

非本征光纤 F-P 干涉声传感器的研究

杨冲, 傅海威, 雍振, 刘颖刚, 李辉栋, 王旗旗, 王帅

(西安石油大学 理学院, 西安 710065)

摘要: 为研究不同材料对法布里-珀罗(F-P)干涉声传感器性能的影响。采用几种不同金属材料, 设计制作了基于光纤端面—膜片非本征型 F-P 干涉声传感器, 利用有限元方法对圆形振动膜片进行模态分析, 得到了一阶固有频率。实验结果表明: 由金、锌合金材料制作的传感器可探测较低声压, 且传感器灵敏度较高、对外界声波信号响应成良好的线性关系。

关键词: 光纤传感器; 法布里-珀罗腔; 声传感器; 金属材料; 圆形膜片

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)02-0028-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.02.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on extrinsic fiber F-P interference acoustic sensor

YANG Chong, FU Haiwei, YONG Zhen, LIU Yinggang, LI Huidong, WANG Qiqi, WANG Shuai

(School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: To study the influence of different materials on Fabry - Perot (F-P) interference acoustic sensor. An extrinsic F-P acoustic sensor based on the structure of fiber end-membrane was fabricated with several different metal diaphragm materials. Besides, the first-order natural frequency was obtained through simulating and analyzing the circular diaphragm using the method of finite element. Experimental results show that the sensor with gold diaphragm and zinc alloys diaphragm exhibit high sensitivity and good linear response property, and which can be detecting lower sound pressure.

Key words: fiber sensor; Fabry-Perot cavity; acoustic sensor; metal material; circular diaphragm

0 引言

光纤法布里-珀罗(F-P)干涉声传感器具有抗强电磁干扰、灵敏度高和探头部分全光信号等特点, 在空气声波检测、水下声波检测以及光声效应测量中的光声信号检测等领域有重要的应用前景。声波振动信号是一种压力波, 传统测量声波信号的传感器大部分都是基于电子元件制作而成^[1], 所以不适合在电磁干扰环境下工作。基于光纤结构的干涉声传感器具有不受外界电磁信号干扰、响应速度快和灵敏度高等优点。近年来, 非本征 F-P 腔结构声探测器的研究得到

了广泛关注。各种材料的振动膜片也被用来制作传感器: 2014 年, Xu Feng 等人报道了基于纳米银膜制作的声传感器^[2]; 2016 年, Wang Shun 等人报道了使用金属加聚合物复合薄膜制作的非本征 F-P 腔结构次声波传感器^[3]; 2017 年, Tan Yanzhen 报道了基于石墨烯薄膜的光声信号气体探测器^[4]; 在 2018 年, Gong Zhenfeng 报道了一种基于聚合物薄膜的非本征 F-P 光声信号探测器^[5]。

非本征 F-P 腔结构的传感器不仅仅运用在声波信号测量方面, 还在微量气体检测^[6,7]、水下监听^[8,9]、声波振动测量和压力^[3,10]等领域被广泛研究, 其结构通常由平整的光纤端面、空腔以及振动敏感膜片组成。对于非本征 F-P 腔膜片式传感器, 振动膜片是影响传感器性能最主要的因素, 膜片对外界声波振动信号的灵敏程度直接影响到传感器的灵敏度。在实际应用中, 随着外界环境的变化需要使用不同响应特性的传感器, 如何选择合适的振动膜片(材料种类、有效直径和厚度等)变得极其重要。使用有限元仿真软件计算可以很好地解决膜片选择问题, 或通过理论计算验证实

收稿日期: 2019-07-24。

基金项目: 陕西省重点研发计划(No. 2019GY-170)资助; 西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划(No. YCS18112033)资助。

作者简介: 杨冲(1996-), 男, 硕士生, 现就读于西安石油大学理学院光学工程专业, 主要研究方向为光纤传感技术, 研究基于光纤制作的传感器, 特别是基于光纤端面—反射膜片制作的声波传感器, 研究此类传感器固有频率下的响应特性。主持校级科研项目 1 项, 参与 2 项陕西省重点研发计划。



