

激光与光电子学进展

基于氧化石墨烯微腔的光纤多频声振动传感器

赵津津, 王嘉璇, 王嘉源, 万洪丹*, 张祖兴

南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023

摘要 本文提出一种基于氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)微腔的光纤多频法布里-珀罗(Fabry-Perot, FP)声振动传感器。该传感器使用单模光纤端面和GO薄膜构成微米级尺度的FP干涉微腔结构,采用液相法制备GO薄膜并将其作为声振动信号的敏感材料,实现对外界声振动信号的探测。通过控制和优化FP微腔长度可以获得消光比最大的干涉光谱,并对该传感器施加不同频率的单频、双频和三频声振动信号以测试其对多频信号的响应能力。实验结果表明,该传感器具有较高的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR);对单频振动信号传感的SNR最高可达61.8 dB,频率响应范围较宽,约为500 Hz~20 kHz;对双频和三频声振动信号传感的SNR最高分别可达56.8 dB和54.4 dB。

关键词 光学器件; 氧化石墨烯; 声振动传感; 法布里-珀罗微腔; 干涉光谱; 信噪比

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2123002

Multi-Frequency Optical Fiber Acoustic Sensor Based on Graphene Oxide Microcavity

Zhao Jinjin, Wang Jiaxuan, Wang Jiayuan, Wan Hongdan*, Zhang Zuxing

College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract In this paper, we propose a fiber-optic multifrequency Fabry-Perot (FP) acoustic vibration sensor based on a graphene oxide (GO) microcavity. The sensor uses a single-mode fiber end face and GO film to form a micron-scale FP interference microcavity structure. The GO film is prepared by liquid-phase method and used as a sensitive material to detect the external acoustic vibration signals. Through controlling and optimizing the length of the FP microcavity, the interference spectrum with the largest extinction ratio can be obtained, and single-, dual-, and triple-frequency acoustic vibration signals of different frequencies are applied to the sensor to test its response capability to multifrequency signals. The experimental results show that the sensor has a high signal-to-noise ratio (SNR); the SNR for single-frequency vibration signal sensing can reach up to 61.8 dB, and the frequency response range is wide, approximately 500 Hz–20 kHz; the highest SNR for dual- and triple-frequency acoustic vibration signal sensing can reach 56.8 dB and 54.4 dB, respectively.

Key words optical devices; graphene oxide; acoustic vibration sensing; Fabry-Perot microcavity; interference spectrum; signal-to-noise ratio

OCIS codes 230.1040; 240.3990; 280.4788

收稿日期: 2021-02-26; 修回日期: 2021-02-28; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12174199)、国家自然科学基金青年科学基金(11704199)、江苏省高校自然科学基金项目(18KJB140010)、南京邮电大学创新训练计划(SZDG2020011)

通信作者: *hdwan@njupt.edu.cn

1 引言

相比于传统的电学声波传感器,光纤声振动传感器(Fiber Optic Acoustic Sensor, FOAS)因具有体积小、灵敏度高、灵活性高以及全光纤、耐腐蚀和抗电磁干扰等优点^[1-2]而成为光纤传感领域的研究热点之一。常见的FOAS包括光纤光栅干涉仪^[3-4]、迈克耳孙干涉仪^[5]、马赫曾德尔干涉仪^[6]、萨格奈克干涉仪^[7]和法布里-珀罗(Fabry-Perot, FP)干涉仪^[8-9]等,上述传感器在结构健康检测、光纤水听器^[10-11]、管道泄漏检测^[12]和生物医学^[13]等领域的应用前景良好。

近年来,国内外报道了一系列关于FOAS的研究成果。Wang等^[14]设计了一种基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的麦克风,其采用双FBG和钛膜进行强度解调,实现了频率响应范围为200~1000 Hz的单频声振动信号的测试,平均信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)不低于22 dB。Dong等^[15]设计了一种基于锥形双包层光纤干涉仪的表面安装声传感器,其灵敏度可达压电声传感器的33.5倍,实现了超高声压灵敏度的检测。Qi等^[16]设计了一种基于飞轮状振膜的FP声传感器,实现了频率响应范围为1~20 kHz的单频声振动信号的测试。

