

# 一种基于大角度倾斜光纤光栅包层模的低频声传感方案\*

左一武 田晶<sup>†</sup> 杨清 胡晓 江阳

(贵州大学物理学院, 贵阳 550025)

(2023 年 1 月 13 日收到; 2023 年 4 月 20 日收到修改稿)

利用倾斜光纤光栅在发生弯曲时其存在的多种纤芯-包层模式耦合方式容易发生改变, 进而使其光谱特征发生明显变化的特点, 提出并验证了一种基于大角度倾斜光纤光栅包层模的低频声传感方案. 将倾斜光纤光栅与设计的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 换能膜片及腔体结构相结合, 得到了一种有效的低频声传感系统. 该换能膜片在被测声波信号作用下产生振动, 使固定在膜片表面的倾斜光纤光栅发生周期性动态弯曲, 引起倾斜光纤光栅的包层模式光谱发生周期性漂移, 最后采用边缘滤波法进行解调, 实现低频被测声波的有效探测. 实验结果显示, 该传感方案可以在 45—220 Hz 范围内实现高灵敏度声波探测, 在传感系统固有频率附近 54 Hz 处获得最大声灵敏度 115.88 mV/Pa, 且最小探测声压为 539.2  $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ . 该传感方案具有灵敏度高、重复性好、结构简单、容易加工等优势, 在低频声探测等相关应用领域具有较大的发展前景.

**关键词:** 光纤声传感, 倾斜光纤光栅, 模式耦合, 动态弯曲

**PACS:** 43.58.+z, 07.07.Df, 42.81.-I

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230067

## 1 引言

目前低频声波传感技术已广泛应用于多个领域, 例如环境噪音监测<sup>[1]</sup>、医疗诊断<sup>[2]</sup>和自然灾害预警<sup>[3]</sup>等. 相比于传统的基于电容式和压电式的电类声传感技术, 光纤低频声波探测技术具有灵敏度高、抗电磁干扰、可实时远距离探测、造价低等优点, 近年来逐渐成为研究的热点. 光纤声传感技术中光纤干涉仪是常用的一种结构, 其包括 Mach-Zehnder 干涉仪<sup>[4]</sup>、Michelson 干涉仪<sup>[5]</sup>、Sagnac 干涉仪<sup>[6]</sup>和 Fabry-Perot 干涉仪 (FPI)<sup>[7]</sup>. 相比于其他 3 种干涉仪结构, 基于 FPI 结构的声传感系统采用膜片结构进行换能, 具有结构紧凑、灵敏度高的特点, 是目前光纤声传感技术采用的主要方法.

然而基于 FPI 结构的声传感系统传感头封装要求高, 且大部分需要通过镀膜的方式来提高膜片的反射率<sup>[8,9]</sup>, 镀膜过程控制难度大, 容易引入误差从而限制其发展.

近几年, 基于特种光纤器件的光纤声传感技术也得到了高度关注, 不同于基于 FPI 结构的声传感系统, 这类声传感系统的性能主要取决于特种光纤本身, 膜片只用于换能, 且不需要对膜片进行镀膜, 制作工艺简单、引入误差较小. 作为核心声传感元件的特种光纤、光栅主要有单模-多模-单模光纤 (SMS)<sup>[10]</sup>、锥形光纤<sup>[11]</sup>、长周期光纤光栅 (LPFG)<sup>[12–14]</sup>. 在这些特种光纤中, SMS 光纤是通过单模光纤和多模光纤拼接而成, 锥形光纤是通过光纤拉锥获得, 拼接和拉锥处理使得这两种光纤传感端面变得十分脆弱, 不利于实际应用. LPFG 是目前已知低频声波探测技术中使用最多、最实用的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61801134, 61835003) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: jtian1@gzu.edu.cn

特种光栅, 因为其存在前向纤芯-包层模式耦合, 这种耦合方式容易受到光纤弯曲的影响, 导致其透射光谱产生变化. 值得关注的是, 另一种存在大量纤芯-包层耦合方式的特殊光纤光栅是倾斜光纤光栅 (TFBG)<sup>[15]</sup>, 与 LPFG 不同的是, TFBG 存在大量反向纤芯-包层模式耦合方式, 这些耦合方式非常容易受到光纤弯曲的影响, 且模式耦合方式更多. 基于该特性, TFBG 可更好地应用于声波探测领域.

