



## 基于硅基微电子机械系统仿生振膜的光纤麦克风

刘欣 蔡宸 董志飞 邓欣 胡昕宇 祁志美

## Fiber-optic microphone based on bionic silicon micro-electro-mechanical system diaphragm

Liu Xin Cai Chen Dong Zhi-Fei Deng Xin Hu Xin-Yu Qi Zhi-Mei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 094301 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212229

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212229>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于麦克风的气体超声分子束飞行速度的实验研究

Experimental study on velocity of supersonic molecular beam based on microphone

物理学报. 2019, 68(16): 164702 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190436>

#### 双光腔光机械系统的动力学相变和选择性能量交换

Dynamical phase transition and selective energy exchange in dual-cavity optomechanical systems

物理学报. 2021, 70(14): 140301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210178>

#### 有限温度下腔光机械系统中 $N$ 个二能级原子的相变和热力学性质

Phase transition and thermodynamic properties of  $N$  two-level atoms in an optomechanical cavity at finite temperature

物理学报. 2019, 68(19): 193701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190347>

#### 硅基光波导开关技术综述

Reivew of silicon photonic switches

物理学报. 2019, 68(10): 104210 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190011>

#### 基于超强耦合量子点-纳米机械振子系统的全光学质量传感

All-optical mass sensing based on ultra-strong coupling quantum dot-nanomechanical resonator system

物理学报. 2019, 68(24): 246302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190607>

#### 金刚石氮空位色心耦合机械振子和腔场系统中方差压缩研究

Quadrature squeezing of the system consisting of nitrogen-vacancy centers in diamond coupled to cavity field and mechanical resonator

物理学报. 2018, 67(4): 040302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172170>

## 基于硅基微电子机械系统仿生振膜的光纤麦克风\*

刘欣<sup>1)2)</sup> 蔡宸<sup>1)2)</sup> 董志飞<sup>1)2)</sup> 邓欣<sup>1)2)</sup> 胡昕宇<sup>1)2)</sup> 祁志美<sup>1)2)3)†</sup>

1) (中国科学院空天信息创新研究院, 传感技术国家重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

3) (中国科学院大学光电学院, 北京 100049)

(2021 年 12 月 2 日收到; 2022 年 1 月 14 日收到修改稿)

仿蝇耳声传感器是一种对声压梯度敏感的指向性微型麦克风. 本文设计制备了桥连耦合双翼形硅基微电子机械系统仿蝇耳振膜, 利用该振膜制作了光纤 Fabry-Pérot 干涉式麦克风, 并对这种麦克风的特性进行了理论与实验研究. 仿真结果指出: 这种仿生振膜具有摇摆和弯曲两种振动模式, 单位声压下摇摆模式的振幅依赖于入射声波的频率与传播方向, 频率越接近摇摆模式本征值, 振幅越大; 摇摆模式振幅随传播方向在三维空间的变化呈纺锤形分布, 纺锤的长轴平行于振膜的长轴, 意味着传播方向平行于振膜长轴时麦克风灵敏度最高. 实验测得的光纤仿生麦克风的摇摆模式本征频率略小于仿真值, 其输出信号振幅随声源水平方位角的变化呈“8”字形分布, 在  $0^\circ - \pm 60^\circ$  方位角范围二者呈线性关系, 由此得出麦克风的方向灵敏度为  $39.98 \text{ mV}/(^{\circ})$ .

**关键词:** 硅基微电子机械系统仿生振膜, 光纤麦克风, 摇摆模式, 声源定位**PACS:** 43.38.Zp, 07.07.Df, 43.60.Vx, 42.81.-i**DOI:** 10.7498/aps.71.20212229

## 1 引言

声探测与声定位技术广泛应用于低慢小飞行器的探测与追踪、交通噪声监测、油气管道泄漏检测、智能机器人听觉<sup>[1-4]</sup>等领域, 在工业、交通、军事等领域发挥着重要作用. 现有声定位设备通常基于多个性能高度一致的全向麦克风组成的麦克风阵列, 利用声信号到达各麦克风的时延差和幅值差与各麦克风之间的几何关系求解声源位置. 由于目标声源波长限制, 麦克风阵列中相邻阵元需保持较大间距, 才能产生可探测的时延差或幅值差, 从而导致常规麦克风阵列的整体尺寸较大, 不利于携带和布设、隐蔽性差, 应用范围受限. 此外, 这种尺寸制约也使得麦克风阵列的微型化非常困难. 为了满

足室内机器人听觉导航、可穿戴声定位传感器、迷你飞行器探测等新型应用场景对小型化便携式声定位设备的需求, 开展微型化声定位技术与器件的研究具有重要应用价值<sup>[5,6]</sup>.

科学家发现自然界有一种名为奥米亚棕蝇的寄生蝇, 其双耳间距仅  $450 - 520 \mu\text{m}$ , 却能对宿主发出的波长约  $7 \text{ cm}$  的声信号进行精准定位. Miles 等<sup>[7]</sup>研究发现, 奥米亚棕蝇的双耳鼓膜通过角质层连接形成一种耦合结构, 这种机械耦合结构可以放大声源到达两耳的时延差和幅值差, 从而使其获得卓越的定位能力. 这种耦合机制为微型化定位麦克风和定位麦克风阵列提供了新思路. 通过仿制蝇耳结构的微型定位麦克风已得到广泛研究. 目前已报道的基于梳齿电容式<sup>[8-11]</sup>、压电式<sup>[12-16]</sup>、衍射光栅式<sup>[17-19]</sup>以及光纤式<sup>[20]</sup>的仿生定位麦克风具有体

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61801456) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhimei-qi@mail.ie.ac.cn

积小、集成度高、成本低廉的优势. 基于电学传感的仿生定位麦克风抗电磁干扰能力弱, 难以应用于复杂的环境中, 而基于光学传感的仿生定位麦克风则能够突破这种限制. 但是无论是基于电学传感或是光学传感的仿生定位麦克风, 其摇摆模态本征频率均在 2 kHz 以上, 无法完成对低频声源的探测, 例如 Touse 等<sup>[10]</sup>研制的梳齿电容式、Bauer 等<sup>[14]</sup>研制的压电式和 Liu 等<sup>[20]</sup>研制的光纤式仿生麦克风. 因此, 工作频率低于 2 kHz 以下的光学传感微型仿生麦克风在低频声源探测定位应用中具有重要意义.

本文基于奥米亚棕蝇听觉系统的机械耦合结构与机理, 开展了硅基微电子机械系统 (micro electro mechanical system, MEMS) 仿生振膜的设计与仿真分析, 结合光纤 Fabry-Pérot 干涉 (FPI) 传感技术, 制备了声光换能硅基 MEMS 仿生麦克风. 这种麦克风具有较高的灵敏度、强的抗电磁干扰能力, 同时工作频率较低, 从而更适合恶劣电磁环境中的低频声定位应用.