验所得结果。近年来,许多种类膜片材料被应用于非本征 F-P 干涉声传感器,如石英^[11]、金属^[2,12]、聚合物^[13-15]以及单层或者多层石墨烯^[4,16,17]等。上述几种材料通常都可被加工成厚度为微米级别的膜片,尤其是石墨烯材料可以制作出纳米级别的膜片。外界微弱的声振动信号非常容易迫使纳米级别厚度的膜片发生形变,使得由此种膜片制作的非本征 F-P 干涉声传感器具有超高灵敏度响应。但同时纳米级别振动膜片通常难以承受较高声压、稳定性较差,其应用范围受限,大批量运用到实际中非常困难。对于同类型材料制作的传感器其性能比较鲜有报道,因此,本文选取常见金属类材料(金、银、铜以及锌合金)作为传感器的膜片,另外使用了微栅碳支持膜作为声传感器的膜片材料,通过实验对比分析不同膜片材料对外界声波振动信号的线性响应度。

1 传感原理

1.1 传感器设计及制作

本文使用有限元模拟仿真软件 Ansys 对拥有一定厚度、直径为 2.5 mm 的圆形膜片进行模态分析,计算得到膜片的固有频率。建模分析主要分为以下几步:①使用画图软件构建 2.5 mm 的圆形膜片模型,导入有限元仿真软件;②选择膜片的材料,输入膜片材料的杨氏模量、密度和泊松比;③给模型划分网格,网格参数设置为默认选项;④设置边界约束条件,对膜片的四周进行固定,最后计算得出膜片的一阶固有频率。通过 Ansys 软件模拟计算可以知道振膜的厚度以及固有频率。

非本征 F-P 干涉声传感器的制作方法主要分为以下几个步骤:①加工内径为 2.5 mm 的金属套管;②光纤陶瓷插芯与金属套管之间的固定;③传感器振动膜片与金属外套管之间的固定;④光纤端面与膜片内表面的对准。传感器的具体制作流程如图 1 所示,首先使用车床加工出金属套管,严格控制其内径为 2.5 mm,然后将内径为 125 μm 左右、外径为 2.5 mm

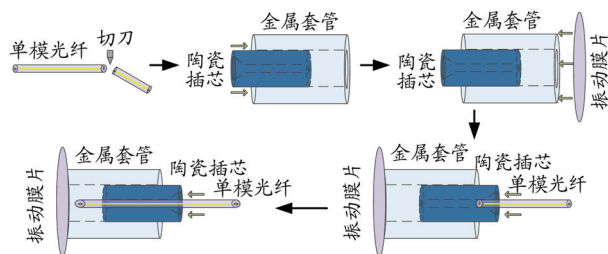
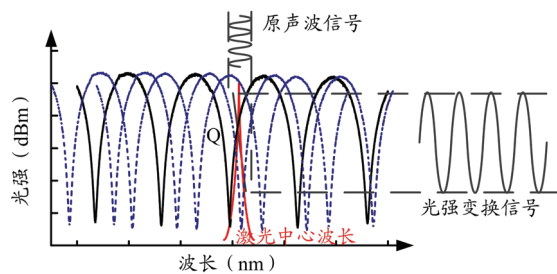


图 1 传感器制作流程示意图

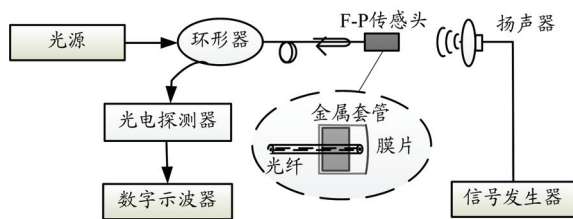
的光纤陶瓷插芯插入金属套管中,保证陶瓷插芯末端与金属管末端平面留有一定距离,使用硅胶固定陶瓷插芯和金属管,等硅胶凝固确保陶瓷插芯与金属管无相对滑动。接着将传感器振动膜片平整地固定在金属套管末端平面。最后将端面平整的单模光纤使用三维可调节架对准陶瓷套管中心,调节光纤端面与膜片内表面的距离。本文使用 SM125 解调仪观察产生的 F-P 干涉,并选择合适的腔长。