石墨烯是一种具有蜂窝状晶格结构的二维碳纳米材料,其具有优异的机械特性与光学性能,可用于声振动传感领域,在感测外界施加信号的过程中具有很高的灵敏度^[17]。Ni等^[18]利用石墨烯薄膜结合FP干涉腔制成了超宽带FOAS,实现了频率响应范围为5 Hz~800 kHz的单频声振动信号的测试,SNR可达35 dB。然而,石墨烯薄膜在空气中的寿命仅有几天^[19],并且制备过程繁杂,在转移过程中极易破裂^[20],不适宜在多种环境下进行声振动实验。相比之下,氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)作为石墨烯的重要衍生物之一,与石墨烯具有相似的结构以及丰富的表面官能团,其结构更为稳定,因此具备良好的机械性能,可作为感知外界扰动声信号的敏感材料^[21]。然而,现有光纤声振动传感器的研究多局限于单环境、单频声振动信号的测量,对于多环境下多频声振动信号的检测仍需进一步探索。

本文提出并研究基于GO微腔的光纤多频FP声振动传感器。采用液相法制备GO薄膜,制备过程简易且时间周期短,薄膜的转移成功率高。以单模光纤端面和GO薄膜作为反射端面来构成微米级

尺度的FP干涉腔,使用毛细玻璃管对FP进行封装以增强结构的稳定性。搭建基于GO微腔的光纤多频FP声振动传感器实验系统,分别在空气中和水下对该传感器进行单频和多频声振动测试。实验结果表明,传感器在空气中最高可实现频率响应范围为500 Hz~20 kHz的宽域单频声振动传感,声振动信号测试的SNR最高可达61.8 dB,比现有结果高26.8 dB^[18],而且可以实现三频声振动信号的同时测量。基于GO薄膜的FP微腔FOAS在单频和多频声振动测试中均具有较高的响应能力,SNR最高分别可达61.8 dB和56.8 dB,可以实现在空气和水等多种环境中对声振动信号的宽频域检测。

2 实验原理

根据FP干涉理论,FOAS中的FP微腔由单模光纤端面和GO薄膜构成,其中FP干涉光谱^[22]可表示为

$$I(\lambda) = I_{\text{Fiber}}(\lambda) + I_{\text{GO}}(\lambda) + 2\sqrt{I_{\text{Fiber}}(\lambda)I_{\text{GO}}(\lambda)}\cos(4\pi nl/\lambda), \quad (1)$$

式中: λ 为入射光波长; $I(\lambda)$ 为干涉光谱在不同波长处的光强; $I_{\text{Fiber}}(\lambda)$ 为光纤端面的反射光强; $I_{\text{GO}}(\lambda)$ 为GO薄膜的反射光强; l 为FP腔的腔长; n 为腔内介质的折射率(空气中 $n=1$)。由(1)式可知,在 λ 值一定的条件下, $I(\lambda)$ 值只与 n 和 l 有关。当外界对该传感器施加声信号时,GO薄膜会产生机械运动,使得 l 值发生变化,从而导致 $I(\lambda)$ 值发生变化,进而导致干涉光谱发生波长漂移,最终实现对声振动信号的测量。使用光电探测器将光强信号转换为电信号,即可使用频谱仪等仪器实现对加载声振动信号的测试。

