 基于π型悬臂梁的光纤F-P声波传感器及其在光声光谱中的应用[J]. 光学学报，2025，45(3)：59-68.
Wang Qiaoyun, Yan Chongyue, Zhu Ziheng, et al. π-shaped cantilever based fiber-optic Fabry-Perot acoustic wave sensor and its application in photoacoustic spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(3): 59-68.

[6] Zhao N, Zhao D, Ma L, et al. Study on a photoacoustic spectroscopy trichloromethane gas detection method based on an arched photoacoustic cavity[J]. Analytical Methods, 2022, 14(15): 1507-1514.

[7] Cai Y, Xiong J, Chen H, et al. A review of *in situ* monitoring and process control system in metal-based laser additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 70: 309-326.

[8] Chen W, Qiao S, Zhao Z, et al. Sensitive carbon monoxide detection based on laser absorption spectroscopy with hollow-core antiresonant fiber[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2024, 66: e33780.

[9] Wang B, Gupta R. Analyzing bond-deterioration during freeze-thaw exposure in cement-based repairs using non-destructive methods[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 115: 103830.

[10] Wu Z, Guo Y, Zhou J, et al. Optical sensing technology for acoustic detection of partial discharges: a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(2): 591-606.

[11] Chen Z, Dong B, Lin P, et al. High-sensitivity and wideband all-polymer microcavity fiber acoustic sensor and its applications in partial discharge detection[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2025, 7(2): 706-713.

[12] Song Y, Tian H, Jia Z, et al. Distributed partial discharge acoustic signal detection and localization technology for GIL with built-in fiber optics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(14): 5068-5076.

[13] Zhang G, Xiong Z, Guo M, et al. Low-frequency optical fiber Fabry-Perot acoustic sensor based on all-phase cross-correlation demodulation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(22): 7431-7438.

[14] 丁武成，魏鹤鸣，韦　妍，等. 基于氮化硅膜片的光纤法布里-珀罗声波传感器[J]. 光学学报，2025，45(2)：0206008.
Ding Wucheng, Wei Heming, Wei Yan, et al. Silicon nitride membrane-based fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(2): 0206008.

[15] 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.

[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] 胡　晓，田　晶，田佳俊，等. 一种基于光纤内马赫-曾德尔干涉仪的低频声传感方案[J]. 物理学报，2025，74(9)：103-109.
Hu Xiao, Tian Jing, Tian Jiajun, et al. A low-frequency acoustic sensor scheme based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Physica Sinica, 2025, 74(9): 103-109.

[18] Jia J, Fan X, Jiang Y. A Mach-Zehnder interferometric acoustic sensor using incomplete symmetry 3 × 3 coupler-based phase shifting demodulator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 378: 115808.

[19] Fan P, Yan W, Lu P, et al. High sensitivity fiber-optic Michelson interferometric low-frequency acoustic sensor based on a gold diaphragm[J]. Optics Express, 2020, 28(17):

25238-25249.

[20] Zhang L, Jia K, Lai X, et al. A frequency-flat Sagnac optical fiber microphone based on a composite sensing unit[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(23): 39059-39069.

[21] Li C, Peng X, Zhang H, et al. A sensitivity-enhanced flexible acoustic sensor using side-polished fiber Bragg grating [J]. Measurement, 2018, 117: 252-257.

[22] Liang G, Jiang J, Liu K, et al. Phase demodulation method based on a dual-identical-chirped-pulse and weak fiber Bragg gratings for quasi-distributed acoustic sensing[J]. Photonics Research, 2020, 8(7): 1093.

[23] Huang Q, Deng S, Li M, et al. Fabry - Perot acoustic sensor based on a thin gold diaphragm [J]. Optical Engineering, 2020, 59(6): 064105.

[24] Zhao Y, Chen M Q, Xia F, et al. Small in-fiber Fabry-Perot low-frequency acoustic pressure sensor with PDMS diaphragm embedded in hollow-core fiber[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 270: 162-169.

[25] 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.

[26] Dass S, Kachhap S, Jha R. Hearing the sounds of aquatic life using optical fiber microtip-based hydrophone [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(7): 4015-4020.

[27] Wei Y, Sun K, Wei H, et al. A corrugated diaphragm-based Fabry-Perot ultrasonic sensor by two-photon 3D printing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(20): 1078-1081.

[28] Kuusela T, Kauppinen J. Photoacoustic gas analysis using interferometric cantilever microphone[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2007, 42(5): 443-474.

[29] Yoon M A, Kim C, Kim J H, et al. Surface properties of CVD-grown graphene transferred by wet and dry transfer processes[J]. Sensors, 2022, 22(10): 3944.

[30] 张雄星, 孙　哲, 赵学庆, 等. 端面薄膜法布里-珀罗腔光纤动态压力传感器仿真与实验研究[J]. 光学学报, 2024, 44(7): 0728003.
Zhang Xiongxing, Sun Zhe, Zhao Xueqing, et al. Simulation and experimental research on fiber-optic dynamic pressure sensor based on a fiber-tip film-type Fabry-Perot cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(7): 0728003.

[31] Zhao R, Cui J, Yu Y, et al. Research on acoustic sensing device based on microfiber knot resonator[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2022, 32(8): 085003.

[32] Wang Y, Rong J, Xing E, et al. A lever-type PDMS flexible cavity for acoustic vector sensor with high sensitivity [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(6): 5637-5642.

**作者简介：**

**顾骏华**(2001—)，男，硕士研究生，主要从事光纤声波传感器技术的研究；

**常建华**(1976—)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事光电传感器、超快激光器、光电混合集成等方面的研究。