本文率先提出并理论探讨和实验验证了一种基于大角度倾斜光纤光栅包层模的低频光纤声传感方案, 主要利用倾斜光纤光栅存在多种纤芯-包层模式耦合方式, 这些耦合方式容易在光纤发生弯曲时产生模式耦合特性变化, 从而引起光栅光谱的剧烈改变. 本文将倾斜光纤光栅与设计的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 换能膜片及腔体结构相结合, 该换能膜片在被测声波信号作用下产生振动, 使得固定在膜片表面的倾斜光纤光栅发生周期性动态弯曲, 引起倾斜光纤光栅的包层模式光谱发生周期性漂移, 通过采用边缘滤波法进行解调, 最终得到了一种有效的低频声传感系统. 该传感系统具有灵敏度高、重复性好、结构简单、容易加工等优势.

## 2 传感头设计与原理

声波探测的实验装置如图 1(a) 所示, 可调谐激光器输出中心波长为 1543.9 nm 的窄线宽激光作为入射光, 通过单模光纤、隔离器后输入到传感头, 然后再经过单模光纤传输到光电探测器 (PD), PD 将光信号转化为电信号后输入到示波器中进行观测. 实验过程中, 低频声源由信号发生器驱动

商用扬声器产生, 声压级由商业声级计测量得到. 图 1(b) 为该声传感系统的传感头, 主要由倾斜光纤光栅与设计的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 换能膜片及腔体结构结合组成.

### 2.1 换能膜片工作原理

基于特种光纤光栅的声传感系统大多数都采用膜片换能. 本文利用 PET 薄膜制作声换能膜片, 如图 1(b) 所示, 将圆形 PET 薄膜四周固定在一个凹形空心圆柱体顶部, 然后将 TFBG 对称地粘贴在圆形膜片中心轴线上, 因此周边固定的圆形膜片的一阶固有频率见 (1) 式<sup>[16]</sup>:

$$f_{00} = \frac{10.21h}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}}. \quad (1)$$

由于机械共振现象的存在, 在声波信号的驱动下, 圆形膜片振动时中心处产生的最大的形变量为<sup>[17]</sup>

$$l = \frac{3P(1-\mu^2)r^4}{16Eh^3} \frac{f_{00}^2}{\sqrt{(f_{00}^2 - f^2)^2 + 4f^2\beta^2}}, \quad (2)$$

其中,  $E$ ,  $\mu$ ,  $\rho$  分别为膜片材料的杨氏模量、泊松比和密度;  $r$  和  $h$  分别为膜片半径和厚度;  $f_{00}$  和  $\beta$  分别为膜片一阶固有频率和阻尼系数;  $P$  和  $f$  分别为声压和频率. 本文采用的 PET 膜片有效半径  $r = 2.5$  cm,  $h = 50$   $\mu$ m, 杨氏模量  $E = 2.5$  GPa, 密度  $\rho = 1.38 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, 泊松比  $\mu = 0.39$ , 代入 (1) 式可得到本文膜片固有频率为 54.9 Hz. 从 (2) 式可以看出, 外界施加声音频率接近膜片固有频率时  $f \approx f_{00}$ , 膜片会因谐振拥有更大的径向形变量  $l$ .

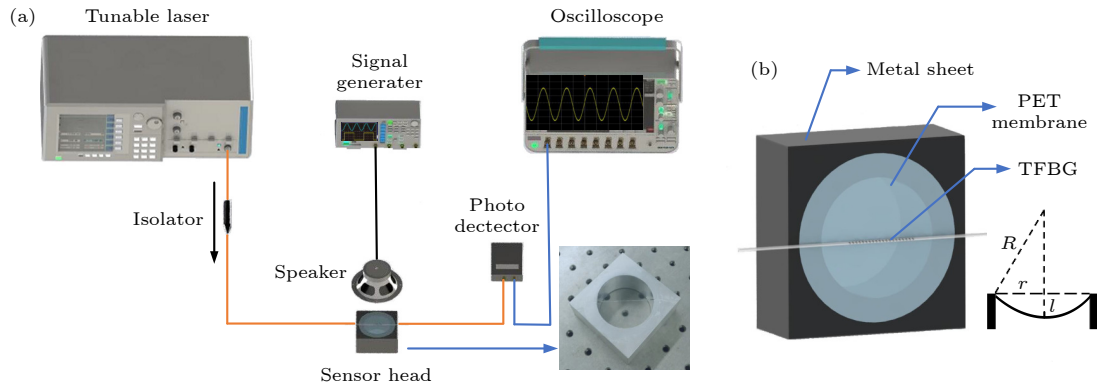


图 1 传感系统示意图 (a) 声传感光路; (b) 传感头

Fig. 1. Schematic diagram of the proposed sensing system: (a) The acoustic sensing system; (b) the sensor head.