同时,基于(1)式对经过FP微腔的干涉光谱进行仿真,则不同腔长 l 下的干涉光谱如图1所示。从

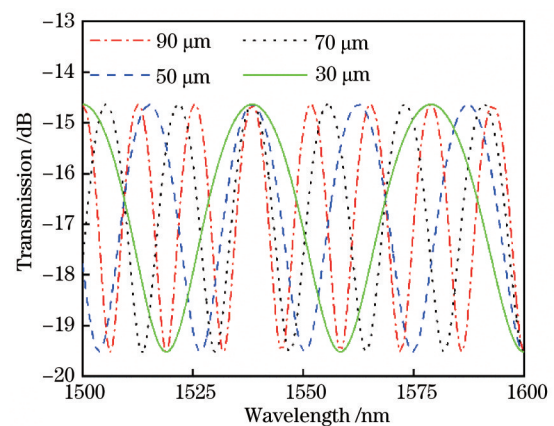


图1 不同FP微腔腔长下的干涉光谱

Fig. 1 Interference spectra at different FP microcavity lengths

图 1 可以看到,随着微腔腔长的增大,干涉光谱的自由光谱范围不断减小。

3 传感器的制作

GO 薄膜的制备过程:1)将厚度为 20 μm 的铜箔裁剪成 1 cm \times 1 cm 的大小,放入乙酸溶液(乙酸与去离子水的体积比为 1:4)中进行初步酸洗,时长为 30 min,为了提高铜箔表面的洁净度,初次清洗完毕后依次使用去离子水和无水乙醇各进行 10 min 的超声清洗,最后在 60 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下加热干燥清洗好的铜箔,时长为 15 min; 2)将 GO 粉末溶于去离子水中,配置质量浓度为 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 GO 水分散液并进行 10 min 的超声处理; 3)使用移液枪吸取步骤 2)的 GO 分散液 170 μL 并滴加在处理过的铜箔上,在 80 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下加热干燥 1 h; 4)将带有 GO 薄膜的铜箔放入浓度为 2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 FeCl_3 溶液中进行腐蚀,待铜箔完全溶解后使用药匙进行捞取转移,将漂浮在 FeCl_3 溶液表面的 GO 薄膜在去离子水中清洗多次,最后将其转移到无水乙醇中; 5)使用长为 1 cm、内径为 1.7 mm 和外径为 2.0 mm 的透明玻璃管捞取无水乙醇中的 GO 薄膜,使 GO 薄膜附着在玻璃管端面上,对其进行加热使 GO 薄膜干燥。在范德瓦耳斯力的作用下,干燥后的 GO 薄膜将紧紧贴附在玻璃管端面。将玻璃管放置在载玻片上,滴加紫外胶进行固定。使用高精度位移平台夹持一段单模光纤,令单模光纤的一端从玻璃管另一开口处伸入,精确调整其与 GO 薄膜的相对位置,使单模光纤端面与 GO 薄膜形成微米级尺度的 FP 微腔。将单模光纤的另一端接入光谱仪中以实时观测 FP 微腔干涉光谱的变化,在测得其干涉光谱的消光比最大的情况下滴加紫外胶将传感器封装和固定在载玻片上。制备完毕的覆有 GO 薄膜的玻璃管端面如图 2 所示。

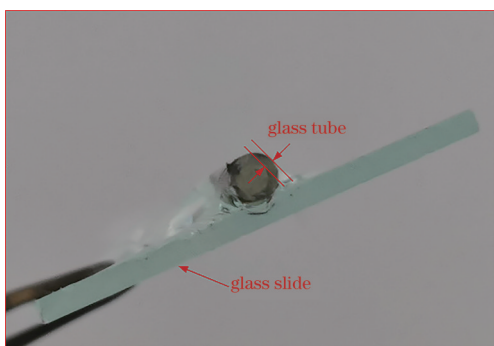


图 2 覆有 GO 薄膜的玻璃管端面

Fig. 2 Glass tube end surface covered with GO film

4 实验装置及分析

基于 GO 微腔的光纤多频 FP 声振动传感器的干涉光谱的测试原理如图 3 所示。实验装置主要包括宽带光源(Broadband Source, BBS, 波长范围为 1250~1650 nm)、环形器和光谱仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA, 波长分辨率为 0.02 nm)。BBS 发出的光从环形器的端口 2 进入 FP 微腔中,经过 FP 微腔端面反射后再从环形器的端口 3 进入 OSA 中,从而实时观测干涉光谱。