## 2 基于硅基 MEMS 仿生振膜光纤麦克风的设计与制备

### 2.1 仿生原理

如图 1(a) 所示, 奥米亚棕蝇听觉器官的解剖结构表明, 其两耳鼓膜并非彼此独立, 而由带状的角质层相互连接, 该带状角质层中间有个支点 (图中③), 两端与左右鼓膜相连 (图中①和②), 起到机械耦合作用<sup>[7]</sup>. Miles 等<sup>[7]</sup>基于奥米亚棕蝇双耳解

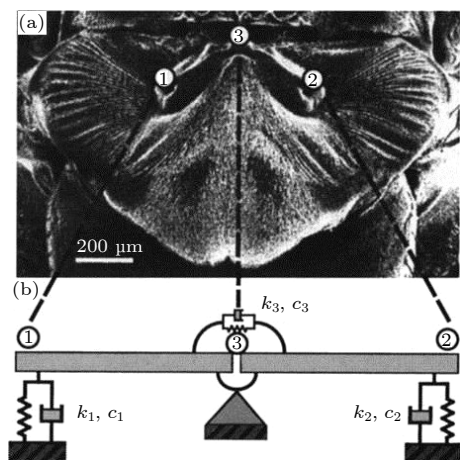


图 1 奥米亚棕蝇听觉系统的 (a) 解剖图和 (b) 力学模型<sup>[7]</sup>

Fig. 1. (a) Anatomy and (b) mechanical model of the ear of the *Ormia ochracea*<sup>[7]</sup>.

剖结构建立了如图 1(b) 所示的力学模型, 其中  $k_1$ ,  $k_2$  为两鼓膜的等效刚度,  $c_1$ ,  $c_2$  为两鼓膜的等效阻尼,  $k_3$ ,  $c_3$  为膜间桥的等效刚度和等效阻尼. 由于膜间桥的机械耦合作用, 整个振动系统具有两个振动模态: 一个是本征频率较低的摇摆模态; 另一个是本征频率较高的弯曲模态. 摇摆模态下两鼓膜反相运动, 弯曲模态下两鼓膜同相运动. 明显地, 当系统处于摇摆模态时, 两耳之间的相位差得到了放大. 如果两鼓膜彼此独立工作, 由于相距 500  $\mu\text{m}$ , 它们之间的相位差将小到可以忽略, 不可能产生反相的结果.

### 2.2 硅基 MEMS 仿生振膜的设计

基于奥米亚棕蝇听觉器官的等效力学模型, 为了兼顾 MEMS 制备工艺, 本文设计了共面型桥连耦合双振膜的硅基仿生拾音结构, 两振膜为尺寸相同的正方形, 面积为单振膜一半的方形膜片作为耦合桥将两振膜共面连接. 耦合桥的两侧中间各有一个尺寸相同的扭转梁, 将整个仿生拾音结构共面固定在硅基座上. 除了用于支撑仿生拾音结构, 扭转梁还提供振动过程中的回复扭转力矩.

当仿生振膜受外界声源激励时, 外界声源频率接近仿生振膜摇摆模态本征频率时, 仿生振膜双翼将异相振动, 其双翼间的幅值差较大, 定向线索之一的幅度差很容易被检测. 所以确定仿生振膜的工作频率为摇摆模态本征频率. 无人机的发声频率通常在 170—1000 Hz<sup>[5,6]</sup>; 直升机发声的中心频率为 500 Hz<sup>[21]</sup>. 为了使得仿生振膜能够探测定位无人机和直升机等飞行目标, 仿生振膜的摇摆模态的本征频率被设定为小于 1000 Hz.

### 2.3 硅基 MEMS 仿生振膜的仿真

仿生振膜的谐振频率由各结构的尺寸决定. 为了确定仿生振膜各结构的参数, 本文利用有限元仿真计算了不同尺寸的仿生振膜的本征频率. 当仿生振膜 (见图 2(a)) 翼片尺寸为 2 mm  $\times$  2 mm, 耦合桥尺寸为 1 mm  $\times$  1 mm, 扭转梁尺寸为 0.1 mm  $\times$  0.2 mm, 振膜厚度为 10  $\mu\text{m}$ , 振膜与 SOI 支架之间的空气间隙为 100  $\mu\text{m}$  时, 仿生振膜摇摆模态本征频率为 843 Hz; 弯曲模态本征频率为 1648 Hz, 仿真得到的振膜摇摆模态和弯曲模态如图 2(b) 所示.

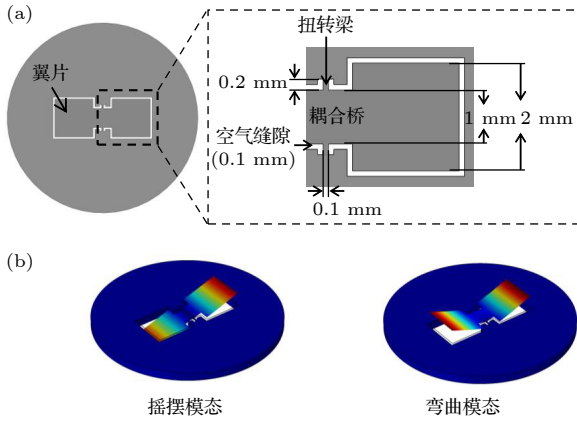


图 2 (a) 硅基 MEMS 仿生振膜结构示意图; (b) 摇摆模式和弯曲模式仿真结果

Fig. 2. Silicon MEMS bionic diaphragm: (a) Schematic diagram; (b) simulation results of the rocking and bending modes.

利用上述仿生振膜的设计参数构建了如图 3(a) 所示的仿真模型, 仿生振膜的中心点为  $x, y, z$  坐标轴的原点,  $z$  轴为振膜法线,  $x$  轴为振膜长轴,  $y$  轴为振膜短轴. 仿生振膜背腔密闭, 以模拟仿生光纤 FPI 麦克风的实际情况, 模型中仿生振膜双翼远端边缘与  $x$  轴的两交点作为振动监测点.

将模型置于有阻尼的空气球壳内, 再在阻尼球壳外设置一个球形壳用于设置入射声源. 由于仿生振膜的尺度远远小于实际测试中声源与振膜的距离, 满足远场条件. 在远场条件下声波可以近似为平面波, 于是仿真模型中的声场等效于远距离声场, 将声源类型设置为平面波 [22]. 声压大小设置为 1 Pa, 使声波沿  $y$  轴负方向入射, 计算模型上两监测点在 0.2—2 kHz 频率范围内 (步长 20 Hz) 的振幅. 仿真结果指出两监测点的振幅变化基本一致,

图 3(b) 给出了其中 1 个监测点的结果. 可以看出, 当声源频率为 820 Hz 和 1590 Hz 时, 监测点的振幅达到两个峰值, 这两个频率分别对应仿生光纤 FPI 麦克风上 MEMS 仿生振膜的摇摆模式和弯曲模式的本征频率. 由于频率响应仿真考虑了空气阻尼, 仿生光纤 FPI 麦克风频率响应数值上与 MEMS 仿生振膜本征频率仿真数值存在一定差异.

