引用本文:丁伟,傅海威,王跃凯,等. 非本征型法布里-珀罗光纤声学传感器结构与材料研究进展[J]. 光通信技术,2026,50(5):51-60.

非本征型法布里-珀罗光纤声学传感器结构与材料研究进展

丁 伟,傅海威*,王跃凯,宗 超,张 涵,何雪非
(西安石油大学 理学院,西安 710065)

摘要:为分析非本征型法布里-珀罗干涉仪(EFPI)光纤声学传感器中膜片材料与结构对传感性能的影响规律,并为其优化设计提供参考,综述了基于EFPI的光纤声学传感器的结构与材料研究进展。首先,介绍了EFPI光纤声学传感器的基本原理,然后,从膜片材料和膜片结构2个方面系统梳理国内外EFPI光纤声学传感器的研究现状,对比分析硅基、金属、聚合物、二维等材料及平膜、波纹膜、台面膜、梁-膜等结构的性能优势与适用场景,总结不同设计对灵敏度、带宽、线性度及动态范围的影响。最后,展望了EFPI光纤声学传感器的发展趋势。

关键词:非本征型法布里-珀罗干涉仪;光纤声学传感器;膜片材料;膜片结构;声学传感
中图分类号:TN253　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1002-5561(2026)05-0051-010
DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.05.009

Research progress on the structure and materials of non intrinsic Fabry-Perot fiber optic acoustic sensors

DING Wei,FU Haiwei*,WANG Yuekai,ZONG Chao,ZHANG Han,HE Xuefei
(School of Science,Xi'an Shiyou University,Xi'an 710065,China)

Abstract: To analyze the influence of diaphragm materials and structures on the sensing performance of extrinsic Fabry-Perot interferometer(EFPI) fiber optic acoustic sensors and to provide a reference for their optimal design,the research progress on the structures and materials of EFPI-based fiber optic acoustic sensors is reviewed. This paper reviews the research progress on the structures and materials of fiber optic acoustic wave sensors based on EFPI. First,the basic principles of EFPI fiber-optic acoustic sensors are introduced. Then,the current research status of EFPI fiber-optic acoustic sensors at home and abroad is systematically reviewed from two aspects: diaphragm materials and diaphragm structures. The performance advantages and applicable scenarios of materials such as silicon-based,metal,polymer,and two-dimensional materials,as well as structures such as flat diaphragms,corrugated diaphragms,mesa diaphragms,and beam-diaphragm structures,are comparatively analyzed. The effects of different designs on sensitivity,bandwidth,linearity,and dynamic range are summarized. Finally,the development trends of EFPI fiber optic acoustic sensors are discussed.

Key words:non intrinsic Fabry-Perot interferometer,fiber optic acoustic sensor,membrane material,membrane structure,acoustic sensing

0 引言

声学传感器是实现声学检测的核心器件,主要应用于环境监测、结构健康检测[1]、痕量气体检测[2-3]、医学光声成像[4-5]和地震物理模型成像[6]等领域。传统电声传感器主要基于压电式、压阻式[7-8]和电容式[9-10]原理,目前在声学检测领域仍占据主导地位。然而,电声传感器不适用于强电磁干扰、易燃易爆等特殊环境,通常需要毫米到厘米级的大元件尺寸才能实现高声学灵敏度,这极大地限制了它们在狭窄空间传感场景中的应用。相比之下,光纤声学传感器凭借抗电磁干扰能力强、灵敏度高、尺寸紧凑等优势,获得了广泛研究。根据不同的声敏感原理,光纤声学传感器可分为光学微谐振腔型[11]、光纤光栅型[12-13]和光纤干涉仪型[14-17]。其中,光学微谐振腔型和光纤光栅型声学传

收稿日期:2025-03-10。
基金项目:陕西省重点研发计划项目(2019GY—176)资助。

作者简介:丁伟(1997—),男,硕士研究生,江苏南通人,现就读于西安石油大学理学院光学工程专业,主要从事光纤声学传感方面的研究工作,曾获第十一届全国大学生光电设计竞赛西北区赛二等奖。
***通信作者:**傅海威(1966—),男,博士,教授,主要研究方向为光电子学及光纤传感技术。



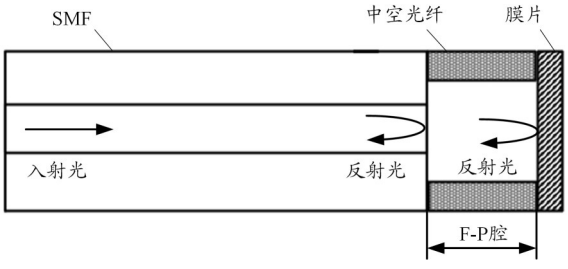
感器的制备成本较高、加工难度大;而以迈克耳孙干涉、萨尼亚克干涉和马赫-曾德尔干涉为基础的光纤声学传感器多为长臂结构,难以进一步小型化。

非本征型法布里-珀罗干涉仪(EFPI)光纤声学传感器因兼具结构简单、体积小巧、易于复用及绝对测量等优势,有效克服了上述局限,已成为当前光纤声学传感领域关注的焦点。鉴于此,本文对EFPI光纤声学传感器结构与材料的研究进展进行综述,旨在为高性能EFPI光纤声学传感器的设计与优化提供参考。

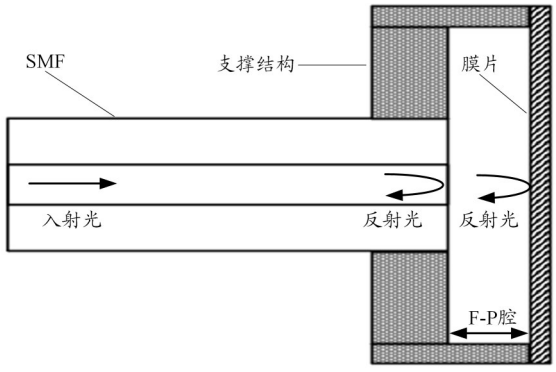
1 EFPI光纤声学传感器基本原理

EFPI光纤声学传感器结构[18]按膜片尺寸与光纤的关系可分为2类:膜片尺寸与光纤相同或相近时称为光纤尖端结构,膜片尺寸大于光纤时称为光纤末端结构。2类结构示意图如图1所示,可以看出,光纤端面与膜片分别构成F-P腔的2个反射面,腔内通常为空气或其他透明介质。光从光纤端面射出时,由于折射率差,出射光在光纤端面—空气界面和空气—膜片界面分别发生菲涅尔反射,2束反射光耦合回单模光纤(SMF)纤芯后发生干涉。