1.2 信号解调原理

外界声波压力会使振动膜片产生形变,F-P 腔长随之变化,从而导致干涉谱线的漂移。因为实验系统中激光光源发出的光是一个窄线宽激光,所以膜片形变引起的干涉谱漂移会导致传输至光电探测器的光功率发生强弱变化。通过解调光强变化就能够得到声波信号的信息。为了保证传感器的线性响应,需要将传感器初始工作点控制在线性区域的正交相位点(Q)。此时,传感器输出光强与 F-P 腔长变化具有良好的线性关系,并且传感器灵敏度高、响应快和信号失真度小^[18,19]。传感器工作线性区域及工作 Q 点如图 2(a)所示。基于以上工作原理,本文构建了传感测量系统,如图 2(b)所示。光源(EXFO 公司 FLS-2600B)发出的窄线宽激光经过光纤环形器传输至传感器,在光纤端面和膜片内表面发生干涉。通过信号发生器(Tektronix 公司 AFG3102)给扬声器施加一定频率的正弦信号,调整传感器位置使声压均匀作用到膜片。光纤中的干涉光经过光电探测器(New Focus 公司 2053)放大滤波后输送到数字示波器(Tektronix 公司 TDS1012B-SC)中。通过光电探测器放大的干涉光功率大小变化会变



(a) 传感器正交相位工作 Q 点



(b) 传感测量系统

图 2 传感器正交相位工作 Q 点以及传感测量系统示意图

成电信号强弱变化,接入示波器观测到和函数发生器同频率变化的信号,由此完成了振动信号—光信号—电信号的转变。测量示波器输出信号可以测得外界声波振动信号。

2 传感器响应特性实验研究

本文分析传感器 F-P 干涉光谱图,根据传感头的自由光谱范围,计算 F-P 腔长 L 为^[20,21]:

$$L = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2n(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (1)$$

其中, λ_1 和 λ_2 是传感器干涉光谱在 1550 nm 附近两谷(峰)所对应的波长, n 是 F-P 空气腔的折射率,通常情况下 $n=1$ 。传感器制作完成后,使用 SM125 测量其静态 F-P 干涉谱数据。本文使用绘图软件,在 1500 nm 附近测量干涉谱峰值 3 dB 点所对应的波长,将其作为激光光源的中心波长。不同薄膜材料传感器的自由谱范围、F-P 腔长和在 1550 nm 附近正交相位工作 Q 点如表 1 所示。

表 1 不同薄膜材料传感器的自由谱范围、F-P 腔长以及正交相位工作 Q 点对比表

薄膜材料	自由谱范围	F-P 腔长	工作 Q 点
金	5.665 nm	213 μm	1551.6 nm
银	6.495 nm	186 μm	1550.7 nm
铜	5.155 nm	233 μm	1550.5 nm
锌合金	6.799 nm	176 μm	1550.0 nm
微栅碳支持膜	13.310 nm	91 μm	1552.5 nm

调节激光器使得窄线宽激光光源的中心波长在 1550 nm 处,本文通过光功率计测得进入到光纤环形器端口的光功率为 417 μW ,进入到传感器的功率为 36 μW ,最终输送至光电探测器的光功率只有 1 μW 左右。光电探测器低通滤波范围选择为 1 kHz。测试传感器频率响应过程如下:改变信号发生器的正弦信号频率,实验测得金薄膜制作的传感器在 500 Hz 左右声波信号驱动下有规则的正弦信号;给传感器施加一个 500 Hz 的正弦信号,通过改变信号发生器的电压信号测得传感器的响应。金薄膜制作的传感器干涉光谱图、驱动信号为 500 Hz 时传感器的响应图、快速傅里叶变换(FFT)之后 500 Hz 下的功率密度图、声波信号和探测信号的线性拟合图如图 3 所示。从图 3(b)、图 3(d)可知,当信号发生器的电压幅值从 20 mV 以步长为 10 mV 的变化增加至 80 mV 时,通过示波器测得传感器的响应,其响应线性度为 0.99862。从图 3(c)可