## 2.2 倾斜光栅声传感原理

本实验选取了一根倾角为  $10^\circ$  的 TFBG 作为声波探测的传感光栅, 如图 2(a) 所示, 选取的光栅栅区长度为 2 cm, 透射光谱如图 2(b) 所示, 实验中光谱分析使用了分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪 (OSA), 通过 OSA 可以观察到该倾斜光栅光谱包含了几十个透射峰, 它们是由大量倾斜光栅包层模式组成的, 本实验选取了中心波长为 1543.87 nm, 消光比为 17.4 dB, 3 dB 带宽为 0.147 nm 的包层模  $LP_{138}$  (图 2(b) 中红色虚线标记), 该模式具有极窄的 3 dB 带宽和最大的消光比, 这使得其相比于其他模式更适合用于传感和光谱解调。

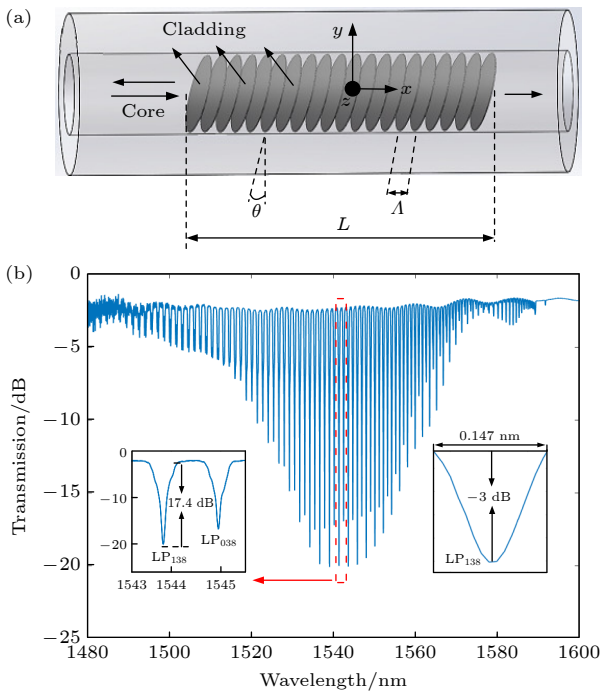


图 2 (a) TFBG 的传光结构示意图; (b) TFBG 的透射光谱图

Fig. 2. (a) Schematic diagram of TFBG light transmission structure; (b) transmission spectrum diagram of TFBG.

TFBG 独特的模式耦合方式容易在光纤发生微小弯曲时发生改变, 这会使得纤芯模式和包层模式之间的耦合特性发生变化. 对弯曲的灵敏度响应是衡量传感光纤能否实现声波有效探测的重要因素, 因此传感头在进行声波探测前通常需要对其进行弯曲分析. 通过相位匹配条件, 可以得到 TFBG 包层模的中心波长为<sup>[18]</sup>

$$\lambda_{\text{clad},i} = (n_{\text{clad},i} + n_{\text{core}})\Lambda/\cos\theta, \quad (3)$$

其中  $\theta$  表示光栅倾角,  $\Lambda$  是栅格周期;  $n_{\text{core}}$  和  $n_{\text{clad},i}$  分别为纤芯模的有效折射率和第  $i$  阶包层模的有

效折射率. 光纤发生弯曲时  $\theta$ ,  $\Lambda$ ,  $n_{\text{clad},i}$  均发生改变, 这会使得包层模式产生波长漂移。

为得到曲率变化与包层模波长漂移的关系, 本文测试了 TFBG 的  $LP_{138}$  和  $LP_{038}$  (图 2(b) 中红色虚线标记) 模式在不同弯曲程度下的光谱响应, 如图 3 所示. 从图 3(a) 可看出, 当弯曲曲率增大时, TFBG 的透射光谱会发生蓝移, 而透射光谱强度几乎没有发生变化. 从图 3(b) 可见, TFBG 发生弯曲曲率为  $0.199 \text{ m}^{-1}$  时, 波长漂移幅度较小, 当弯曲曲率达到  $0.281 \text{ m}^{-1}$  时, 波长漂移量增幅变大. 通过拟合可以得到  $LP_{138}$  和  $LP_{038}$  的曲率灵敏度分别为  $-1.212 \text{ nm/m}^{-1}$  和  $-1.219 \text{ nm/m}^{-1}$ , 二者拥有几乎相同的曲率灵敏度, 这表明了相邻包层模式拥有相似的耦合特性。