在EFPI声学传感中,EFPI光纤声学传感器的性能并非仅由法布里-珀罗(F-P)干涉原理或膜片小挠度模型决定,还会受到声、机、热、光多物理场耦合下的特殊物理限制。膜片振动时,腔内薄空气层形成挤压膜阻尼,低频下空气可充分排出,阻尼与动态刚度有限,高频下气体来不及响应,等效阻尼和附加刚度迅速增大,导致高频灵敏度下降;膜片及周围空气的热平衡状态会引起随机振动,形成热机械噪声,在谐振频率附近被放大,决定了传感器可达到的最小可检测声压;声压增大后,膜片被拉伸绷紧、刚度变大,位移不再与声压成正比,进而产生谐波失真和互调失真,影响解调线性度与动态范围[19-22]。因此,设计时需综合权衡上述因素,以确定膜片材料与结构参数的最优组合。



(a) 光纤尖端结构



(b) 光纤末端结构

图1 EFPI光纤声学传感器结构示意图

2 基于不同膜片材料的EFPI光纤声学传感器

EFPI光纤声学传感器的核心部件是压敏膜片。膜片一方面作为光学元件与光纤端面构成F-P腔,另一方面作为声压敏感元件,将入射声压转化为F-P腔反射光信号的变化。通过选择合适的压敏膜片材料,EFPI光纤声学传感器不仅可以实现高灵敏度,还可满足从次声(<20 Hz)到超声(>20 kHz)的超宽频率范围的应用。根据不同的膜片材料,压敏膜片可分为硅基材料膜片[23-28]、金属材料膜片[29-37]、聚合物材料膜片[38-47]和二维材料膜片[48-53]。

2.1 硅基材料膜片

硅、二氧化硅和氮化硅是微机电系统(MEMS)技术常用的材料,基于硅基材料膜片的光纤F-P声学传感器常采用图1中的结构。通过MEMS光刻工艺可实现膜片厚度和半径的精确控制,还可在硅膜片上加工二维周期性孔阵列得到平板光子晶体,提高膜片的机械灵敏度。

对于平板光子晶体,斯坦福大学的Kilic O等人[23]提出了一种基于硅光子晶体的光纤F-P声学传感器,其在空气中频率响应至少可达50 kHz,最小可探测压力为18 μPa/Hz$^{1/2}$。该方案的优势在于硅基MEMS工艺成熟、光刻精度高,且二维周期性孔阵列可降低等效刚度、提高机械灵敏度,因此更适合较高频段的声波检测。然而,硅膜片厚度通常处于微米级(几微米~几十微米),难以获得高偏转灵敏度;此外,虽然平板光子晶体性能优异,但二维周期孔阵列加工效率低且成本较高。

对于氮化硅材料,Fu Xin等人[24]采用1 μm厚氮化硅和500 nm厚钛组成的复合膜,通过D形陶瓷插芯实现开腔结构以平衡腔内外的环境压力,传感器可承受25 MPa的水压,平坦频率响应范围为0.5~250 Hz,灵敏

度波动为0.8 dB。丁武成等人[26]进一步采用MEMS工艺制作了50 nm厚的氮化硅方形膜片,研制出的EFPI光纤声学传感器的频率响应范围为1~20 kHz,在共振频率16.5 kHz下的声压灵敏度为60.175 mV/Pa,最小可探测压力为2.57 μPa/Hz$^{1/2}$。与硅相比,氮化硅更易加工出超薄、低应力且与MEMS工艺兼容的膜片,从而可在低声压和低频段获得更高偏转灵敏度。因此,低频、微弱声压、水声或耐压环境更倾向选择氮化硅或氮化硅复合膜。然而,对于纳米级氮化硅膜片,其残余应力控制、均匀性、转移与封装可靠性、线性响应范围以及长期稳定性都更难保证,且超薄化通常会降低共振频率,限制高频带宽。

对于二氧化硅和石英材料。鞠玲等人[25]设计了一种基于二氧化硅膜片的光纤F-P超声传感器,压敏膜片为经研磨工艺减薄的单模光纤切片,膜片直径为5 μm、厚度为30.27 μm,频率响应范围为20~80 kHz,灵敏度为0.0424 nm/Pa,声信号检测信噪比大于25 dB。为满足工程要求,Wang Jinlong等人[27]提出了采用石英膜片的EFPI光纤声学传感器用于检测局部放电超声信号,石英膜片厚度为20 μm、有效约束半径为0.9 mm,检测带宽为9 kHz,静压灵敏度为0.203 nm/Pa,在66 kHz谐振频率下能有效检测局部放电超声信号,定位误差小于5 mm。二氧化硅和石英的优势在于与光纤材料兼容、研磨或熔接工艺相对简单,适合中高频超声和局部放电检测;但其膜片厚度仍为数十微米级,弯曲刚度较大,偏转灵敏度提升空间有限。因此,二氧化硅和石英材料膜片更适合对工艺兼容性和工程可靠性要求较高,而对极限灵敏度和超低频响应要求相对缓和的场景。

2.2 金属材料膜片

金属具有良好的延展性和高反射率,利用MEMS技术可制造出具有良好机械性能和光学性能的超薄金属膜片。EFPI光纤声学传感器中常见的金属材料膜片有银膜[29-30]、金膜[31-32]、镍膜[33-34]、铝膜[35]和复合金属膜[36-37]等。

银膜具有高反射率,其沉积或转移工艺相对成熟,并可通过超薄化降低弯曲刚度。Guo Fawei等人[29]利用真空热沉积制备了厚度为300 nm、直径为75 μm的银膜片,以此制作的传感器静压灵敏度为1.6 nm/kPa,谐振频率为1.44 MHz。Liu Bin等人[30]采用光刻和湿法转移工艺制作了厚度为160 nm、直径为2.4 mm的大面积银膜EFPI光纤声学传感器,灵敏度为0.58 mV/mPa,平坦频率响应范围为0.2~2.8 kHz,最小可探测声压为83.7 μPa/Hz$^{1/2}$。对于高频超声或对反射率要求较高的场景可使用银膜,但银易氧化,长期暴露时其反射率和机械性能可能退化。