根据仿真得到的仿生光纤 FPI 麦克风的摇摆模式本征频率, 模拟该频率下仿生光纤 FPI 麦克风的响应随声源入射角的变化规律. 如图 3(a) 所示, 平面声波以方位角  $\theta$ 、俯仰角  $\varphi$  入射到 MEMS 仿生振膜上. 入射声波可以表示为 [23]

$$p(t, x, y, z) = p_a e^{j(\omega t - \frac{\omega}{c} x \sin \theta \sin \varphi - \frac{\omega}{c} y \cos \theta \sin \varphi - \frac{\omega}{c} z \cos \varphi)}, \quad (1)$$

其中  $p_a$  为声压的幅值,  $j$  为虚数单位,  $\omega$  为声音的角频率,  $t$  为时间,  $c$  为空气中的声速,  $(x, y, z)$  为模型上任意一点的坐标.  $\varphi = 90^\circ$  时改变方位角  $\theta$ , MEMS 仿生振膜上两监测点的振幅值均为

$$A_{x-y} \propto \left| \frac{\partial p(t, x, y, z)}{\partial x} \right|_{z=0} = \left| -j p_a \frac{\omega}{c} \sin \theta e^{j(\omega t - \frac{\omega}{c} x \sin \theta - \frac{\omega}{c} y \cos \theta)} \right| \propto |\sin \theta|, \quad (2)$$

其中,  $\omega = 2\pi c / \lambda$ ,  $\lambda$  为声波的波长.  $\theta = 90^\circ$  时改变俯仰角  $\varphi$ , 此时, MEMS 仿生振膜上两监测点的振幅值均为

$$A_{x-z} \propto \left| \frac{\partial p(t, x, y, z)}{\partial x} \right|_{y=0} = \left| -j p_a \frac{\omega}{c} \sin \varphi e^{j(\omega t - \frac{\omega}{c} x \sin \varphi - \frac{\omega}{c} z \cos \varphi)} \right| \propto |\sin \varphi|. \quad (3)$$

可以看出, 摇摆模式本征频率下, 振幅值与角度的

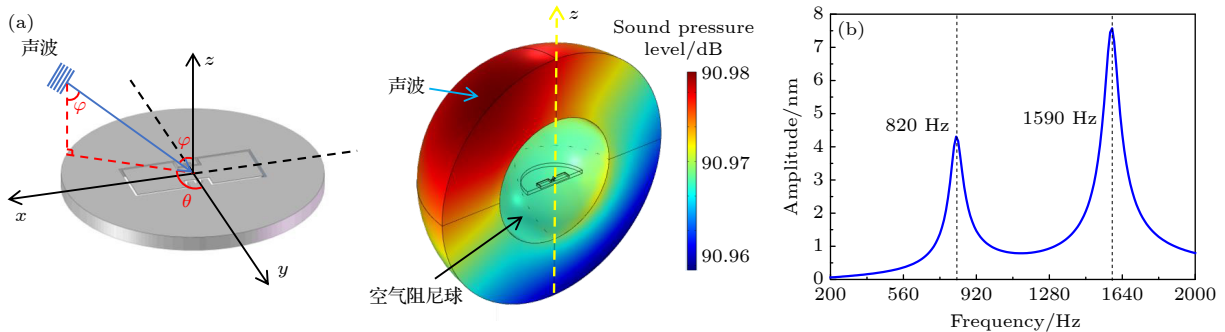


图 3 (a) 密闭背腔室硅基 MEMS 仿生振膜光纤麦克风的仿真模型; (b) 仿生光纤麦克风频率响应曲线 (振幅是指图 (a) 所示振膜最远端的位移振幅)

Fig. 3. (a) Simulation model of the silicon MEMS bionic diaphragm based fiber-optic microphone with a closed back cavity; (b) simulation results of frequency response of the bionic fiber-optic microphone. Amplitude refers to the displacement amplitude at the farthest end of the diaphragm as shown in panel (a).



正弦的绝对值成正比, 不同角度下的振幅值在极坐标中应呈现“8”字形。

在二维平面方向响应仿真中, 设定声源类型为平面波, 声压幅值设为 1 Pa, 声源频率设为 820 Hz. 设置声源为  $\varphi = 90^\circ$  或  $\theta = 90^\circ$ , 令声源分别在  $x-y$  平面或  $x-z$  平面内旋转, 计算当声源旋转时振膜上两监测点的振幅值, 并将振幅值在极坐标中表示. 如图 4(a) 所示, MEMS 仿生振膜上两监测点的振幅随声源在  $x-y$  平面内的方位角  $\theta$  的变化而变化, 该振幅变化在极坐标系中呈“8”字形, 即振幅在  $\theta = 90^\circ$  和  $270^\circ$  时达到最大, 在  $\theta = 0^\circ$  和  $180^\circ$  时变为最小. 图 4(b) 为 MEMS 仿生振膜上两监测点的振幅随声源在  $x-z$  平面内的入射角  $\varphi$  的极坐标响应曲线, 该响应曲线也呈“8”字形, 在  $\varphi = 0^\circ$  和  $180^\circ$  时振幅为最小值, 最大振幅出现在了  $\varphi = 90^\circ$  和  $270^\circ$ .

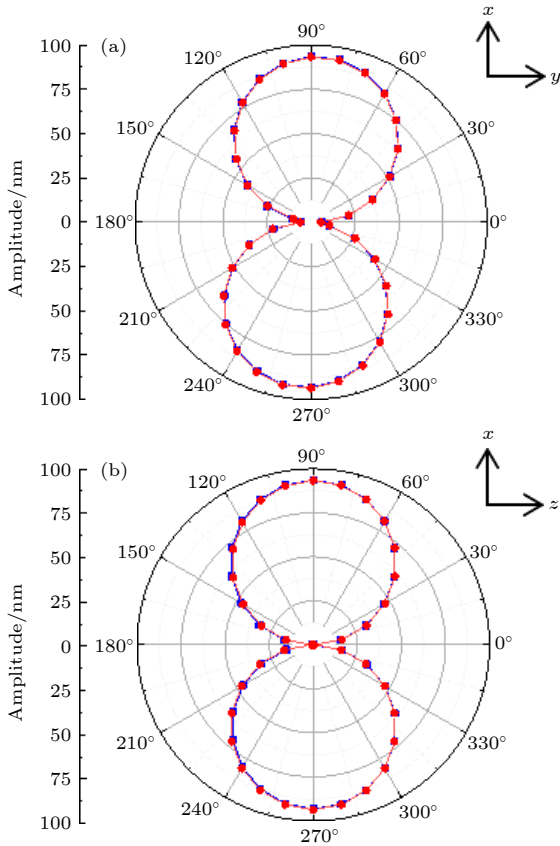


图 4 在摇摆模式谐振频率下, 仿生光纤麦克风的两监测点在二维空间的“8”字形方向响应仿真结果 (a) 声源方位角在  $x-y$  平面内; (b) 声源入射角在  $x-z$  平面内

Fig. 4. Simulation results of the “8” shaped directional response in two-dimensional space for the monitoring points of bionic fiber-optic microphone at rocking-mode resonant frequency: (a) The sound source azimuth angle in the  $x-y$  plane; (b) the sound source incidence angle in the  $x-z$  planes.

由于振膜上两监测点距离声源距离的差异微小, 两监测点的振幅值不完全重合. 上述仿真结果表明本文设计的仿生振膜结构对声源方向变化具有明显响应.

受到仿生光纤 FPI 麦克风二维方向响应的仿真结果启发, 我们认为仿生光纤 FPI 麦克风在三维空间中对声源方向的变化也应有明显响应. 通过改变入射角度  $\theta$  和  $\varphi$  的范围, 令声源围绕 MEMS 仿生振膜全空间旋转, 计算声源入射角改变时 MEMS 仿生振膜的振幅值. 计算得到振幅值随入射角度  $\theta$  和  $\varphi$  的变化. 为了能够做出仿生光纤 FPI 麦克风三维方向响应图, 首先将声源入射角表示在直角坐标中

$$x = \sin \theta \sin \varphi, \quad y = \cos \theta \sin \varphi, \quad z = \cos \varphi. \quad (4)$$

设响应振幅为  $A$ , 将振幅  $A$  代入 (4) 式中得到

$$\begin{cases} X = A \sin \theta \sin \varphi, \\ Y = A \cos \theta \sin \varphi, \\ Z = A \cos \varphi. \end{cases} \quad (5)$$

对  $X, Y, Z$  作图, 即可得到仿生光纤 FPI 麦克风三维方向响应图. 如图 5 所示, 在三维空间中 MEMS 仿生振膜上两监测点之一的振幅随声源入射角的变化呈现纺锤形的变化. 只要声源不平行于  $y-z$  平面旋转, 振膜即可对声源做出与角度相关的“8”字响应.