知,在 500 Hz 的驱动信号下,经过 FFT 的功率密度图谱信噪比为 37.5 dB。

本文对银薄膜、铜薄膜、锌合金薄膜和微栅碳支持膜所制作的传感器进行同样的分析,结果分别如图 4、图 5、图 6 和图 7 所示。从图 4(b)、图 4(d)可知,对于银薄膜传感器,当信号发生器的电压幅值从 50 mV 以步长为 10 mV 的变化增加至 110 mV 时,通过示波器测得传感器的响应,其响应线性度为 0.99253。从图 4(c)可知,在 500 Hz 的驱动信号下,经过 FFT 的功率密度图谱信噪比为 42.7 dB。

从图 5(b)、图 5(d)可知,对于铜薄膜传感器,当信号发生器的电压幅值从 100 mV 以步长为 10 mV 的变化增加至 160 mV 时,通过示波器测得传感器的响应,其响应线性度为 0.99009。从图 5(c)可知,在

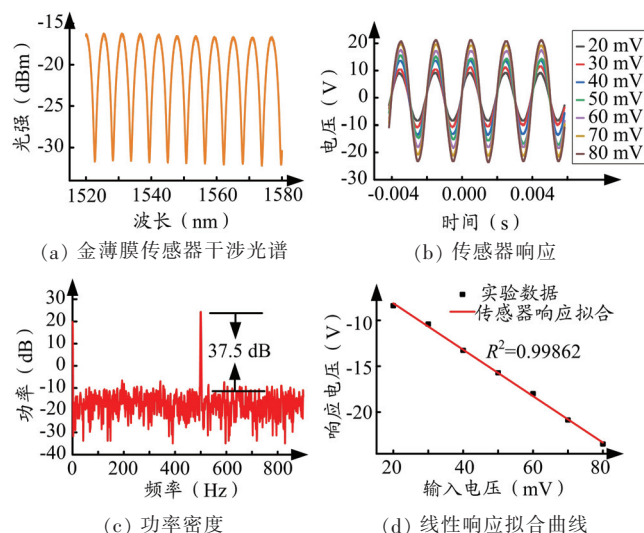


图 3 金薄膜传感器干涉光谱图、传感器响应图、功率密度图和线性响应拟合曲线

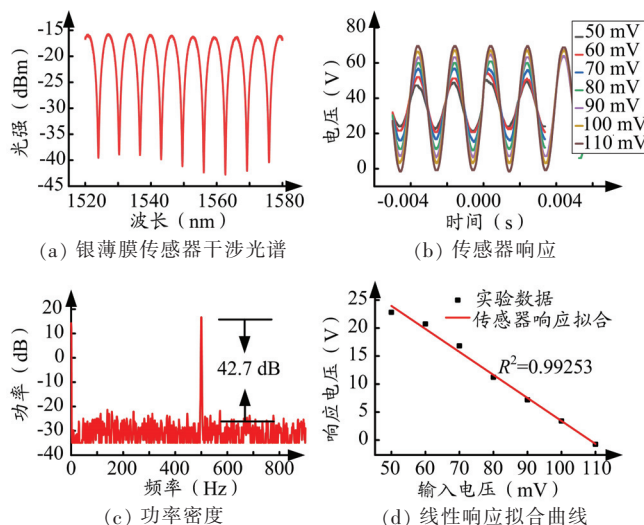


图 4 银薄膜传感器干涉光谱图、传感器响应图、功率密度图和线性响应拟合曲线

500 Hz 的驱动信号下,经过 FFT 的功率密度图谱信噪比为 38.9 dB。

从图 6(b)、图 6(d)可知,对于锌合金薄膜传感器,当信号发生器的电压幅值从 20 mV 以步长为 5 mV 的变化增加至 50 mV 时,通过示波器测得传感器的响应,其响应线性度为 0.98992。从图 6(c)可知,在 500 Hz 的驱动信号下,经过 FFT 的功率密度图谱信噪比为 44.8 dB。