金膜的化学惰性高、抗氧化能力强,适合长期稳定检测及较恶劣环境。Huang Qiangqiang等人[31]采用厚度为100 nm的金膜片制作了EFPI光纤声学传感器,其在0.2~2.0 kHz平坦频率响应范围内的声压灵敏度为35.0 mV/Pa,最小可探测声压为1.3 mPa/Hz$^{1/2}$。Tong Yuanbiao等人[32]使用厚度为8 nm的单晶二维金片(2DGF)制作传感膜片,得益于2DGF的超薄厚度和高反射率,EFPI光纤声学传感器灵敏度高达300 mV/Pa,最小可探测声压为62.8 μPa/Hz$^{1/2}$。金膜可以获得更好的化学稳定性和长期可靠性,但金与二氧化硅等介质之间的粘附性、热膨胀系数不匹配且成本较高。2DGF虽能显著提高灵敏度,但其制备、转移和封装难度也更高。

镍膜具有较好延展性、耐腐蚀性和机械稳定性,适用于低频、次声和工程环境检测。Hu Xinyu等人[33]利用镍膜片制作了一种EFPI光纤麦克风用于低频环境噪声检测,镍膜片直径为25.4 mm、厚度为5 μm,平坦频率响应范围为10~2 000 Hz,在100 Hz下的灵敏度为462 mV/Pa,1 000 Hz下的最小可探测压力为2.23 mPa/Hz$^{1/2}$。Hu Xinyu等人[34]还采用镍膜片制备了一种EFPI光纤次声传感器,并基于浮空器平台实现高空低频声音检测测试,其平坦频率响应范围为1.5~20 Hz,在1 Hz下的灵敏度为154 mV/Pa。但镍膜较厚时的弯曲刚度较高,高频响应和极限灵敏度会受到限制。为降低成本、调节应力、反射率和机械性能,常使用铝膜[35]和复合金属膜[36-37],但其界面应力和长期稳定性也需评估。

2.3 聚合物材料膜片

聚合物材料的杨氏模量低且价格低廉,因此十分适合制作高灵敏度EFPI光纤声学传感器的膜片。目前,聚合物材料膜片主要包括聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)膜[38-39]、壳聚糖膜[40-41]、硅橡胶膜[42]、聚酰亚胺(PI)膜及Au/PI复合膜[43-44]、水凝胶膜[45]和紫外光(UV)固化胶膜[46-47]等。

PET膜及PET/金属复合膜适用于水声及低频次声检测。Beard P C等人[38]提出了一种基于PET膜片的超声光纤水听器,PET膜片厚度为50 μm,传感器灵敏度为114 mV/MPa。PET成本低、易加工,但膜太厚导致弯曲刚度较大,不利于对微弱高频声信号的响应。为改善反射与解调信号质量,Wang Shun等人[39]提出了

一种EFPI光纤次声传感器,其压敏膜片由3 μm厚的小圆形铝箔和50 μm厚的PET薄膜组成,采用斜边强度解调方法对低频次声干扰信号进行恢复,可低失真地检测到1~20 Hz的低频次声信号,灵敏度为121 mV/Pa。

壳聚糖膜可通过溶液旋涂形成亚微米级超薄膜,且亲水性有利于水下声耦合。Li Cheng等人[40]通过在毛细管端面旋涂壳聚糖膜,制作了一种光纤F-P水下超声传感器,壳聚糖膜直径为50 μm,厚度为955 nm,声压灵敏度为52.6 mV/kPa,最小可探测声压为2.37 mPa/Hz$^{1/2}$。但壳聚糖易溶胀、降解,长期水下稳定性仍依赖封装保护。

硅橡胶膜具有高折射率、低杨氏模量和高机械强度等特点,已广泛应用于压力和温度光纤传感器。Chen Yongzhang等人[42]提出一种基于硅橡胶隔膜的EFPI声学传感器。其F-P腔由光纤端面和硅橡胶膜形成,硅橡胶膜可以通过简单的旋涂方法轻松制备,成本低廉,适合大规模生产。该传感器具有较高的声压灵敏度,1.5 kHz时的灵敏度和信噪比分别高达387 mV/Pa和48 dB,最小可探测声压为463 μPa/Hz$^{1/2}$。由于带有硅橡胶隔膜的EFPI声学传感器的优异特性,它在光声光谱、弱声学检测或生物应用中具有潜在的应用,但硅橡胶的粘弹性、蠕变和温度稳定性可能限制其高频响应和长期可靠性。

PI膜及Au/PI复合膜耐高温、耐腐蚀。Zhu Zekun等人[43]通过在PI膜(厚15 μm)表面采用物理气相沉积(PVD)方法沉积一层致密金膜(厚为400 nm),制作了基于Au/PI复合薄膜的新型F-P光纤麦克风,其平坦频率响应范围为0.2~10 kHz,最大信噪比为76 dB,灵敏度为170 mV/Pa。但PI膜本身反射率较低,因此需镀金膜提高反射率,更适合音频和低频空气声检测。为降低界面应力、改善声阻抗匹配并提高封装一致性,从而在局部放电检测中获得宽频高灵敏响应,Chen Zongyu等人[44]提出了一种全聚合物微腔光纤声传感器用于检测电力设备局部放电信号,该传感器采用PI传感膜、聚合物盖和聚合物套圈的全聚合物三明治夹层结构,具有较低的杨氏模量和较小的尺寸,频率响应范围为68 Hz~524 kHz,平坦频率响应范围为10~200 kHz,在25 kHz时的灵敏度为20.99 V/Pa,最小可探测声压为34.1 μPa/Hz$^{1/2}$。

水凝胶膜可进一步提高灵敏度。为满足高灵敏、小尺寸和生物医学相关检测,Lieber P H等人[45]提出了一种基于水凝胶膜的高灵敏度小型F-P光纤麦克风,水凝胶膜直径和厚度分别为75 μm和24 μm,传感器直径仅为125 μm、长度为170 μm;当采用80%浓度的水凝胶膜时,频率响应范围为100 Hz~10 kHz,灵敏度为410 mV/Pa,在400 Hz下的最小可探测压力为44.37 μPa/Hz$^{1/2}$。但水凝胶易失水、溶胀,温湿稳定性较差,长期可靠性仍需改进。