进一步仿真了  $x-y$  平面仿生光纤 FPI 麦克风在其他频率下的方向响应. 如图 6(a) 所示, MEMS 仿生振膜在接近摇摆模式本征频率附近同样产生“8”字形响应. 定义某一频率的方向灵敏度为: 该频率下振幅值的变化与声源入射角变化之比的绝对值, 方向灵敏度可以代表仿生光纤 FPI 麦克风在该频率的定位能力. 从图 6(a) 可看出, 在  $0^\circ-60^\circ$  内振幅随方位角线性变化, 其斜率代表麦克风的方向灵敏度, 具体结果如图 6(b) 所示. 当声源方位角  $\theta = 0^\circ-60^\circ$  时, MEMS 仿生振膜上监测点的方向灵敏度在声源频率为摇摆模式本征频率时达到最大, 在摇摆模式本征频率附近约  $\pm 120$  Hz 也具有较高的方向灵敏度. 当声源频率接近摇摆模式本征频率时, 仿生光纤 FPI 麦克风的定位性能最佳, 同时仿生光纤 FPI 麦克风也具有较宽频带的声源定位潜能.

通过以上对 MEMS 仿生振膜的仿真分析, 可

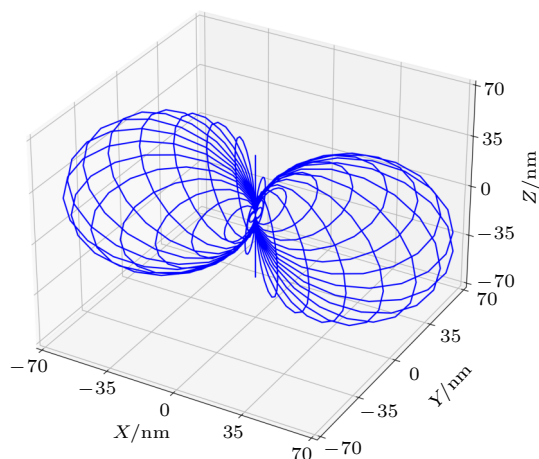


图5 在摇摆模式谐振频率下,仿生光纤麦克风在三维空间纺锤形方向响应的仿真结果

Fig. 5. Simulation results of the spindle-shaped directional response in 3-dimensional space for the bionic fiber-optic microphone at rocking-mode resonance frequency.

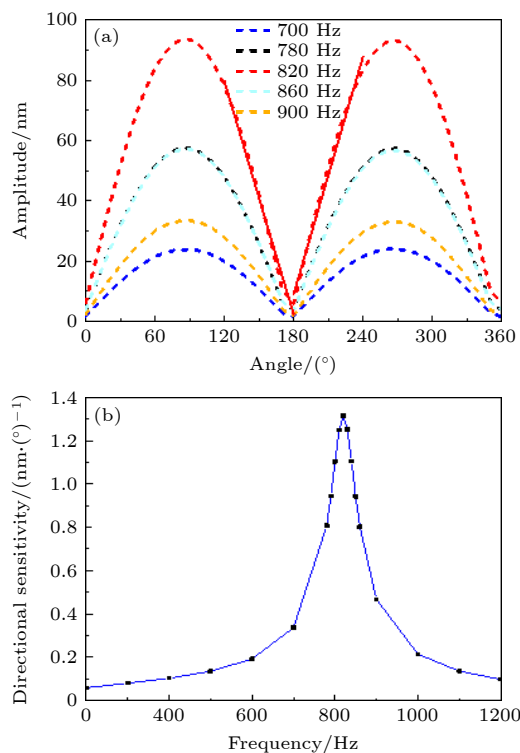


图6 (a) 仿生光纤麦克风对不同频率平面声波的响应振幅随声源方位角的变化曲线; (b) 仿生光纤麦克风方向灵敏度随声波频率的变化曲线

Fig. 6. (a) Simulation results of angular dependence of the response amplitude of the bionic fiber-optic microphone to acoustic plane waves of different frequencies; (b) frequency dependence of the directional sensitivity of the bionic fiber-optic microphone.

以确定本文设计的仿生光纤 FPI 麦克风的摇摆模式本征频率在 2 kHz 以下; 在摇摆模式本征频率

下, 仿生光纤 FPI 麦克风的响应在全空间下随声源入射角呈现纺锤形分布, 且 MEMS 仿生振膜的方向灵敏度极高. 仿生光纤 FPI 麦克风适用于检测低频声源, 在摇摆模式具有的全空间的声源定位能力, 同时具有宽频工作的潜能.

## 2.4 硅基 MEMS 仿生振膜的制备

本文通过 MEMS 工艺, 在 SOI 晶圆上制备了硅基 MEMS 仿生振膜. MEMS 工艺流程如图 7 所示. SOI 晶圆的器件层的厚度为 10  $\mu\text{m}$ 、埋氧层的厚度为 1  $\mu\text{m}$ 、基底层厚度为 360  $\mu\text{m}$ (图 7(a)). 首先对 SOI 晶圆的器件层进行光刻得到含有双翼图形结构的光刻胶掩膜, 再采用深反应离子刻蚀技术对器件层进行刻蚀, 在器件层上形成双翼图形结构(图 7(b)). 然后对基底层进行光刻得到背面深腔的光刻胶掩膜(图 7(c)). 由于 MEMS 仿生振膜具有大面积的镂空结构, 如果直接进行背面深腔刻蚀, SOI 晶圆将大幅碎裂. 本文在进行背面深刻蚀前, 在器件层的表面涂覆一层较为黏稠的光刻胶作为保护层(图 7(d)), 再利用深反应离子刻蚀技术对基底层进行刻蚀, 形成 MEMS 仿生振膜的背面深腔. 然后使用高密度等离子刻蚀系统, 将埋氧层完全去除(图 7(e)). 最后在圆片背面溅射 20 nm 的金属铬提高反射率, 从而提升麦克风的性能(图 7(f)). 制得的硅基 MEMS 仿生振膜如图 7(g)所示.

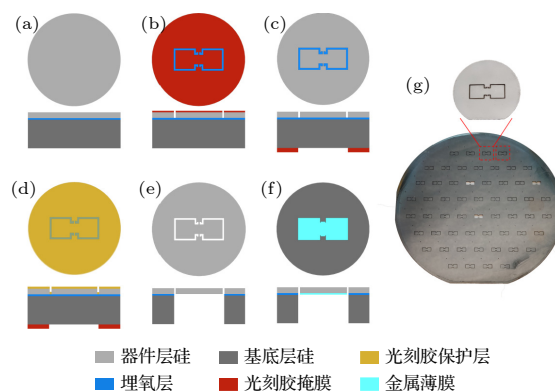


图7 硅基 MEMS 仿生振膜的制备工艺流程

Fig. 7. Fabrication process of silicon MEMS bionic diaphragm.