图 4 为 FOAS ($l \approx 50 \mu\text{m}$) 在不同环境下的干涉

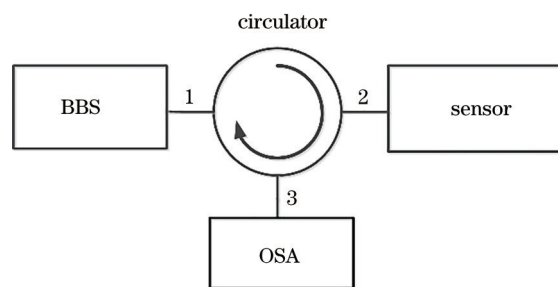


图 3 干涉光谱的测试原理

Fig. 3 Measuring principle of interference spectrum

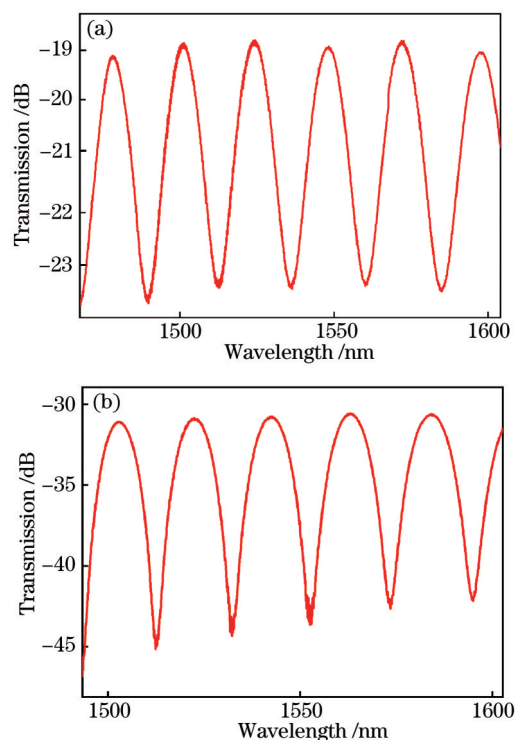


图 4 光纤声振动传感器在不同环境下的干涉光谱。

(a) 空气; (b) 水

Fig. 4 Interference spectra of optical fiber acoustic vibration sensor in different environments. (a) Air; (b) water

光谱。从图 4(a)可以看到,空气中的自由光谱范围为 24.3 nm,消光比达到 3.87 dB,损耗为 19.3 dB。从图 4(b)可以看到,水下的自由光谱范围为 20.3 nm,消光比为 13.58 dB,损耗为 30.7 dB。实验结果表明,将该传感器放入水中后,由于折射率及水下压强的变化,其自由光谱范围减小,消光比增大,损耗增大。

对腔长 $l \approx 50 \mu\text{m}$ 的 FP 腔的干涉光谱进行仿真,仿真结果如图 5 所示。从图 5 可以看到,自由光谱范围为 23.82 nm,消光比达到 4.9 dB,与图 4(a)的实际测试情况吻合。实验中的损耗远大于仿真结果的原因:GO 薄膜可能不均匀以及在转移清洗的过程中薄膜表面可能残留杂质等。

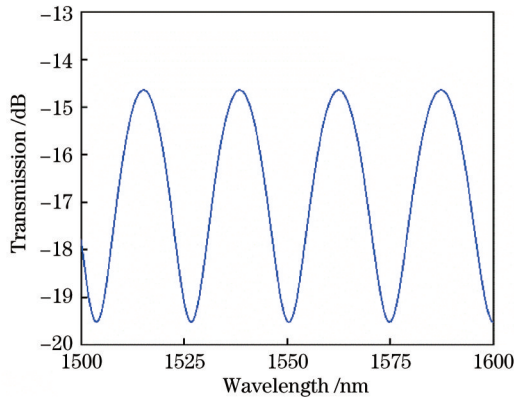


图 5 FP 腔的干涉光谱的仿真结果

Fig. 5 Simulation result of interference spectra of FP cavity

基于封装好的 FOAS 搭建图 6 的声振动传感实验系统,实验装置主要包括可调谐激光器(Tunable Laser Source, TLS,波长调谐范围为 1520~1630 nm,带宽小于 5 kHz)、环形器、光电探测器(Photoelectric Detector, PD)、频谱分析仪(Frequency Spectrum Analyzer, FSA)、扬声器和函数信号发生器(Function Signal Generator, FSG)。