Liu Li等人[47]提出了一种基于UV粘合膜片的EFPI光纤声学传感器,用于甚低频声学传感。传感膜片由UV粘合剂溶液的表面张力形成,在1 Hz~20 kHz范围内表现出良好的声学响应。传感器在1 000 Hz时的灵敏度为57.3 mV/Pa,在1~2 000 Hz范围内表现出平坦的频率响应,波动较小,约为±1.5 dB。其噪声限制可检测压力在10 kHz时为52.4 μPa/Hz$^{1/2}$,在1~20 Hz范围内为11.2 mPa/Hz$^{1/2}$。该EFPI光纤声学传感器可作为高灵敏度、极低频声传感器用于地震声音检测,但其性能受膜老化、膜厚一致性和低频噪声限制较大。

2.4 二维材料膜片

二维材料具有原子级厚度和优异的力学性能,作为膜片可显著降低弯曲刚度、提高机械灵敏度,因而适用于EFPI光纤声学传感器。目前,二维材料膜片主要包括石墨烯膜[48-50]、氧化石墨烯膜[48,51]以及二硫化钼等过渡金属硫化物膜[52-53]。

石墨烯单层厚度约为0.335 nm,杨氏模量高达1 TPa,具有极强的弹性,因而机械性能优异。使用纳米厚度的石墨烯、二硫化钼[53]等二维材料膜片可以显著提升EFPI光纤声学传感器的性能。

氧化石墨烯材料可溶液加工、浸涂且含氧官能团有利于成膜和功能化。为此,Monteiro C S等人[48]提出了一种基于氧化石墨烯膜片的光纤F-P超声传感器,由浸涂法在二氧化硅毛细管端面上制得直径为150 μm、厚度为40 nm的氧化石墨烯薄膜,该传感器的频率响应范围为20~100 kHz,信噪比为32.7 dB,最小可探测声压为478 μPa/Hz$^{1/2}$。Wang Yangfeng等人[51]提出了一种基于氧化石墨烯薄膜的EFPI光纤声学传感器用于收集人体呼吸信号,通过在铜箔上干燥氧化石墨烯溶液并蚀刻铜箔制备了氧化石墨烯薄膜,所制作的EFPI声学传感器的平坦频率响应范围为100 Hz~5 kHz,声压灵敏度为0.185 V/Pa,平均相位灵敏度为132.05 dB re 1 rad/μPa。但氧化石墨烯缺陷较多、厚度均匀性和残余应力控制较难,长期稳定性也不如高结晶石墨烯。

采用化学气相沉积(CVD)方法制备的CVD石墨烯及多层单晶石墨烯结晶质量高、弯曲刚度低、噪声

检测阈值低。Liu Yang等人[49]设计了一种基于石墨烯膜片的EFPI光纤声学传感器,通过径向扩大F-P腔来降低空气阻尼,从而显著提高了传感器的机械灵敏度,机械灵敏度可达187.32 nm/Pa,频率响应范围为0.5~18 kHz,最小可探测声压为94.35 μPa/Hz$^{1/2}$。相较于CVD石墨烯,多层单晶石墨烯的模量高,刚度低还可提高膜片完整性,因此,Guo Xing等人[50]提出了基于多层单晶石墨烯薄膜的EFPI光纤声学传感器,制备的CVD膜片直径为1 100 μm、厚度为48 nm,该传感器在6 kHz时的信噪比高达53.92 dB。但层数增加会牺牲部分柔度,且CVD制备、转移和图形化成本较高。而基于石墨烯-有机玻璃(PMMA)复合薄膜的EFPI光纤声学传感器,其采用CVD方法制备的膜片直径为1 100 μm、厚度为58 nm,其灵敏度为29.23 V/Pa,最小可探测声压为47 μPa/Hz$^{1/2}$。选择PMMA作为复合支撑层而非纯石墨烯,主要是因为PMMA成膜性好、可改善膜片的转移、封装和抗破裂能力,从而提高器件可靠性;而与多层单晶石墨烯膜相比,石墨烯-PMMA复合膜在灵敏度上有所降低,却更有利于工程化封装。

氮掺杂二硫化钼及其他二维材料可通过掺杂进一步优化声学响应。Ojaghloo A等人[52]在液氮中使用脉冲激光烧蚀,合成了氮掺杂二硫化钼膜片,基于氮掺杂二硫化钼膜片的声学传感器灵敏度显著高于原始的二硫化钼膜片,传感器在8 Hz~10 kHz范围内表现出近乎平坦的声学频率响应。选择氮掺杂二硫化钼而非原始二硫化钼,是因为氮掺杂可降低膜片等效刚度并调控缺陷状态,从而在提升灵敏度的同时,保持较宽的平坦频率响应。选择二硫化钼体系而非石墨烯,是因为其层状结构具有可调性和化学稳定性,但液氮脉冲激光烧蚀这类制备方法的规模化、一致性和封装兼容性仍需验证。

综上,4类膜片材料各有其适用场景与局限。硅基材料工艺成熟,与MEMS兼容,适合高频声波检测,但微米级厚度使其弯曲刚度偏大、偏转灵敏度有限;金属材料反射率高、延展性好,适合高频超声、低频环境噪声及次声检测,但存在热膨胀系数不匹配、易氧化、粘附性不足等问题;聚合物材料杨氏模量低、成本低,适合高灵敏低频、次声及水声检测,但厚度控制困难、反射率低、长期稳定性差;二维材料具有原子级厚度和极低弯曲刚度,适合高灵敏、低噪声的微弱声检测,但大面积制备、转移和封装一致性仍是瓶颈。总体而言,膜片材料的选择需在灵敏度、带宽、稳定性与工艺成本之间综合权衡。