## 2.5 FPI 光纤麦克风的制备

在完成硅基 MEMS 仿生振膜制备后, 通过精

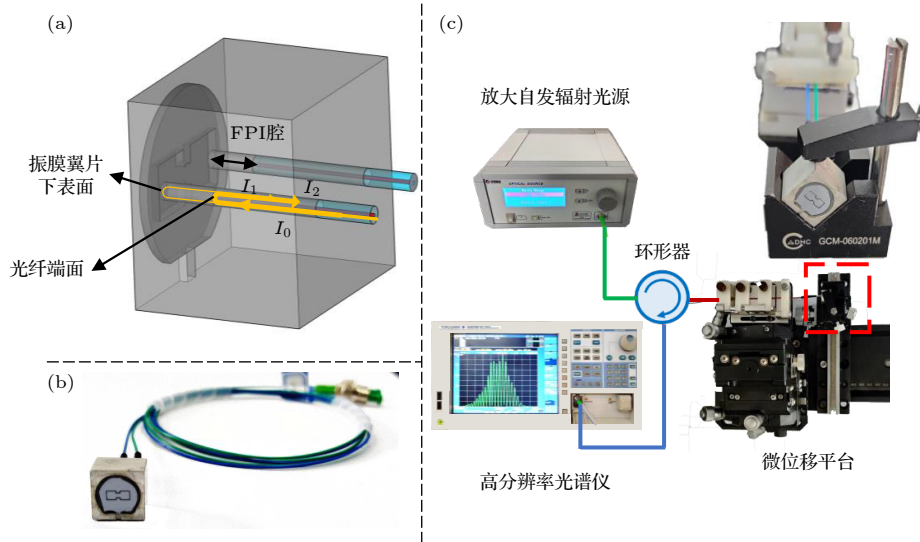


图 8 (a) 仿生光纤麦克风结构示意图 ( $I$ , 光束的光强); (b) 仿生光纤麦克风实物照片; (c) 用于在麦克风组装过程中精确调控光纤 FPI 腔长的平台

Fig. 8. (a) Schematic diagram of the structure of bionic fiber-optic microphone ( $I$ , intensity of the beam); (b) photograph of the bionic fiber-optic microphone; (c) experimental setup used for precisely adjusting the FPI cavity length in the process of assembling the bionic fiber-optic microphone.

密机加工制作了金属支座以集成 MEMS 仿生振膜与单模光纤. 该支座包含一个凹槽和两个通孔, 分别对 MEMS 仿生振膜和含有单模光纤的毛细玻璃管进行固定与限位. 将 MEMS 仿生振膜固定到金属支座的凹槽中, 振膜与凹槽之间形成空气腔室. 再将两根含有单模光纤的毛细玻璃管分别穿入金属支座的两个通孔, 移动单模光纤接近 MEMS 仿生振膜下表面使得两者形成 FPI 腔, 如图 8(a) 所示. 在移动单模光纤时, 通过图 8(c) 所示的 FPI 光谱图测量系统监测 FPI 腔长变化. FPI 光谱图测量系统由放大自发辐射光源 (纤联科技-SLED-OS8145)、高分辨率光谱仪 (Yokogawa-AQ6370B) 以及精密微位移平台组成. 将单模光纤置于精密微位移平台上, 使用环形器依次连接光源、单模光纤和高分辨率光谱仪, 控制精密微位移平台移动单模光纤, 使单模光纤端面与振膜下表面的相对位置发生变化, 通过高分辨率光谱仪显示的 FPI 干涉光谱计算 FPI 腔的稳态腔长. MEMS 仿生振膜双翼与两根单模光纤分别对应 FPI 双通道, 当双通道稳态腔长一致时, 使用 UV 胶固定毛细玻璃管与金属支座, 制成的仿生光纤 FPI 麦克风实物如图 8(b) 所示. 仿生光纤 FPI 麦克风双通道的稳态腔长一致时, 只需匹配合适波长的光源即可使得麦克风工作在正交工作点, 达到麦克风的最佳性能.

### 3 实验系统及测量结果

#### 3.1 FPI 光纤麦克风双通道干涉光谱的测量

MEMS 仿生振膜的双翼结构使得单个麦克风探头具有两个光纤 FPI 检测通道. 使用图 8(c) 所示的实验装置测量了麦克风探头两个通道的 FPI 光谱干涉条纹, 结果如图 9 所示. 根据干涉光谱图计算得到两个通道的稳态腔长  $L$  分别为  $180.202 \mu\text{m}$  和  $174.971 \mu\text{m}$ . 两通道的稳态腔长不相等, 意味着它们的正交工作点对应的波长不同. 当选择  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  的激光器作为麦克风光源时, 双通道 FPI 的工作点都会偏离正交工作点.

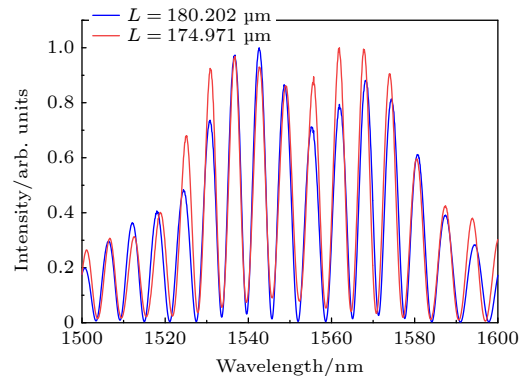


图 9 实验测得仿生光纤麦克风双通道干涉光谱图  
Fig. 9. Spectral interference patterns measured from the two fiber-optic FPI channels of the bionic microphone.



### 3.2 FPI 光纤麦克风的频率响应

为了测试仿生光纤 FPI 麦克风的频率响应, 本文建立了如图 10 所示的近场声学测试系统. 该系统包括兼具测试信号输出与麦克风信号采集功能的多通道采集分析仪 (B&K, 3160-A-042), 内置扬声器的声强校准耦合腔 (Gras, 51AB), 标准压力场麦克风 (B&K, 4193) 和声强校准软件 (B&K Pulse Labshop). 选择固定波长  $\lambda = 1550$  nm 的分布式反馈激光器作为麦克风的工作光源, 该波长在单模光纤中拥有较低的传输损耗. 在麦克风工作前, 用光纤分光器将光源分为两束, 再使两束光分

别耦合进入两个环形器中, 然后依次连接麦克风双通道和两个光电探测器, 形成 FPI 检测回路. 接着将仿生光纤 FPI 麦克风与标准压力场麦克风置于声强校准耦合腔室中 (声源恰为垂直 MEMS 仿生振膜平面入射), 标准压力场麦克风与仿生光纤 FPI 麦克风处于同一声场. 测试时, 利用声强校准软件设定声源频率扫描范围为 100—3000 Hz, 扫描频率的分辨率  $\Delta f = 1$  Hz, 驱动扬声器从低频到高频扫描发声. 使用声学分析模块采集标准压力场麦克风与仿生光纤 FPI 麦克风产生的信号, 利用声强校准软件进行分析.