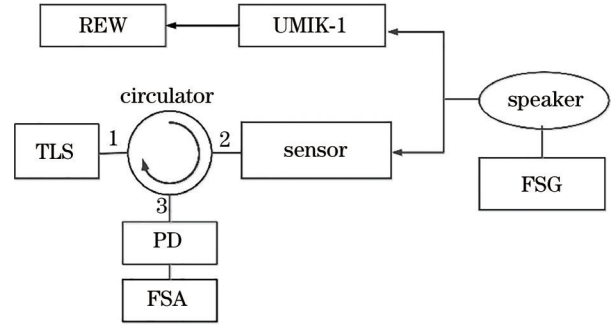


图 6 声振动信号的测试实验系统

Fig. 6 Test and experiment system of acoustic vibration signal

将 TLS 作为光源,发射出的光信号经过声振动传感器表面的 GO 薄膜后被反射,反射回的光信号经过环形器后进入 PD 中,使用 FSA 对信号进行解调。测试所需的声振动信号由 FSG 驱动扬声器产生,同时使用 UMIK-1 型麦克风及其配套软件(REW)在计算机(PC)上对检测到的声振动信号进行定标。

5 实验结果分析

5.1 单频声振动测试

首先对该传感器进行单频声振动信号的测试。在输入光波长为 1550 nm 和入射光功率为 $100 \mu\text{W}$ 的情况下测试 FOAS 的信噪比与频率响应范围,施加频率范围为 500 Hz~20 kHz 的声振动信号进行实验,结果如图 7 所示。其中图 7(a)从左往右依次对应应在 500~900 Hz 之间以 100 Hz 为间隔施加声振动信号后的信噪比;图 7(b)和图 7(c)从左往右依次对应应在 1~20 kHz 之间以 1 kHz 为间隔施加声振动信号后的信噪比。从图 7 可以看到,该传感器可以实现 500 Hz~20 kHz 的宽频率响应,且在中高频波段的振动响应能力较好,输出功率稳定,SNR 在 9 kHz 处达到最大,值为 61.8 dB。

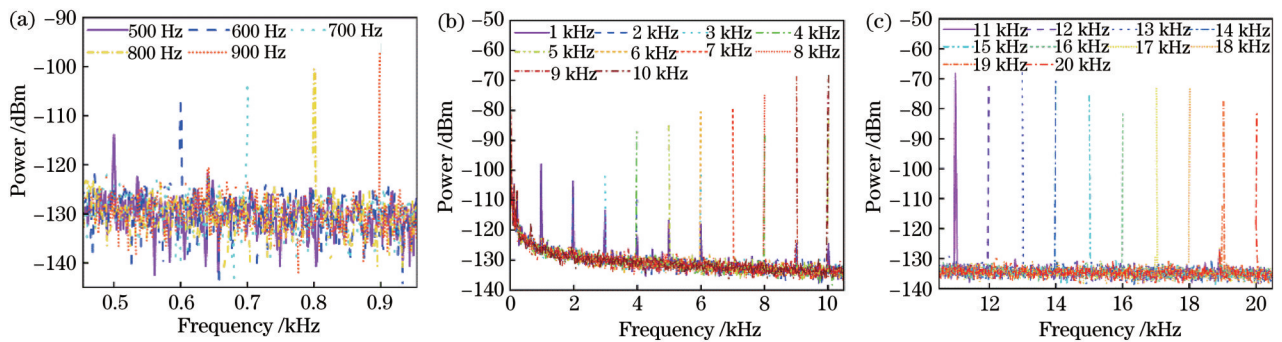


图 7 空气中单频声振动信号的频谱图。(a) 500~900 Hz; (b) 1~10 kHz; (c) 11~19 kHz

Fig. 7 Spectra diagram of single frequency acoustic vibration signal in air. (a) 500~900 Hz; (b) 1~10 kHz; (c) 11~19 kHz