从图 7(b)、图 7(d)可知,对于微栅碳支持膜,当信号发生器的电压幅值从 200 mV 以步长为 100 mV 的变化增加至 800 mV,通过示波器测得传感器的响应,其响应线性度为 0.99160。从图 7(c)可知,在 16.7 kHz 的驱动信号下,经过 FFT 的功率密度图谱信噪比为 44.8 dB。

对比图 3~图 7 中的(b)图可知,金、银、铜、锌合金

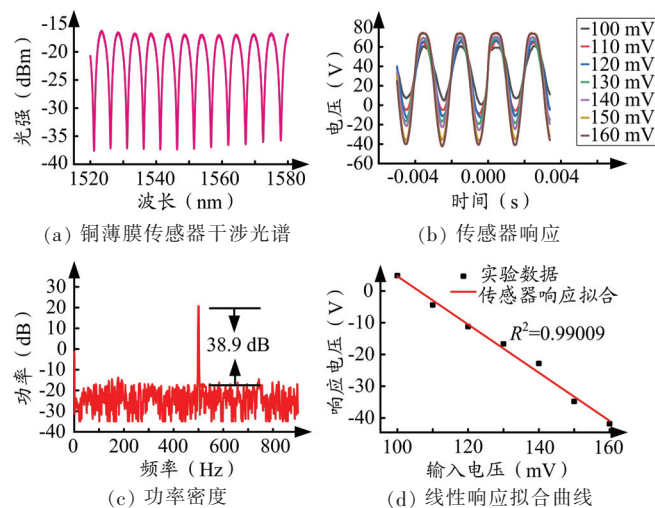


图 5 铜薄膜传感器干涉光谱图、传感器响应图、功率密度图和线性响应拟合曲线

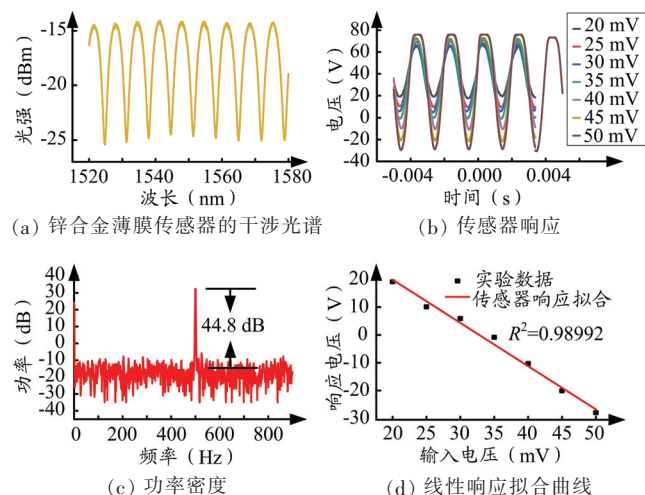


图 6 锌合金薄膜传感器的干涉光谱图、传感器响应图、功率密度图和线性响应拟合曲线

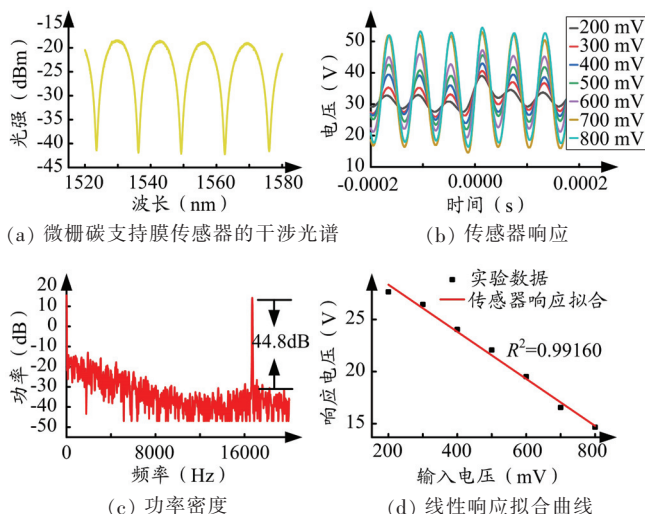


图 7 微栅碳支持膜传感器的干涉光谱图、传感器响应图、功率密度图和线性响应拟合曲线

和微栅碳支持膜出现相对规整正弦波的最低驱动电压分别为 20 mV、50 mV、100 mV、20 mV 和 200 mV,微栅碳支持膜最低驱动电压明显较大。由传感器原理可知,传感器的频响范围一般为固有频率的三分之一左右,固有频率越高对应的频响范围也越大。图 7(c)中微栅碳支持膜固有频率为 16700 Hz,远大于 500 Hz,理论上也具有更大的频响范围。本文对金、银、铜薄膜进行仿真计算,输入材料参数,使用有限元方法计算拥有一定厚度、直径为 2.5 mm 圆形膜片的一阶固有频率。金、银和铜材料参数(杨氏模量、密度以及泊松比)如表 2 所示,不同厚度下金、银、铜的一阶固有频率如表 3 所示。通过计算可得厚度为 0.7 μm 、直径为 2.5 mm 的金薄膜的一阶固有频率为 475.33 Hz;模型的厚度增加为 0.8 μm 时,其一阶固有频率为 542.58 Hz。改变膜

表 2 金、银和铜材料参数

薄膜材料	杨氏模量	密度	泊松比
金	7.95×10^{11} dyne/cm ²	19.32 g/cm ³	0.42
银	7.32×10^{11} dyne/cm ²	10.49 g/cm ³	0.38
铜	1.23×10^{12} dyne/cm ²	8.96 g/cm ³	0.34

表 3 不同厚度下金、银和铜的一阶固有频率

薄膜厚度	一阶固有频率		
	金	银	铜
0.4 μm	—	—	476.18 Hz
0.5 μm	—	433.08 Hz	593.19 Hz
0.6 μm	—	519.81 Hz	—
0.7 μm	475.33 Hz	—	—