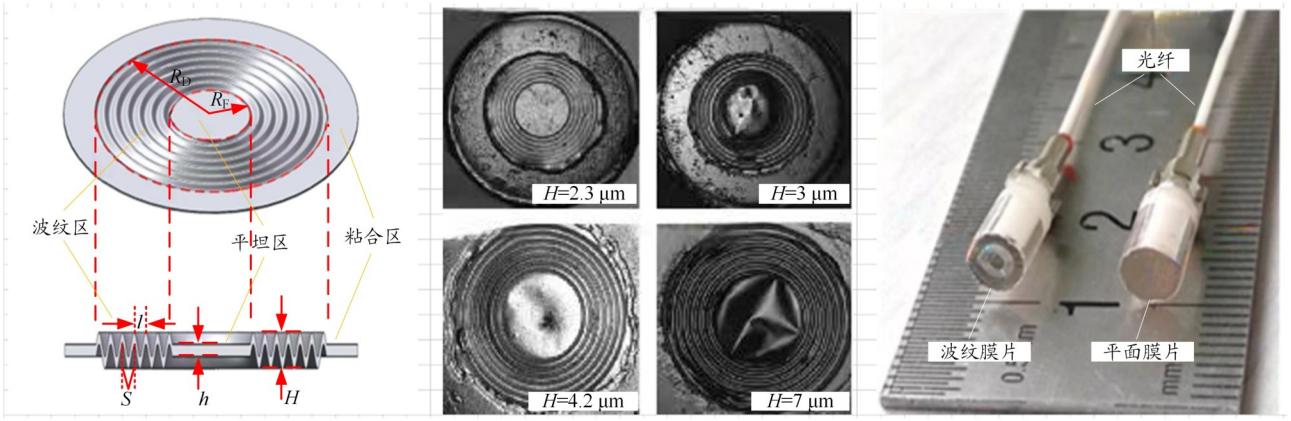
3 基于不同膜片结构的EFPI光纤声学传感器

除了常见的平膜结构外,近年来又出现了波纹膜结构[54-60]、台面膜结构[61-65]、梁-膜结构[66-71]等一些新颖的膜片结构。这些膜片结构在一定程度上都提升了传感器的性能。

3.1 波纹膜结构

平膜结构易于理论分析和加工,但在外界声压作用下膜片会变成非平面,降低光学性能。通过在膜片中引入波浪式的条纹结构,可改善膜片中心处的形变,还能降低膜片初始应力的影响,提高膜片的机械灵敏度和增加线性响应范围[54-56]。Liu Bin等人[57]设计了一种基于波纹PET膜片的EFPI光纤声学传感器,采用改进的低温热压印光刻技术制作波纹PET膜片,频率响应范围为0.08~8 kHz,机械灵敏度为40.28 nm/Pa,最小可探测声压为141.50 μPa/Hz$^{1/2}$。选择PET而非氧化硅这类刚性无机膜,主要是因为PET柔性好、成本低,且低温热压印可在聚合物膜上灵活形成波纹结构。然而,聚合物膜片的刚度、厚度及波纹参数的一致性难以控制。Zhou Ruiling等人[58]通过在氧化硅薄膜表面增加9个环型波纹来释放薄膜的初始应力并降低薄膜的刚性,从而提高声压传感器的声学检测灵敏度,所设计的波纹膜结构的高灵敏度光纤声压传感器声压灵敏度为2 253.2 mV/Pa,信噪比为79.22 dB。选择氧化硅薄膜并引入环形波纹,主要是因为氧化硅与MEMS光纤工艺兼容,薄膜刚性和光学特性较稳定,但波纹结构加工步骤更多,参数控制要求更高。

基于波纹膜片的EFPI光纤声学传感器结构与实物图[59-60],如图2所示。图2(a)为波纹膜片的结构示意图,其中波纹膜片的最外层为粘合区,用于将膜片与玻璃管粘合在一起;中心为平坦区,半径为R_f,用作反射镜,与波纹区连接;波纹膜的半径为R_p。在波纹区,引入了许多浅波纹用于释放膜的初始应力。图中l为波纹的空间周期,S为波纹的弧长,h为膜片厚度,H为波纹深度,其中波纹深度H是影响波纹膜片性能的最有效参数。图2(b)展示了不同波纹深度的膜片对比,可以看出,随着波纹深度增加,波纹膜片中心平坦区的平整度逐渐变差。这表明初始应力降低,且波纹膜片的机械灵敏度随腐蚀深度的增加先升高后降低。褶皱的产生可能与波纹环的不对称以及光刻胶表面污染有关,平坦区中的褶皱虽然可能有利于提高传感器灵敏度,但也可能恶化传感器的光学性能,并因潜在的应力集中而使膜片更容易破裂。图2(c)为制作的波纹/平面膜片声学传感器,传感器外壳为玻璃管。



(a) 波纹膜片结构示意图　(b) 不同深度的波纹膜片图像　(c) 制作的波纹/平面膜片声学传感器

图2 基于波纹膜片的EFPI光纤声学传感器的结构与实物图

所制作的波纹膜的机械灵敏度为52 nm/Pa,是相同参数下平面膜的2倍。

总体而言,波纹膜结构通过引入波浪式或环形波纹释放初始应力、降低膜片等效刚度、改善中心形变,从而提高机械灵敏度、线性响应范围和光学稳定性。其中,PET波纹膜具有柔性好、成本低以及热压印参数可灵活调节等优点,适合中低频以及较宽频带使用场景;氧化硅环形波纹膜则更适合借助MEMS工艺实现高灵敏、高信噪比的声压检测。目前,制造技术是限制基于波纹膜结构的EFPI传感器实际应用的主要因素[54],几乎所有波纹膜片都是采用MEMS技术制作的,有些加工参数难以准确控制,严重影响膜片质量。此外,传感器的粘接方式、封装、温度变化等都会影响传感器性能。

3.2 台面膜结构

为减小膜片中心区域的变形对光学性能的影响,可在膜片中央加工平台结构,目前主要结构包括凸台结构[61-63]、真菌形中心压花结构[64]以及凹槽结构[65]。

Sun Yan等人[61]提出了一种基于凸台结构方形膜片的EFPI光纤水听器,该器件在水中固有频率为100 kHz,频率响应范围为80~300 kHz。凸台方形膜片用于替代普通平膜,主要有以下原因:一是中心凸台可提供稳定的反射面,抑制膜片中心大变形引起的曲率变化和光场发散;二是方形膜片与凸台结构便于对振动模态进行控制,有利于扩展高频水声检测的响应带宽。相应的代价是凸台增大了中心区域的等效质量与刚度,低频灵敏度因此受到一定牺牲,同时硅基凸台膜片的MEMS加工工艺复杂、成本偏高。

Hayber Ş E等人[64]通过在台面和膜之间添加支柱,提出了一种基于真菌形中心压纹膜片的光纤F-P压力传感器。与直接将凸台加厚在膜片中央相比,这种"台面—支柱—膜片"分离结构使台面主要承担光学反射功能,膜片主要承担压力变形功能,从而避免因台面厚度增加而引起膜片刚度增大和灵敏度降低。因此,该结构更适合需要兼顾低光学损耗和高压力灵敏度的使用场景。但是,支柱和压花结构的制备、对准及长期可靠性具有很高的难度。Niu Xiling等人[65]提出了一种基于凹槽膜片的新型EFPI光纤声学传感器,实现了灵敏度的增强,并在很大程度上保证了谐振频率的一致性。该传感器的声压灵敏度为37.44 mV/Pa,约为传统圆形膜片传感器的2.07倍;谐振频率为2.12 kHz,与基于无凹槽膜片的传感器的谐振频率几乎相同,最小可探测声压为89.86 μPa/Hz$^{1/2}$。选择凹槽结构而非中心凸台结构,是为了通过局部沟槽降低等效刚度、释放应力或调控变形分布,从而在保持谐振频率一致性的同时增强灵敏度。此传感器适合中低频声学检测,但凹槽结构的几何参数对性能影响显著,关键在于加工精度和一致性。