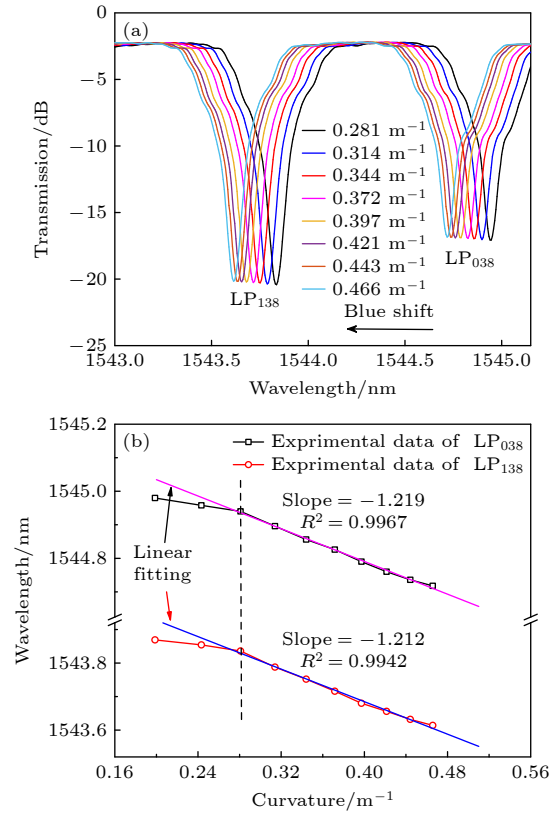


图 3 不同弯曲程度的光谱响应 (a) TFBG 在不同曲率下的透射光谱; (b)  $LP_{138}$  和  $LP_{038}$  的曲率灵敏度

Fig. 3. Spectral response under different bending degrees: (a) Transmission spectra of TFBG with different curvatures; (b) curvature sensitivity for  $LP_{138}$  and  $LP_{038}$ .

TFBG 与其他的光纤光栅或特种光纤弯曲性能对比结果如表 1 所列, 可以看出, 本文的曲率灵敏度绝对值最大, 故利用 TFBG 作为传感元件具有更好的应用于声波探测领域的前景。

表 1 光纤弯曲性能比较

Table 1. Comparison of fiber bending property.

光纤结构	曲率灵敏度/(nm·m <sup>-1</sup> )
FBG <sup>[19]</sup>	0.226
FBG <sup>[20]</sup>	-0.811
FPI <sup>[21]</sup>	0.069
双包层多模光纤 <sup>[22]</sup>	0.611
本工作(TFBG)	-1.212

从 TFBG 弯曲光谱响应特征可见, 光纤弯曲时包层模的光谱发生蓝移, 波长漂移的大小与弯曲的程度在一定范围内呈线性关系, 因此可得到如下波长漂移量  $\Delta\lambda_{\text{clad},i}$  与曲率  $C$  的关系:

$$\Delta\lambda_{\text{clad},i} = k_C^{\text{clad},i} C. \quad (4)$$

由图 1(b) 可得出膜片半径  $r$  与膜片形变量  $l$  以及弯曲曲率  $C$  的几何关系, 由于声压作用下膜片产生的形变量远小于膜片尺寸, 即  $l \ll r$ , 因此 TFBG 随着膜片弯曲的曲率可以表示为

$$C = \frac{2l}{r^2}. \quad (5)$$

另外, 因为基于 TFBG 的声波探测本质上是一种动态弯曲测量, 本文主要采用边缘滤波法进行解调, 通过追踪被调制的激光的输出功率变化来实现声波解调. 根据边缘滤波原理<sup>[23]</sup> 容易得到本文提出的声传感方案激光输出功率变化  $\Delta I$  与波长漂移  $\Delta\lambda_{\text{clad},i}$  的关系为

$$\Delta I = I_0 k \Delta\lambda_{\text{clad},i}. \quad (6)$$

其中  $I_0$  是入射激光的初始透射功率,  $k$  是光谱操作点处的光谱斜率. 结合 (2), (4), (5), (6) 式得到激光的功率变化:

$$\Delta I = I_0 k k_C^{\text{clad},i} \frac{3(1 - \mu^2)r^2 P}{8Eh^3} \frac{f_{00}^2}{\sqrt{(f_{00}^2 - f^2)^2 + 4f^2\beta^2}}, \quad (7)$$

可以看出, 当膜片材料和尺寸确定时, 激光经过该传感系统后的光功率变化  $\Delta I$  仅是声压  $P$  和频率  $f$  的函数, 当声音  $P$  参数固定时,  $\Delta I$  在一阶固有频率  $f_{00}$  处获得最大值; 而当  $f$  参数固定时,  $\Delta I$  和  $P$  成正比关系.