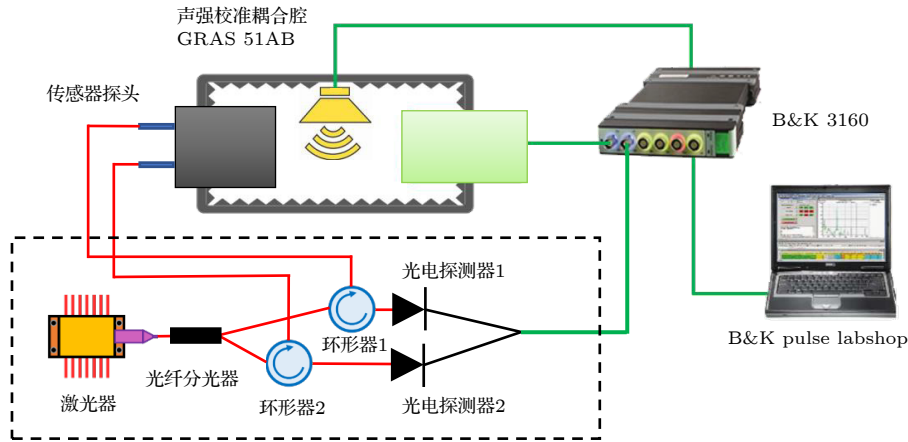


图 10 用于表征仿生光纤麦克风的声学测试系统示意图

Fig. 10. Schematic of the acoustic test system for characterizing bionic fiber-optic microphones.

测试结果如图 11 所示, 仿生光纤 FPI 麦克风每一通道的频响曲线具有两个极值点, 分别对应于摇摆模态和弯曲模态, 两通道的频率响应特性基本相同, 它们的摇摆模态本征频率分别为 688 Hz 和 693 Hz, 弯曲模态本征频率分别为 1700 Hz 和 1701 Hz; 在摇摆和弯曲模态本征频率之间的任一

频率处, 每一通道的振幅来自于两模态在该频率处振幅的叠加. 双通道的摇摆模态与弯曲模态的本征频率的测试数据与仿真结果有一定差距, 原因之一是实际制作的仿生 MEMS 振膜的几何参数与其设计参数存在差异.

### 3.3 FPI 光纤麦克风最小可探测声压的测定

仿生光纤 FPI 麦克风的最小可探测声压 ( $P_{MDP}$ ) 与被测声源频率、声源入射角具有一定的关系. 本文针对仿生光纤 FPI 麦克风在摇摆模态本征频率下的  $P_{MDP}$  进行测试. 使用图 10 所示的声学测试系统时, 由于声源垂直麦克风振膜平面入射, 仿生光纤 FPI 麦克风对声信号响应不敏感, 测试中需要施加较大声压. 测试中, 分别驱动扬声器发出仿生光纤 FPI 麦克风双通道对应的摇摆模态本征频率的声信号, 然后采集仿生光纤 FPI 麦克风双侧通道的频域和时域响应.

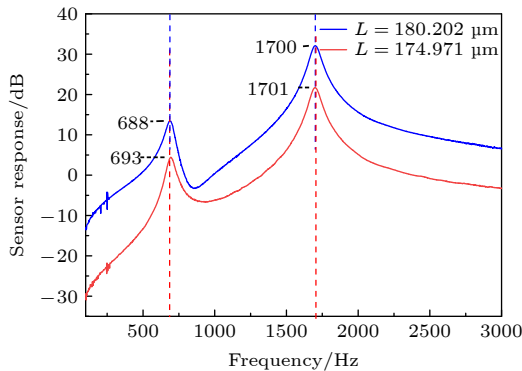


图 11 实验测得的仿生光纤麦克风的双通道频响曲线

Fig. 11. Measured frequency response curves for the two fiber-optic FPI channels of the bionic microphone.



摇摆模态下仿生光纤 FPI 麦克风两个通道的频域响应如图 12(a) 和图 12(b) 所示, 插图显示了双通道对摇摆模态本征频率信号的时域响应曲线. 两通道在各自摇摆模态本征频率处的信噪比 ( $R_{\text{SN}}$ ) 分别为 68.66 dB@688 Hz 和 58.61 dB@693 Hz. 值得指出的是, 被测麦克风的两个 FPI 通道的频域响应曲线都包含二倍频信号, 说明它们的工作点都偏离了各自的正交工作点 [24].

最小可探测声压  $P_{\text{MDP}}$ , 可表示为 [25,26]

$$P_{\text{MDP}} = P / \left( 10^{\frac{R_{\text{SN}}}{20}} \sqrt{\Delta f} \right),$$

式中  $P$  为声压,  $\Delta f$  为频率分辨率. 在上述测试中  $P = 1.32 \text{ Pa}$ ,  $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ , 将这些参数和测得的信噪比代入 (6) 式, 计算得到两个通道在各自摇摆频率下的最小可探测声压  $P_{\text{MDP}} = 0.49 \text{ mPa/Hz}^{1/2}$  @688 Hz 和  $P_{\text{MDP}} = 1.56 \text{ mPa/Hz}^{1/2}$  @693 Hz. 两个通道的  $P_{\text{MDP}}$  不等, 说明两者的对称性较差,  $P_{\text{MDP}}$  偏小的通道的声学敏感性能优于  $P_{\text{MDP}}$  较大

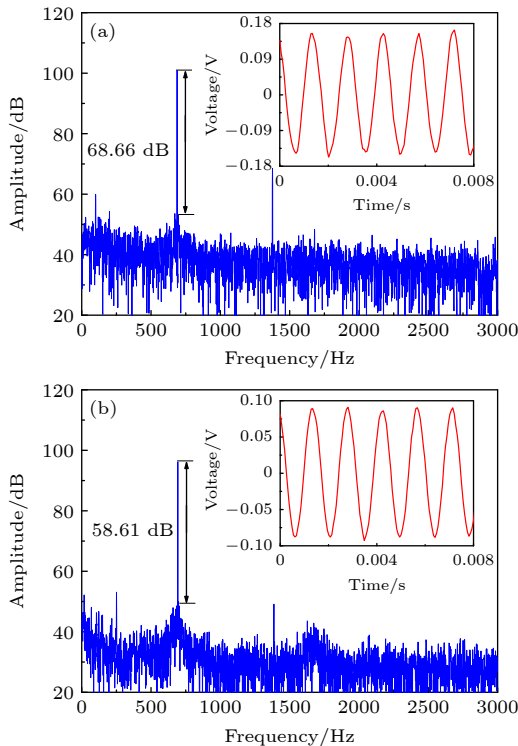


图 12 实验测得的仿生光纤麦克风对准垂直入射的单频声波的频域响应曲线, 插图为相应的时域响应曲线 (a) 声波频率 688 Hz; (b) 声波频率 693 Hz

Fig. 12. Frequency-domain response curves measured with the two fiber-optic FPI channels of the bionic microphone, and the insets show the corresponding time-domain response curves: (a) sound frequency of 688 Hz; (b) sound frequency of 693 Hz.

的通道.

### 3.4 FPI 光纤麦克风方向响应的测定

为了测试仿生光纤 FPI 麦克风双通道的方向响应, 搭建了仿生光纤 FPI 麦克风方向响应实验平台, 如图 13 所示. 仿生光纤 FPI 麦克风与光电驱动解调模块相连形成了仿生光纤 FPI 麦克风样机, 光电驱动解调模块为仿生光纤 FPI 麦克风提供光源与解调电路. 将仿生光纤 FPI 麦克风固定在电控旋转台 (大恒 GCD-011100 M) 上, 电控旋转台与电脑连接. 旋转台置于可同时调节俯仰角和水平角的三脚架上. 声源部分使用会议室音响 (天逸 TDB-09) 结合功率放大器 (天逸 AD-300 K) 组成, 由信号发生器 (Agilent-33500 B) 控制. 调节三脚架位置, 使得声源与仿生光纤 FPI 麦克风距离约为 1.2 m, 同时使得仿生光纤 FPI 麦克风的振膜与声波入射的方向平行. 定义双翼短轴正对声源时方向角  $\theta = 0^\circ$ , 测试时以固定声源旋转麦克风的方式改变二者的相对角度.