综上,台面/凹槽膜结构是通过中心平台、分离台面或局部凹槽调控膜片中心形变,保持反射面平整,降低光学损耗,并在不同程度上提高灵敏度、信噪比或谐振频率一致性;其中,凸台适合高频水听器,真菌形中心压花适合压力传感器,凹槽适合中低频高灵敏声学检测。虽然台面结构可以提高传感器的光学性能,但台面结构膜片多为硅膜片,MEMS制作复杂且成本高。

3.3 梁-膜结构

将梁与膜结合可增加膜片可调节结构参数数量,改善膜片机械性能,提高传感器灵敏度[66-69]。目前,常见的梁-膜结构主要包括三叶草(TLC)结构、四梁支撑

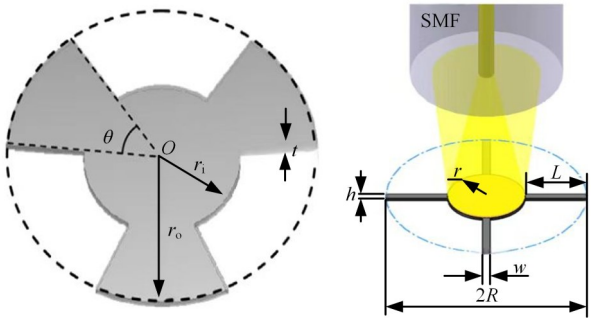
结构和L型轮辐结构等。

Hayber Ş E等人[66]首次提出了基于TLC结构膜片的EFPI光纤声压传感器。通过增加可调节的膜片结构参数数量,可以在不改变直径和厚度的情况下将声学传感器的灵敏度提高约5倍,而谐振频率只有传统圆形膜片谐振频率的1/3。因此基于TLC结构膜片的传感器更适合低频、高灵敏声压检测,而不适合需要宽带高频响应的场景。

Li Haoyong等人[67]提出了一种用于局部放电(PD)检测的EFPI超声传感器。通过在膜片中间引入四梁支撑结构,以降低阻尼比的方式提高了传感器在共振频率处的灵敏度,其噪声等效最小可探测声压为251 μPa/Hz$^{1/2}$。由于PD超声检测更关注特定共振频率附近的响应,而四梁支撑结构可通过降低阻尼比提高共振峰处的灵敏度,同时保持一定的结构稳定性。2021年,该课题组[68]利用3D打印技术制造了聚焦频率为40 kHz且具有12个衍射级的菲涅尔波带片(FZP)超声学透镜,可将40 kHz超声在焦点处放大8倍,并在膜片采用四梁支撑结构的基础上,将该FZP超声学透镜与传感探头组装在一起,用于在超声激发传感膜片之前放大超声。该传感器最大响应灵敏度达到−12.4 dB re 1 V/Pa。

王巧云等人[69]提出了一种L型轮辐结构的膜片式EFPI光纤声学传感器,通过调节膜片结构尺寸,可获得所需的固有频率。所制作的EPPI光纤声学传感器在1 kHz下的声压灵敏度为25.4 nm/Pa,最小可探测声压为38.2 μPa/Hz$^{1/2}$。但是L型轮辐结构的几何参数更多,制造和一致性控制也更复杂。

2种梁-膜结构膜片示意图如图3所示。图3(a)为TLC结构膜片[66],其中r_o为外半径、r_i为内半径、t为厚度、θ为叶角。数值模拟表明:膜片灵敏度随厚度t增加和外半径r_o减小而降低。TLC结构膜片可在不改变直径和厚度的情况下将灵敏度提高约5倍,谐振频率降至原始基频的1/3。图3(b)为四梁支撑结构膜片[68],h、L、w分别为梁的厚度、长度和宽度,r为膜片半径,R为支撑梁外接圆半径。相比传统圆形膜片,四梁支撑结构膜片阻尼比更低;通过合理设计梁-膜几何参数,并结合FZP超声学透镜聚焦目标频率,可使最大响应灵敏度增加7.4 dB且频带更窄,适用于拾取特定频率超声以判断电力系统局部放电。



(a) TLC结构示意图　　(b) 四梁支撑结构示意图

图3 2种梁-膜结构膜片示意图

基于不同膜片材料及膜片结构的EFPI光纤声学传感器的性能对比如表1所示。

表1 基于不同膜片材料/结构的EFPI光纤声学传感器性能对比

膜片材料/结构	频率响应范围	灵敏度	最小可探测声压	参考文献
SiO_2膜	20~80 kHz	0.0424 nm/Pa	—	[25]
硅膜	20~40 kHz	0.8 V/Pa	0.625 mPa/Hz$^{1/2}$	[28]
银膜	0.2~2.8 kHz	0.58 mV/mPa	83.7 μPa/Hz$^{1/2}$	[30]
金膜	0.2~2 kHz	35 mV/Pa	1.3 mPa/Hz$^{1/2}$	[31]
镍膜	0.01~2 kHz	462 mV/Pa	2.23 mPa/Hz$^{1/2}$	[33]
铝膜	0.02~20 kHz	68.5 mV/Pa	—	[35]
PET膜	1~20 Hz	121 mV/Pa	—	[39]
壳聚糖膜	—	52.6 mV/kPa	2.37 mPa/Hz$^{1/2}$	[40]
硅橡胶膜	0.3~6.5 kHz	387mV/Pa	463 μPa/Hz$^{1/2}$	[42]
水凝胶膜	0.1~10 kHz	410mV/Pa	44.37 μPa/Hz$^{1/2}$	[45]
PI膜	0.2~10 kHz	170 mV/Pa	—	[43]
氧化石墨烯膜	20~100 kHz	—	478 μPa/Hz$^{1/2}$	[48]
石墨烯膜	0.5~18 kHz	187.32 nm/Pa	94.35 μPa/Hz$^{1/2}$	[49]
石墨烯膜	—	29.23 V/Pa	47 μPa/Hz$^{1/2}$	[50]
波纹PET膜片	0.08~8 kHz	40.28 nm/Pa	141.50 μPa/Hz$^{1/2}$	[57]
波纹银膜片	0.08~16 kHz	82.65 nm/Pa	57 μPa/Hz$^{1/2}$	[60]
凸台膜片	0.01~5 kHz	−154.6 dB re 1/uPa	—	[62]
凹槽膜片	—	37.44 mV/Pa	89.86 μPa/Hz$^{1/2}$	[65]
四梁支撑膜片	20~70 kHz	−15 dB re 1V/Pa	251 μPa/Hz$^{1/2}$	[67]