0.8 μm	542.58 Hz	—	—

杨冲,傅海威,雍振,等:非本征光纤 F-P 干涉声传感器的研究

片材料的参数,对银薄膜制作的传感器厚度为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 、直径为 2.5 mm 时,其一阶固有频率为 433.08 Hz ;厚度增加到 $0.6\text{ }\mu\text{m}$ 时,一阶固有频率为 519.81 Hz 。对铜薄膜制作的传感器厚度为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 、直径为 2.5 mm 时,其一阶固有频率为 476.18 Hz 左右;厚度增加到 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 时,一阶固有频率为 593.19 Hz 。实验中测得金、银和铜薄膜固有频率都在 500 Hz 左右,对比理论计算结果可知金薄膜厚度在 $0.7\sim 0.8\text{ }\mu\text{m}$ 之间,银薄膜厚度在 $0.5\sim 0.6\text{ }\mu\text{m}$ 之间,铜薄膜厚度在 $0.4\sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 之间。

3 结束语

本文制作了 5 种不同材料的膜片式非本征 F-P 干涉声传感器,薄膜材料包含金、银、铜、锌合金和微栅碳支持膜。传感器的膜片有效直径都控制在 2.5 mm 。实验测得微栅碳支持膜一阶固有频率在 16700 Hz 左右,金、银、铜和锌合金薄膜制作的干涉声传感器一阶固有频率都在 500 Hz 左右。实验结果表明:由金、锌合金材料制作的传感器可探测的声压低于其余 3 种材料,即传感器灵敏度比较高。在 500 Hz 的一阶固有频率下通过有限元模拟计算可得金、银、铜的大概厚度,分别为 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.6\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。尝试使用微栅碳支持膜作为传感器的新型膜片材料,传感器驱动信号电压明显较高,但其一阶固有频率也相对较大,使得微栅碳支持膜在理论上具有更大的频响范围。以上 5 种材料所制作的传感器在实验中通过使用 F-P 腔光强度解调的方式测得传感器对外界声波振动信号具有良好的线性响应。此外,这些传感器的结构简单,成本低廉,在声波振动领域中有良好的应用潜力。