将 FOAS 放到水下进行单频声振动实验,测试方法与空气相同,在 1~20 kHz 之间以 1 kHz 为间隔施加声振动信号后的信噪比如图 8 所示。其中图 8(a) 从左往右依次对应在 1~10 kHz 之间以 1 kHz 为间隔施加声振动信号后的信噪比,图 8(b)

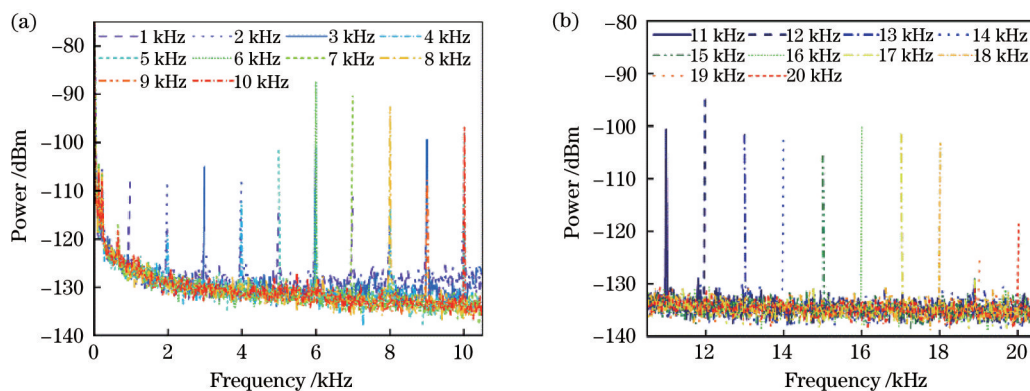


图 8 水下单频声振动信号的频谱图。(a) 1~10 kHz;(b) 11~20 kHz

Fig. 8 Spectra diagram of single frequency acoustic vibration signal under water. (a) 1–10 kHz; (b) 11–20 kHz

5.2 双频声振动测试

为了探究 FOAS 对双频声振动信号的响应能力,在输入光波长为 1550 nm 和入射光功率为 100 μ W 的控制条件下分别在空气中和水下进行测试,结果如图 9 所示。从图 9 可以看到,FOAS 在 13 kHz 和 17 kHz 频率处的响应能力较好;空气中

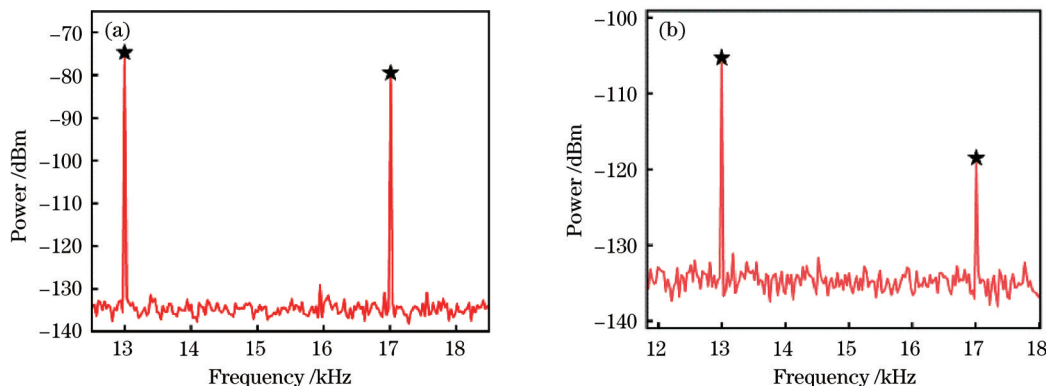


图 9 不同环境下的双频声振动结果。(a)空气;(b)水

Fig. 9 Results of dual-frequency acoustic vibration in different environments. (a) Air; (b) water