4 未来展望

目前,EFPI光纤声学传感器已向高性能、微型化和耐恶劣环境方向发展,针对发展中存在的重点问题,可从以下方面展开:

1)膜片材料与可控制备。石墨烯、氧化石墨烯、氮掺杂二硫化钼等二维材料虽可凭借纳米级厚度和高杨氏模量显著提升灵敏度,但大面积CVD石墨烯仍面临转移、褶皱、破裂、残余应力和层数均匀性控制困难,氧化石墨烯则存在厚度、含氧官能团和批次一致性差异。潜在解决方案包括:发展卷对卷或晶圆级CVD与转移工艺,主动调控石墨烯与基底、支撑层之间的界面相互作用和应力状态,并引入石墨烯-PMMA等复合支撑层,建立厚度、层数、缺陷密度、残余应力与灵敏度、最小可探测声压之间的定量映射数据库,以提高膜片一致性。

2)场景驱动封装与信噪比提升。在水下通信与声波检测中,EFPI传感器需同时解决耐压、水密、声阻抗匹配、胶粘剂老化以及金属与二氧化硅热膨胀系数不匹配等问题。可发展D形陶瓷插芯开腔压力平衡结构、全聚合物/复合膜、玻璃焊料或激光气密封装等技术。医疗超声场景要求小尺寸、生物相容、可灭菌和宽频高信噪比,水凝胶膜虽灵敏度高,但易失水、溶胀,需通过交联改性、保湿封装或复合支撑提高长期稳定性。电力监测中的局部放电检测需在强电磁干扰下识别20~200 kHz超声信号,可结合菲涅尔波带片声学聚焦、四梁支撑低阻尼结构和全聚合物微腔提高信噪比,并通过温度补偿和差分封装抑制温漂。

3)智能化逆向设计。传统“参数扫描”方式效率有限,可将人工智能用于逆向设计:以目标频率响应、灵敏度、带宽、最小可探测声压和线性度为约束,以膜片直径、厚度、波纹深度、台面/凹槽尺寸、梁宽与轮辐布局、材料层数和复合方式为设计变量,结合有限元/多物理场仿真、遗传算法或贝叶斯优化,自动生成满足特定频谱需求的候选膜片结构。进一步可将人工智能用于解调信号去噪、温压补偿和异常检测,形成“设计—加工—测试—反馈”的闭环迭代。

4)复用与解调。利用复用技术将多个检测点组成传感网络,实现远程监测;通过提高解调速度、增加复用能力,降低仪器成本。结合人工智能解调与温压补偿,还可提升多节点网络在复杂环境中的长期稳定性。

5 结束语

本文系统综述了EFPI光纤声学传感器中膜片结构与材料的研究进展,通过对比分析不同材料特性和结构设计的传感性能,明确了各类EFPI光纤声学传感器适用的声学频率范围,从而为传感膜片的材料优选和结构优化提供了理论依据和技术参考。

随着微结构加工、人工智能等技术的发展,EFPI光纤声学传感器将迎来新的发展机遇。未来,传感器的性能将逐步提高,成本会逐步降低。EFPI光纤声学传感器将在更多领域发挥重要作用,其发展前景非常广阔。

参考文献:

[1] Brauns M, Lucking F, Fischer B, et al. Laser-excited acoustics for contact-free inspection of aerospace composites [J]. Materials Evaluation, 2021,79(1):28-37.

[2] Zhao Xinyu, Wang Zhengzhi, Li Chenxi, et al. Ultrahigh sensitive trace gas sensing system with dual fiber-optic cantilever multiplexing-based differential photoacoustic detection[J]. Analytical Chemistry, 2024, 96(3):1046-1053.

[3] Li Chenxi, Zhang Yajie, Guo Min, et al. Differential cantilever enhanced fiber-optic photoacoustic sensor for diffusion gas detection[J]. Analytical Chemistry, 2024, 96(11):4562-4569.

[4] Deng Shiyu, Haindl R, Edward Z, et al. An optical coherence photoacoustic microscopy system using a fiber optic sensor[J]. APL Photonics, 2021,6(9):096103.

[5] Zhou Jiasheng, Zhou Jingying, Wang Wei, et al. Miniature noncontact photoacoustic probe based on fiber-optic photoacoustic remote sensing microscopy[J]. Optics Letters, 2021, 46(22):5767-5770.

[6] 乔学光,邵志华,包维佳,等. 光纤超声传感器及应用研究进展[J]. 物理学报,2017,66(7):074205.

[7] Yi Zhiran, Zhang Wenming, Yang Bin. Piezoelectric approaches for wearable continuous blood pressure monitoring: a review[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2022, 32(10):103003.

[8] Wang Xiangfu, Yu Jihong, Cui Yixuan, et al. Research progress of flexible wearable pressure sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021,330:112838.

[9] Su Min, Li Pei, Liu Xueqin, et al. Textile-based flexible capacitive pressure sensors:a review[J]. Nanomaterials, 2022, 12(9):1495.

[10] Ramanathan A K, Headings L M, Dapino M J. Airfoil anemometer with integrated flexible piezo-capacitive pressure sensor[J]. Frontiers in Materials, 2022, 9:904056.

[11] Chen Jiamin, Xue Chenyang, Zheng Yongqiu, et al. Micro-fiber-optic acoustic sensor based on high-Q resonance effect using Fabry-Pérot etalon [J]. Optics Express, 2021, 29(11):16447-16454.

[12] Caucheteur C, Guo Tuan, Liu Fu, et al. Ultrasensitive plasmonic sensing in air using optical fibre spectral combs[J]. Nature communications, 2016, 7(1):13371.