### 3 声传感实验与结果分析

首先利用比值法测量了所提出的传感系统在膜片固有频率附近的频率响应, 结果如图 4 所示.

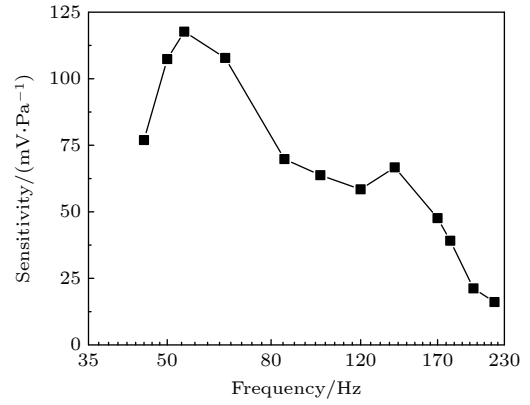


图 4 传感方案的频率响应

Fig. 4. Frequency response of the sensing system.

从频率响应结果可以看出, 声音的驱动频率越接近 54 Hz 处, 传感系统获得的灵敏度越高, 这与理论计算的固有频率点 54.9 Hz 是高度一致的. 另外, 存在 0.9 Hz 的频差经分析是由于膜片制作过程中厚度、半径等加工误差引起的. 在实验过程中测试的 45—220 Hz 频率范围内, 当声音驱动频率大于 150 Hz 时 (大约为固有频率的 3 倍处), 传感系统的灵敏度显著下降, 这是因为当驱动频率远离固有频率后, 膜片的换能效率会迅速降低. 为了更加直观地观察到传感系统的频率响应结果, 如图 5 所示, 在实验过程中随机测试了传感系统在相同声压下, 频率分别为 54, 80, 180 Hz 处的时域和频谱信号 (通过使用 Tektronix MSO58 型号的示波器在室温和室内条件下采集时域信号, 然后对该信号进行快速傅里叶变换获得频谱信号).

从图 5 可看出, 传感系统探测到的信号频率和被测声波信号的频率一致, 相同声压下在固有频率 54 Hz 处信号强度最强, 信噪比 (SNR) 为 43.9 dB; 当驱动频率远离固有频率 54 Hz 时, 如 80, 180 Hz 等, 输出信号幅值 (含频域和时域) 将会逐渐降低. 另外在图 5(a) 的 54 Hz 频谱图中还存在谐波现象, 这是由于声波在室内发生多次反射形成的, 这些谐波信号信噪比最大为 15.4 dB, 远小于主频信噪比 43.9 dB 的一半, 因此不会对实验产生影响, 如果该声传感系统的实际应用场景在室外则不会出现谐波现象.

传感系统对声压的响应是衡量其灵敏度的重要指标, 因此本文随机测试了声音频率为 54 Hz 和 80 Hz 的声压响应, 且进行重复性测试, 实验结果如图 6 所示.