5.3 三频声振动测试

保持入射光波长和功率不变,在空气中和水下对 FOAS 同时施加三个频率的声振动信号,实验结果如图 10 所示。其中图 10(a) 为在空气中对 FOAS 同时施加 13, 14, 15 kHz 频率的声振动信号的测试结果,图 10(b) 为在水下对 FOAS 同时施加 11, 15, 18 kHz 频率的声振动信号的测试结果。从图 10 可以看到,施加 13, 14, 15 kHz 频率的声振动

从左往右依次对应在 11~20 kHz 以 1 kHz 为间隔施加声振动信号后的信噪比。从图 8 可以看到,该传感器在水下环境中可以对 1~20 kHz 的声振动信号产生频率响应,并且 SNR 在 6 kHz 处达最大,值为 41.8 dB。

FOAS 在 13 kHz 和 17 kHz 处的 SNR 分别达到 56.8 dB 和 51.4 dB;水下 FOAS 在 13 kHz 和 17 kHz 处的 SNR 分别降至 25.8 dB 和 14.7 dB,这可能是由测试环境的折射率发生变化,以及薄膜表面杂质对声振动信号感知的影响在水下被放大导致的,表明该传感器对外界环境的感知能力较强,响应能力好。

信号的 SNR 分别为 54.4 dB、48.4 dB 和 45.3 dB;施加 11, 15, 18 kHz 频率的声振动信号的 SNR 分别为 52.4 dB、46.4 dB 和 42.6 dB。

综上所述,基于 GO 微腔的光纤多频 FP 声振动传感器能够实现对至少三个频率的多频声振动信号的同时探测,在各个多频组合下均能获得较高的 SNR,而且在中高频波段的响应能力较好,SNR 最高可达 54.4 dB。

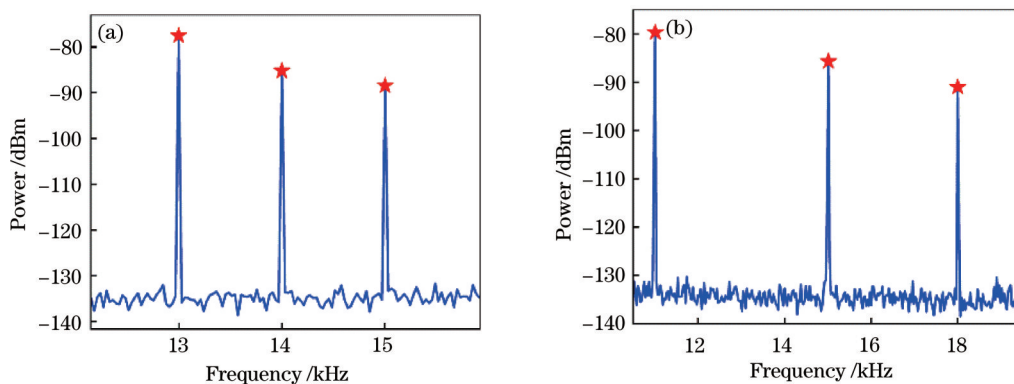


图 10 不同环境下的三频声振动结果。(a)空气;(b)水

Fig. 10 Results of three-frequency acoustic vibration in different environments. (a) Air; (b) water

6 结 论

本文研究一种基于 GO 微腔的光纤多频 FP 声振动传感器,并利用该传感器进行单频和多频声振动传感实验。实验结果表明,该传感器可以实现对单个频率及多个频率声振动信号的良好响应,频率检测范围宽且响应能力好。单频声振动信号测试的 SNR 最高可达 61.8 dB,频率响应范围为 500 Hz~20 kHz。该传感器具有体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰和可同时探测多个声振动信号等优点,适用于对狭小空间中多个声振动信号的同时测量,在管道泄漏检测、结构健康检测和生物医学等领域具有广泛的应用前景。然而,受到声源条件的限制,目前该传感器的频率响应范围有限,但实际上其应该具有更宽的频率响应范围。