参考文献:

- [1] 刘小玲,罗荣辉,张操,等.基于光声光谱法气体探测传感器的研究进展[J].电子与封装,2011(2):34-38.
- [2] XU F, SHI J, GONG K, et al. Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaphragm [J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2838.
- [3] WANG Sun, LU Ping, LIU Li, et al. An Infrasound Sensor Based on Extrinsic Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer Structure [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(11): 1-1.
- [4] TANY, ZHANG C, JIN W, et al. Optical fiber photoacoustic gas sensor with graphene nano-mechanical resonator as the acoustic detector [J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2016, 23(2): 199-209.
- [5] GONG Z, ZHOU X, CHEN K, et al. Parylene-C diaphragm-based fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor for trace gas detection [C]//2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Optical Sensors and Applications, October 28-30, 2017, Beijing, China. California: SPIE, 2018.
- [6] GONG Z, CHEN K, YANG Y, et al. Photoacoustic spectroscopy based multi-gas detection using high-sensitivity fiber-optic low-frequency acoustic sensor [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 260: 357-363.
- [7] MAOX, ZHOU X, GONG Z, et al. An all-optical photoacoustic spectrometer for multi-gas analysis[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 232: 251-256.
- [8] BEARD P C, MILLS T N. Miniature optical fibre ultrasonic hydrophone using a Fabry-Perot polymer film interferometer [J]. Electronics Letters, 1997, 33(9): 801-803.
- [9] JIA P G, KE D, WANG D H, et al. Measurement of high-intensity focused ultrasound fields using miniaturized all-silica fiber-optic Fabry-Perot hydrophones [C]//Advanced Sensor Systems and Applications VI, October 9-11, 2014, Beijing, China. California: SPIE, 2014.
- [10] YU Q, ZHOU X. Pressure sensor based on the fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(1): 72-83.
- [11] YU B, KIM D W, DENG J, et al. Fiber Fabry-Perot Sensors for Detection of Partial Discharges in Power Transformers [J]. Applied Optics, 2003, 42(16): 3241-3250.
- [12] XU F, REN D, SHI X, et al. High-sensitivity Fabry - Perot interferometric pressure sensor based on a nanothick silver diaphragm [J]. Optics letters, 2012, 37(2): 133-135.
- [13] EOM J, PARK C J, LEE B H, et al. Fiber optic Fabry - Perot pressure sensor based on lensed fiber and polymeric diaphragm [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 225: 25-32.
- [14] CAO Y, JIN W, HO H L, et al. Miniature fiber-tip photoacoustic spectrometer for trace gas detection [J]. Optics Letters, 2013, 38 (4): 434-436.
- [15] WANG Z, ZHANG W, LI F. Diaphragm-based fiber optic Fabry-Perot hydrophone with hydrostatic pressure compensation[C]//Fourth Asia Pacific Optical Sensors Conference, October 15 -18, 2013, Wuhan, China. California: SPIE, 2013.
- [16] AI-MASHAAL A K, WOOD G S, TORIN A, et al. Tunable graphene-polymer resonators for audio frequency sensing applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 19(2): 465-473.
- [17] 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.
- [18] 程进,邹小平.光纤法珀腔声传感器理论与仿真分析研究[J].传感技术学报,2018,31(11):17-24
- [19] 王巧云.光纤法布里—珀罗声波传感器及其应用研究 [D].大连:大连理工大学,2010.
- [20] MURI H I, BANO A, HJELME D R. A Single-Point, Multiparameter, Fiber Optic Sensor Based on a Combination of Interferometry and LSPR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 1159-1167.
- [21] LIU Y, YANG D, WANG Y, et al. Fabrication of dual-parameter fiber-optic sensor by cascading FBG with FPI for simultaneous measurement of temperature and gas pressure [J]. Optics Communications, 2019, 443: 166-171.