从实验结果可以看出, 在 54 Hz 和 80 Hz 处声



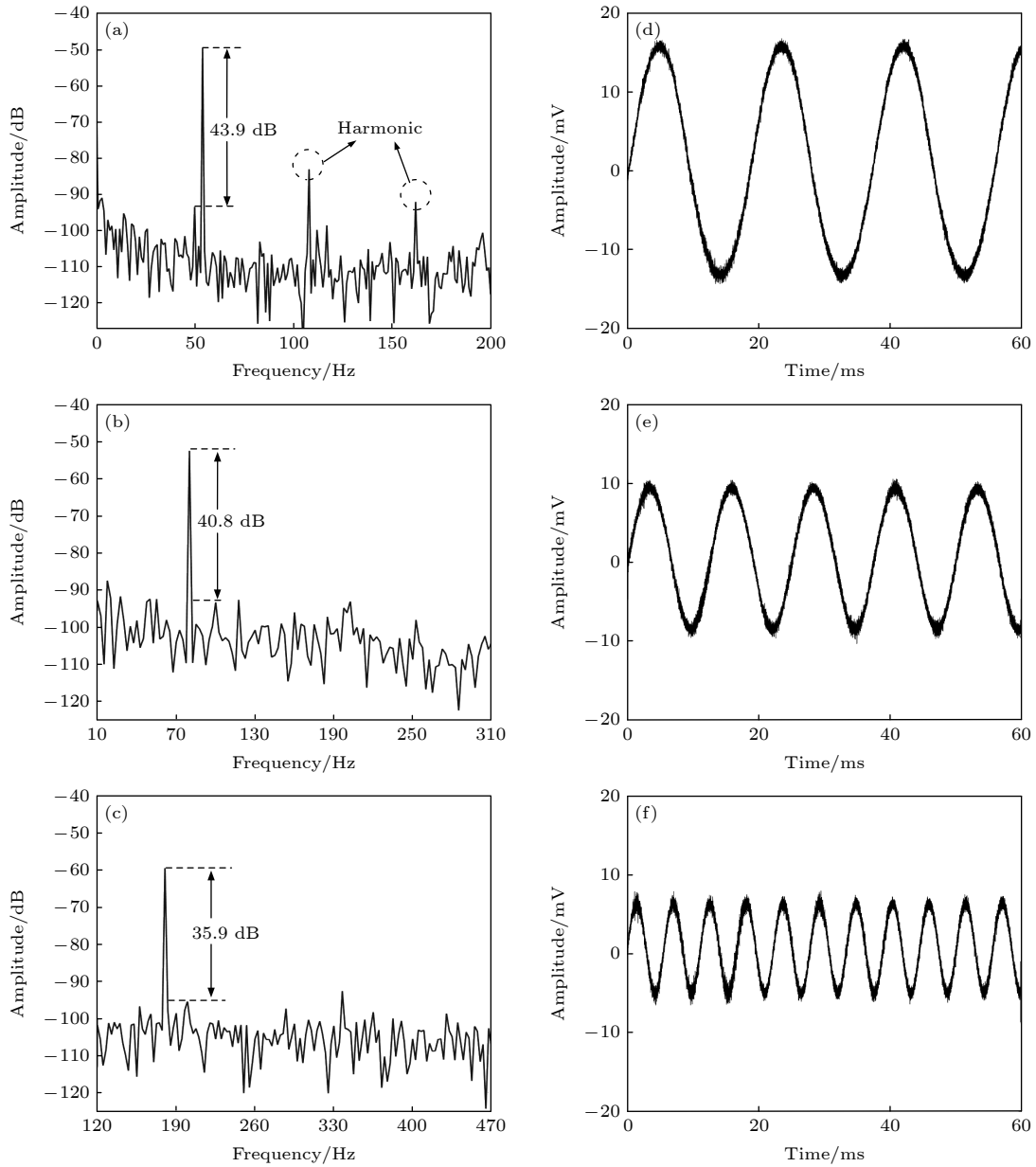


图 5 不同频率的 (a)—(c) 频谱响应和 (d)—(f) 时域波形 (a), (d) 54 Hz; (b), (e) 80 Hz; (c), (f) 180 Hz

Fig. 5. Time spectrum response and domain signal at different frequencies: (a), (d) 54 Hz; (b), (e) 80 Hz; (c), (f) 180 Hz.

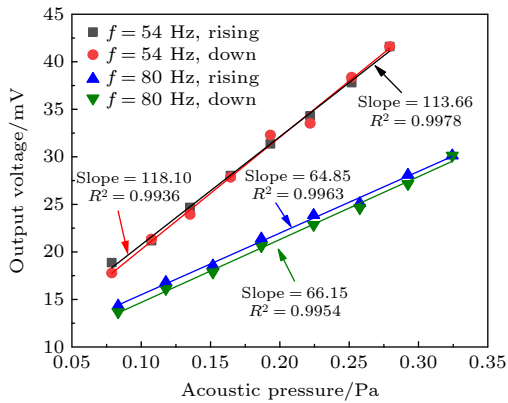


图 6 54 Hz 和 80 Hz 的声压响应

Fig. 6. Acoustic pressure response of 54 Hz and 80 Hz.

压响应均具有良好的线性度, 其中 54 Hz 的两次响应线性度分别为 0.9978 和 0.9936, 声压灵敏度分别为 113.66 mV/Pa 和 118.1 mV/Pa, 在声压逐渐增大和减弱的两个过程中, 平均声压灵敏度为 115.88 mV/Pa; 80 Hz 的两次响应线性度分别为 0.9963 和 0.9954, 声压灵敏度分别为 64.85 mV/Pa 和 66.15 mV/Pa, 平均声压灵敏度为 65.5 mV/Pa. 声压灵敏度响应结果再次证明, 当传感系统在固有频率附近工作时, 将会拥有更大的声压灵敏度. 根据图 5(a) 的频谱图可以得到, 在驱动声压 ( $P$ ) 为 76.8 dB, 频率为 54 Hz 处的信噪比 (SNR) 为 43.9 dB、频谱线宽分辨率 ( $\Delta f$ ) 约为 2.6 Hz, 根据

如下公式<sup>[7]</sup>:

$$\text{MDP} = \frac{P}{10^{\frac{\text{SNR}}{20}} \sqrt{\Delta f}}, \quad (8)$$

计算出该传感方案最小探测声压为 539.2  $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ .

为了证明本文所提出的低频声波传感方案的优越性, 在对传感系统输出信号不进行任何放大或者滤波的前提下, 将本文提出的声传感方案与最近几年发表的声传感方案主要性能指标进行比较, 如表 2 所列. 可见本文所提出的声传感方案简单可行、灵敏度高、传感性能整体较好.

表 2 光纤声传感方案的性能比较

Table 2. Performance comparison of fiber optical acoustic sensing system.

声传感结构	声压灵敏度 $S/(\text{mV} \cdot \text{Pa}^{-1})$	信噪比 $\text{SNR}/\text{dB}$	最小探测声压 $\text{MDP}/(\mu\text{Pa} \cdot \text{Hz}^{-1/2})$
光纤悬臂梁拼接FP腔 <sup>[24]</sup>	88	60	—
FPI-金膜 <sup>[25]</sup>	80.6	42	1300
FPI-聚氯乙 烯膜 <sup>[26]</sup>	33.26	48	217
LPFG <sup>[13,14]</sup>	83.2	40.6	331.9
本工作(TFBG)	115.88	43.9	539.2

## 4 结 论

本文首次提出并设计验证了一种基于大角度倾斜光纤光栅包层模的低频声传感方案, 通过将大角度倾斜光纤光栅与设计的 PET 换能膜片及腔体结构相结合得到了一种有效的低频声传感系统. 理论分析并推导出了被测声信号与传感系统输出信号之间的关系. 实验结果表明, 传感系统实验结果与理论分析一致, 能够实现对低频声波信号的有效测量, 传感系统在 54 Hz 处获得最大声压灵敏度 115.88  $\text{mV}/\text{Pa}$ , 对应的最小探测声压为 539.2  $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ . 该传感方案线性度好、结构简单、设计灵活、可开发潜力大, 在低频声波探测领域具良好发展前景.

## 参考文献

- [1] Mydlarz C, Salamon J, Bello J P 2017 *Appl. Acoust.* **117** 207
- [2] Duan S C, Wang W D, Zhang S, Yang X, Zhang Y, Zhang G J 2021 *IEEE Access* **9** 27122
- [3] Grangeon J, Lesage P 2019 *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **387** 106668
- [4] Zhu W H, Li D Y, Liu J J, Wang R H 2020 *App. Opt.* **59** 1775
- [5] Jia J S, Jiang Y, Zhang L C, Gao H C, Jiang L 2019 *IEEE Sens. J.* **19** 7988
- [6] Jiang J, Wang K, Wu X R, Ma G M, Zhang C H 2020 *Plasma Sci. Technol.* **22** 024002
- [7] Liu X, Cai C, Dong Z F, Deng X, Hu X Y, Qi Z M 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 094301 (in Chinese) [刘欣, 蔡宸, 董志飞, 邓欣, 胡昕宇, 祁志美 2022 物理学报 **71** 094301]
- [8] Wang S, Lu P, Liu L, Liao H, et al. 2016 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **28** 1264
- [9] Dass S, Chatterjee K, Kachhap S, Jha R 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 3974
- [10] Chaganti L, Ahmad M H, Piah M A M, Noor M Y M, Azmi A I 2020 *IEEE Access* **8** 188044
- [11] Dass S, Jha R 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 5411
- [12] Luo C, Lu P, Fu X, Chen J, Wang S, Zhang C, Liu D M, Zhang J S 2016 *Photonic Netw. Commun.* **32** 224
- [13] Fu X, Lu P, Ni W J, Liu L, Liao H, Liu D M, Zhang J S 2016 *IEEE Photonics J.* **8** 6805713
- [14] Lu P, Liu D M, Liao H 2016 *Conference on Advanced Sensor Systems and Applications VII* Beijing, China, October 12–14, 2016 p202
- [15] Guo T A, Liu F, Guan B O, Albert J 2016 *Opt. Laser Technol.* **78** 19
- [16] Hayber S E, Aydemir U, Tabaru T E, Saracoglu O G 2019 *IEEE Sens. J.* **19** 5680
- [17] Guo M, Chen K, Zhang G Y, Li C X, Zhao X Y, Gong Z F, Yu Q X 2022 *J. Lightwave Technol.* **40** 4481
- [18] Kipriksiz S E, Yucel M 2021 *Opt. Quantum Electron.* **53** 6
- [19] Yang S T, Wang H Y, Yuan T T, Zhang X T, Yuan L B 2022 *J. Lightwave Technol.* **40** 6030
- [20] Zhu F X, Zhang Y D, Qu Y C, Jiang W G, Su H Y, Guo Y, Qi K Y 2020 *Opt. Fiber Technol.* **54** 102133
- [21] Monteiro C S, Ferreira M S, Silva S O, Kobelke J, Schuster K, Bierlich J, Frazao O 2016 *Photonic Sens.* **6** 339
- [22] Wei Y, Liu C B, Liu C L, et al. 2022 *IEEE Sens. J.* **22** 21719
- [23] Zhan P, Huang Y L 2020 *International Conference on Optoelectronic and Microelectronic Technology and Application* Nanjing, China, October 20–22, 2020 p827
- [24] Wu S N, Wang L, Chen X L, Zhou B 2018 *J. Lightwave Technol.* **36** 2216
- [25] Huang Q Q, Deng S, Li M, et al. 2020 *Opt. Eng.* **59** 064105
- [26] Yao Q K, Guo X, Xie L F, et al. 2021 *Materials* **14** 7605