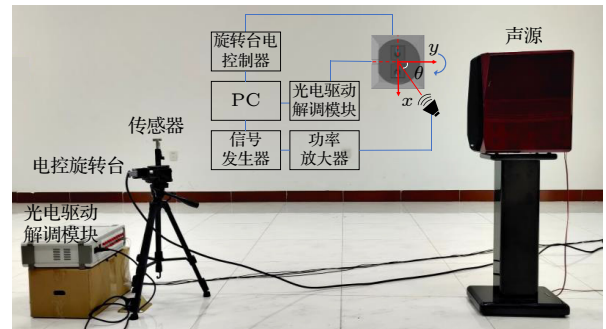


图 13 仿生光纤麦克风方向响应测试装置照片

Fig. 13. Photograph of the experimental setup for testing the directional response of the bionic fiber-optic microphone.

由于麦克风双通道摇摆模态本征频率都接近 700 Hz, 为了便于同时采集双通道的响应信号, 设定声源频率为 700 Hz, 令旋转台先顺时针以步长  $10^\circ$  旋转  $180^\circ$ , 采集  $\theta = 0^\circ - 180^\circ$  时麦克风的时域信号和频域信号, 再令旋转台先逆时针以步长  $10^\circ$  旋转  $180^\circ$ , 采集  $\theta = 0^\circ - -180^\circ$  时麦克风的时域信号和频域信号. 时域信号作为实时参考, 将频域信号的幅度值记为仿生光纤 FPI 麦克风在该角度的实时响应值. 待采集完毕后, 分别对被测麦克风的两个通道的方向响应极坐标图号通道的方向响应进行归一化.

如图 14 所示, 仿生光纤 FPI 麦克风双通道的响应随角度呈现“8”字形的变化, 与图 3(a) 的  $x$ - $y$  平面方向响应的仿真结果趋势相同. 双通道在声源方向角  $\theta = 0^\circ$  时响应趋近于 0; 在声源方向角  $\theta = 90^\circ, 270^\circ$  时响应达到极大. 仿生麦克风的方向

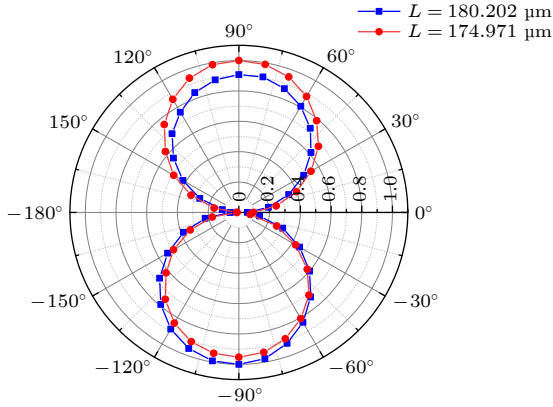


图 14 实验测得的仿生光纤麦克风的双通道对 700 Hz 声波的“8”字形方向响应极化图

Fig. 14. “8” shaped directional response polar patterns measured at 700 Hz for the two FPI channels of the bionic microphone.

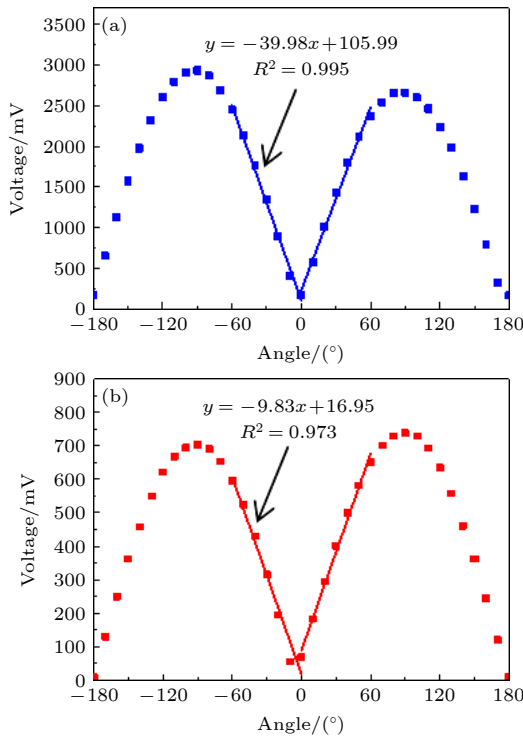


图 15 实验测得的仿生光纤麦克风通道对 700 Hz 声波的响应幅值随声源方位角的变化曲线 (a)  $P_{MDP}$  较小的通道; (b)  $P_{MDP}$  较大的通道

Fig. 15. Response amplitudes at 700 Hz of the two channels for the bionic fiber-optic microphone as a function of the sound source azimuth angle: (a) The channel of smaller  $P_{MDP}$ ; (b) the channel of larger  $P_{MDP}$ .

响应是实现定位的重要线索. 与 Bauer 等<sup>[14]</sup> 和 Rahman 等<sup>[27]</sup> 制备的仿生麦克风相比, 本文制备的仿生光纤 FPI 麦克风双通道的方向响应更加平滑.

将麦克风双通道的响应表示在直角坐标中 (见图 15), 方向角区间为  $\theta = 0^\circ - \pm 90^\circ$  时, 麦克风双通道输出值是单调的; 方向角区间为  $\theta = 0^\circ - \pm 60^\circ$  时, 仿生光纤 FPI 麦克风双通道输出值呈线性. 从图 15(a) 可知, 对于  $P_{MDP}$  较小的通道, 其方向灵敏度在  $\theta = 0^\circ - \pm 60^\circ$  时为  $39.98 \text{ mV}/(^{\circ})$ , 在  $\theta = 0^\circ - \pm 60^\circ$  时为  $37.47 \text{ mV}/(^{\circ})$ . 对于  $P_{MDP}$  较大的通道, 如图 15(b) 所示, 其方向灵敏度在  $\theta = 0^\circ - \pm 60^\circ$  的范围内几乎相等, 约为  $9.83 \text{ mV}/(^{\circ})$ .

## 4 结 论

本文以奥米亚棕蝇耳耦合结构为基础, 设计制备了连耦合双翼形硅基 MEMS 仿蝇耳振膜, 将该振膜与金属支座组装形成了具有指向性的基于硅基 MEMS 仿生振膜的 FPI 光纤麦克风. 结合设计参数与实际制备过程, 对仿生光纤 FPI 麦克风进行了仿真分析. 首先进行了振膜谐振频率的仿真, 得到了振膜的摇摆模态和弯曲模态的本征频率与对应的振动形态; 其次, 对仿生光纤 FPI 麦克风的频响特性进行了仿真, 得到了该麦克风摇摆模态和弯曲模态对应的本征频率; 最后, 仿真分析了在摇摆模态本征频率下仿生光纤 FPI 麦克风在全空间的方向响应特性, 发现随声源入射角度的变化, 麦克风在全空间的响应呈立体纺锤形分布. 在仿真的基础上, 对制得的仿生光纤 FPI 麦克风进行了性能表征与测试. 使用建立的近场声学测试系统取得了麦克风振膜双翼分别对应的双通道的频响特性曲线, 摇摆模态和弯曲模态的本征频率在 700 Hz 和 1700 Hz 附近, 与仿真数据结果接近. 然后, 在声源频率为已测得的双通道对应的摇摆模态的本征频率下, 对麦克风进行了最小可探测声压的探测, 测试结果反映出该麦克风在摇摆模态下具有良好的传感性能. 接着在声源频率接近麦克风摇摆模态对应的本征频率时, 测试了麦克风的方向响应特性, 结果表明, 麦克风输出信号强度随声源方位角变化呈现“8”字形, 在方位角  $0^\circ - \pm 60^\circ$  的范围内二者呈线性关系, 证明仿生光纤 FPI 麦克风在摇摆模态附近具有声定位的能力. 本研究设计的硅基 MEMS 仿生振膜的 FPI 光纤麦克风运用高灵

敏的光学传感原理, 实现了低频的声探测定位. 由于其独特的传感原理, 该麦克风还可以在恶劣的电磁环境下工作, 且在复杂低频声源定位领域具有广阔的应用前景.