参 考 文 献

- [1] Liu B, Zheng G Q, Wang A L, et al. Optical fiber Fabry-Perot acoustic sensors based on corrugated silver diaphragms[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 3874-3881.
- [2] Zhou H Y, Ma G M, Zhang M, et al. A high sensitivity optical fiber interferometer sensor for acoustic emission detection of partial discharge in power transformer[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(1): 24-32.
- [3] Takahashi N, Hirose A, Takahashi S. Underwater acoustic sensor with fiber Bragg grating[J]. Optical Review, 1997, 4(6): 691-694.
- [4] Jiang L, Zhang X Z, Wang J, et al. Real-time online detection of cutter wear based on fiber Bragg grating array[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1206003.
- [5] 蒋磊, 张学智, 王进, 等. 基于光纤布拉格光栅阵列的刀头磨损实时在线检测[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1206003.
- [5] Liu L, Lu P, Liao H, et al. Fiber-optic Michelson interferometric acoustic sensor based on a PP/PET diaphragm[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(9): 3054-3058.
- [6] Zhu W, Li D, Liu J, et al. Membrane-free acoustic sensing based on an optical fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Applied Optics, 2020, 59(6): 1775-1779.
- [7] Hoffman P R, Kuzyk M G. Position determination of an acoustic burst along a Sagnac interferometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(2): 494-498.
- [8] Wang S C, Chen W G. A large-area and nanoscale graphene oxide diaphragm-based extrinsic fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor applied for partial discharge detection in air[J]. Nanomaterials, 2020, 10(11): 385-388.
- [9] Liu Y Y, Liu L, Liu X Q, et al. Sensitivity improvement of Fabry-Perot sensor based on Vernier effect[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0428001.
- [9] 刘燕燕, 刘磊, 刘雪强, 等. 基于 Vernier 效应的法布里-珀罗传感器增敏方法[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0428001.
- [10] Wild G, Hinckley S. Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state-of-the-art[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(7): 1184-1193.
- [11] Guo Z, Gao K, Yang H, et al. 20-mm-diameter interferometric hydrophone towed array based on fiber Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1106003.
- [11] 郭振, 高侃, 杨辉, 等. 外径 20 mm 的光纤光栅干涉型拖曳水听器阵列[J]. 光学学报, 2019, 39(11):

- 1106003.
- [12] Huang S C, Lin W W, Tsai M T, et al. Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 135(2): 570-579.
- [13] Xu M H, Wang L V. Photoacoustic imaging in biomedicine[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(4): 041101.
- [14] Wang S, Lu P, Zhang L, et al. Intensity demodulation-based acoustic sensor using dual fiber Bragg gratings and a titanium film[J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(12): 1033-1038.
- [15] Dong B, Zhang B H, Ng J, et al. Ultrahigh-sensitivity fiber acoustic sensor with a dual cladding modes fiber up-taper interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(21): 2234-2237.
- [16] Qi X G, Wang S, Jiang J F, et al. Flywheel-like diaphragm-based fiber-optic Fabry-Perot frequency tailored acoustic sensor[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(41): 415102.
- [17] Lee C, Wei X, Kysar J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. *Science*, 2008, 321(5887): 385-388.
- [18] Ni W, Lu P, Fu X, et al. Ultrathin graphene diaphragm-based extrinsic Fabry-Perot interferometer for ultra-wideband fiber optic acoustic sensing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20758-20767.
- [19] Todorović D, Matković A, Miličević M, et al. Multilayer graphene condenser microphone[J]. *2D Materials*, 2015, 2(4): 045013.
- [20] Ma J, Jin W, Ho H L, et al. High-sensitivity fiber-tip pressure sensor with graphene diaphragm[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2493-2495.
- [21] Li C. Research on fiber microcavity acoustic sensors based on graphene hybrid film[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 15.
李晨. 石墨烯复合薄膜光纤微腔声波传感器件研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 15.
- [22] Wei T, Han Y K, Tsai H L, et al. Miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(6): 536-538.