# A low-frequency acoustic sensing scheme based on cladding mode of large-angle tilted fiber Bragg grating<sup>\*</sup>

Zuo Yi-Wu   Tian Jing<sup>†</sup>   Yang Qing   Hu Xiao   Jiang Yang

(*College of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

( Received 13 January 2023; revised manuscript received 20 April 2023 )

## Abstract

A novel low frequency acoustic sensor based on the cladding mode of large-angle tilted fiber Bragg grating (TFBG) is proposed and verified in this work. It mainly uses the characteristic that the coupling mode of the core and cladding mode in TFBG is easy to change when the TFBG experiences micro-bend, which will finally causes a dramatic drift in the spectrum. By combining a large-angle TFBG with the designed polyethylene terephthalate (PET) transducer diaphragm and cavity structure, an effective low-frequency acoustic sensing system is obtained in this work. Under the action of applied acoustic wave, the transducer membrane will have periodic vibrations, which will makes the fixed TFBG dynamically bend, directly leading to a wavelength shift of the cladding mode spectrum. The experimental results show that the sensing system can achieve high-sensitivity acoustic detection in a frequency range of 45–220 Hz, and a maximum acoustic pressure sensitivity of 115.88 mV/Pa at 54 Hz. Moreover, the minimum detection sound pressure can achieve 539.2  $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}@54\text{ Hz}$ . Therefore, the sensor has the advantages of high sensitivity, good repeatability, simple structure, easy processing, etc. It has a great development prospect in the low-frequency acoustic detection related application fields.

**Keywords:** fiber optic acoustic sensing, tilted fiber Bragg grating, mode coupling, dynamic bending

**PACS:** 43.58.+z, 07.07.Df, 42.81.-I

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230067

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61801134, 61835003).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [jtian1@gzu.edu.cn](mailto:jtian1@gzu.edu.cn)

## 一种基于大角度倾斜光纤光栅包层模的低频声传感方案

左一武 田晶 杨清 胡晓 江阳

### A low-frequency acoustic sensing scheme based on cladding mode of large-angle tilted fiber Bragg grating

Zuo Yi-Wu Tian Jing Yang Qing Hu Xiao Jiang Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 124304 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230067

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230067>

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

#### 氧化石墨烯修饰倾斜光纤光栅 $10^{12}$ 级重金属离子传感

Graphene oxide modified tilted fiber Bragg grating for  $10^{12}$  level heavy metal ion sensing

物理学报. 2022, 71(5): 050702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211315>

#### 螺旋波等离子体中螺旋波与Trivelpiece-Gould波模式耦合及线性能量沉积特性参量分析

Parametric analysis of mode coupling and liner energy deposition properties of helicon and Trivelpiece-Gould waves in helicon plasma

物理学报. 2020, 69(11): 115201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200062>

#### 电子温度对螺旋波等离子体中电磁模式能量沉积特性的影响

Effects of electron temperature on energy deposition properties of electromagnetic modes propagating in helicon plasma

物理学报. 2020, 69(21): 215201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201018>

#### 对称熔融拉锥型光纤光栅温度和应力传感特性

Temperature and stress sensing characteristics of symmetrically fused tapered fiber grating

物理学报. 2019, 68(24): 244204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191034>

#### 基于双包层光纤布拉格光栅传感器的锂电池组温度场监控

Temperature field monitoring of lithium battery pack based on double-clad fiber Bragg grating sensor

物理学报. 2022, 71(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212302>

#### 基于模场自积增强检测的光纤声光旋转传感器

Enhanced selfintegration algorithm for fiber torsion sensor based acoustically-induced fiber grating

物理学报. 2018, 67(1): 014208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171525>