## 参考文献

- [1] Wild G, Hinckley S 2008 *IEEE Sens. J.* **8** 1184
- [2] Wu G M, Xiong L S, Dong Z F, Liu X, Cai C, Qi Z M 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 164504
- [3] Tuma J, Janecka P, Vala M, Richter L 2012 *International Carpathian Control Conference* Grand Hotel Permon, High Tatras, Slovakia, May 28, 2012 p740
- [4] Zhu J X, Ren L, Ho S C, Jia Z G, Song G B 2017 *Smart Mater. Struct.* **26** 025022
- [5] Chang X Y, Yang C Q, Shi X F, Li P F, Shi Z G, Chen J M 2018 *IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* Porto, Portugal, June 3–6, 2018 p1
- [6] Yang C Q, Wu Z X, Chang X Y, Shi X F, Wo J F, Shi Z G 2018 *IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)* Sheffield, Britain, July 8–11, 2018 p587
- [7] Miles R N, Robert D, Hoy R R 1995 *J. Acoust. Soc. Am.* **98** 3059
- [8] Ishfaq A, Kim B 2016 *Sens. Actuators A* **250** 60
- [9] Miles R N, Cui W, Su Q T, Homentcovschi D 2014 *J. Microelectromech. Syst.* **24** 241
- [10] Touse M, Sinibaldi J, Simsek K, Catterlin J, Harrison S, Karunasiri G 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 173701
- [11] Touse M, Sinibaldi J, Karunasiri G 2010 *IEEE SENSORS 2010 Waikoloa, USA, November 1–4, 2010* p2422
- [12] Kuntzman M L, Gloria L J, Hewa-Kasakarage N N, Kim D, Hall N A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 054109
- [13] Zhang Y S, Bauer R, Windmill J F, Uttamchandani D 2016 *IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* Shanghai, China, January 1, 2016 p1114
- [14] Bauer R, Zhang Y S, Jackson J C, Whitmer W M, Windmill J 2016 *IEEE Sensors* Orlando, FL, USA, October 30–November 3, 2016 p1
- [15] Bauer R, Zhang Y S, Jackson J C, Whitmer W M 2017 *IEEE Sens. J.* **17** 5529
- [16] Zhang Y S, Bauer R, Jackson J C, Whitmer W M, Windmill J, Deepak U 2018 *J. Microelectromech. Syst.* **27** 667
- [17] Cui W, Bicen B, Hall N, Jones S A, Degertekin F L, Miles R N 2006 *19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* Istanbul, Turkey, January 22–26, 2006 p614
- [18] Miles R N, Su Q, Cui W, Shetye M, Degertekin F, Bicen B, Garcia C, Jones S, Hall N 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 2013
- [19] Miles R N, Degertekin L, Cui W, Su Q, Fredrick B 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 3316
- [20] Liu H, Currano L, Gee D, Helms T, Miao Y 2013 *Sci. Rep.* **3** 2489
- [21] Shao B, Li D, Zhang Y H, Zhu W H, Wang J J 2017 *Environ. Eng.* **35** 598 (in Chinese) [邵斌, 厉东, 张宇晖, 朱文辉, 王建军 2017 *环境工程* **35** 598]
- [22] He Z Y, Zhao Y F 1981 *Basis of Acoustics Theory* (Beijing: National Defense Industry Press) pp61–109 (in Chinese) [何梓镛, 赵玉芳 1981 *声学理论基础* (北京: 国防工业出版社) 第61–109页]
- [23] Du G H, Zhu Z M, Gong X F 2012 *Acoustic Fundamentals* (3rd Ed.) (Nanjing: Nanjing University Press) pp120, 121 (in Chinese) [杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬 2012 *声学基础*(第3版) (南京: 南京大学出版社) 第120, 121页]
- [24] Dong Z F, Hu X Y, Ren D P, Xiong L S, Liu X, Deng X, Cai C, Qi Z M 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 7008
- [25] Bucaro J A, Lagakos N, Houston B H, Jarzynski J, Zalalutdinov M 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **118** 1406
- [26] Ren D P, Liu X, Zhang M Y, Gao R, Qi Z M 2021 *IEEE Sens. J.* **21** 14655
- [27] Rahaman A, Kim B 2020 *Sci. Rep.* **10** 1

# Fiber-optic microphone based on bionic silicon micro-electro-mechanical system diaphragm<sup>\*</sup>

Liu Xin<sup>1)2)</sup>   Cai Chen<sup>1)2)</sup>   Dong Zhi-Fei<sup>1)2)</sup>   Deng Xin<sup>1)2)</sup>  
Hu Xin-Yu<sup>1)2)</sup>   Qi Zhi-Mei<sup>1)2)3)†</sup>

1) (*State Key Laboratory of Transducer Technology, Aerospace Information Research Institute,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Electronic, Electrical, and Communication Engineering,  
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 2 December 2021; revised manuscript received 14 January 2022 )

## Abstract

The bionic sound detector based on the principle of the *Ormia ochracea* fly's coupled ears is a miniature directional microphone that is sensitive to the sound pressure gradient. In this work, a silicon micro-electro-mechanical system bionic diaphragm consisting of two interconnected wings is designed and prepared, and a fiber-optic Fabry-Pérot interferometric microphone is constructed using the bionic diaphragm, and the characteristics of this microphone are studied theoretically and experimentally. According to the simulation results, the bionic diaphragm has two vibration modes of rocking and bending, and the rocking-mode displacement amplitude at a given sound pressure depends on the frequency and the propagation direction of the incident sound wave, and the closer to the eigenfrequency of the rocking mode the sound frequency, the greater the amplitude is; the rocking-mode displacement amplitude changes with the propagation direction in the three-dimensional space, resulting in a spindle-shaped distribution, and the long axis of the spindle is parallel to the long axis of the diaphragm, implying that the microphone is most sensitive to the sound wave propagating along the long axis of the diaphragm. The rocking-mode resonance frequency of the fiber-optic bionic microphone is measured to be slightly smaller than the simulated value. The output signal amplitude of the microphone changes with the horizontal azimuth angle of the sound source, producing a figure-8 polar pattern. A linear relationship between the microphone response and the azimuth angle is obtained in a range of  $0^\circ - \pm 60^\circ$ , and in this angle range the directional sensitivity of the microphone is  $39.98 \text{ mV}/(^{\circ})$ .

**Keywords:** bionic silicon-based micro-electro-mechanical system diaphragm, fiber-optic microphone, rocking mode, sound source localization

**PACS:** 43.38.Zp, 07.07.Df, 43.60.Vx, 42.81.-i

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212229

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61801456).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zhimei-qi@mail.ie.ac.cn](mailto:zhimei-qi@mail.ie.ac.cn)