[13] Li Cheng, Peng Xiaobin, Zhang Hui, et al. A sensitivity-enhanced flexible acoustic sensor using side-polished fiber Bragg grating[J]. Measurement, 2018, 117: 252-257.
[14] Gang Tingting, Hu Manli, Qiao Xueguang, et al. Fiber-optic Michelson interferometer fixed in a tilted tube for direction-dependent ultrasonic detection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 88: 60-64.
[15] Ma Jun, Yu Yongqin, Jin Wei. Demodulation of diaphragm based acoustic sensor using Sagnac interferometer with stable phase bias[J]. Optics express, 2015, 23(22): 29268-29278.
[16] Hocine M, Yasmine B, Selman L. Optimizing the sensitivity of a fiber optic-based Sagnac interferometer for high-performance human voice sensing[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 82: 103644.
[17] Zhu Xiaojun, Liu Wen, Sun Dan, et al. High-sensitive acoustic sensor based on microfiber Mach-Zehnder interferometer with tapered polarization-maintaining fiber[J]. Fiber and Integrated Optics, 2022, 41(1-2): 41-61.
[18] 金鹏,刘彬,钟志,等. MEMS光纤声压传感器技术[M]. 北京:科学出版社,2022.
[19] Hou Liangtao, Li Yan, Sun Libin, et al. High-fidelity optical fiber microphone based on graphene oxide and Au nanocoating[J]. Nanophotonics, 2023, 12(19): 3707-3719.
[20] Wang Qiaoyun, Yu Qingxu. Polymer diaphragm based sensitive fiber optic Fabry-Perot acoustic sensor[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(3): 266-269.
[21] 倪文军. 基于光纤-薄膜复合器件的宽频声学传感研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
[22] Cao Zhongwei, Zhang Haojie, Li Xuan, et al. High-resolution optical fiber underwater acoustic sensor enhanced by PDMS coating[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 87: 103953.
[23] Kilic O, Digonnet M, Kino G, et al. External fibre Fabry-Perot acoustic sensor based on a photonic-crystal mirror[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(10): 3049.
[24] Fu Xin, Lu Ping, Zhang Jin, et al. Micromachined extrinsic Fabry-Pérot cavity for low-frequency acoustic wave sensing[J]. Optics Express, 2019, 27(17): 24300-24310.
[25] 鞠玲,翁蓓蓓,牛锡玲,等. 基于膜片式光纤法布里-珀罗传感器的超声学检测[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(15):1506002.
[26] 丁武成,魏鹤鸣,韦妍,等. 基于氮化硅膜片的光纤法布里-珀罗声学传感器[J]. 光学学报,2025,45(2):0206008-0206008.
[27] Wang Jinlong, Sun Weizhong, Zhou Jun, et al. Partial discharge detection from large motor stator slots using EFPI sensors[J]. Sensors, 2025, 25(2): 357.
[28] Li Haoyong, Li Delin, Xiong Chaoyu, et al. Low-cost, high-performance fiber optic Fabry-Perot sensor for ultrasonic wave detection[J]. Sensors, 2019, 19(2): 406.
[29] Guo Fawen, Fink T, Han Ming, et al. High-sensitivity, high-frequency extrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-tip sensor based on a thin silver diaphragm[J]. Optics letters, 2012, 37(9): 1505-1507.
[30] Liu Bin, Lin Jie, Liu Huan, et al. Extrinsic Fabry-Perot fiber acoustic pressure sensor based on large-area silver diaphragm[J]. Microelectronic Engineering, 2016, 166: 50-54.
[31] Huang Qiangqiang, Deng Shuo, Min Li, et al. Fabry-Perot acoustic sensor based on a thin gold diaphragm[J]. Optical Engineering, 2020, 59(6): 064105-064105.
[32] Tong Yuanbiao, Pan Chenxinyu, Li Zhiyong, et al. High-sensitivity fiber-tip acoustic sensor with ultrathin gold diaphragm[J]. Optics Express, 2024, 32(8): 14674-14684.
[33] Hu Xinyu, Wang Haibo, Yue Yan, et al. Robust fiber-optic microphone with modified dual-wavelength demodulation algorithm for low-frequency sound detection[J]. Applied Acoustics, 2025, 229: 110394.
[34] Hu Xinyu, Yue Yan, Wang Haibo, et al. Acoustic detection test based on a Fabry-Perot interferometric fiber-optic infrasound sensor mounted on an aerostat[J]. Acta Acustica, 2025, 50(2): 412-422.
[35] Sun Jiayao, Yan Lun, Jiang Chunlei, et al. Highly sensitive Fabry-Perot acoustic sensor based on optic fiber spherical end surface[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 80: 103440.
[36] Zhang Wanjin, Lu Ping, Qu Zhiyuan, et al. High sensitivity and high stability dual Fabry-Perot interferometric fiber-optic acoustic sensor based on sandwich-structure composite diaphragm[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(2): 1-13.
[37] Wang Peijie, Pan Yufeng, Zhang Jiangshan, et al. Miniaturized and highly sensitive fiber-optic Fabry-Perot sensor for mHz infrasound detection[J]. Photonics Research, 2024, 12(5): 969-978.
[38] Beard P C, Mills T N. Miniature optical fibre ultrasonic hydrophone using a Fabry-Perot polymer film interferometer[J]. Electronics Letters, 1997, 33(9): 801-802.
[39] Wang Shun, 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) 1264-1267.
[40] Li Cheng, Lu Shanshan, Zhong Chao, et al. High-sensitivity low-frequency Fabry-Perot ultrasonic hydrophone with Chitosan diaphragm[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(7): 6669-6676.
[41] Chen Lihan, Chan Chichiu, Yuan Weiyong, et al. High performance chitosan diaphragm-based fiber-optic acoustic sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 163(1): 42-47.
[42] Chen Yongzhang, Zheng Yiwen, Xiao Haibing, et al. A high-sensitivity EFPI acoustic sensor based on silicone rubber diaphragm[C]//Advanced Optical Manufacturing Technologies and Applications 2022 and 2nd International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing (AOMTA and YSAOM 2022), July 29-31, 2022, Changchun, China. Bellingham: SPIE, 2023: 596-604.
[43] Zhu Zekun, Shuai Hanyu, Jia Kun, et al. High-performance extrinsic fabry-perot fiber optic acoustic sensor based on au/pi composite film[J]. IEEE Access, 2024, 12: 30427-30433.
[44] Chen Zongyu, Dong Bo, Lin Pofeng, 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: 706-713.
[45] Lieber P H, He Shaochun, Dinh Q, et al. Miniaturized Fabry-Perot fiber-optic microphone based on capillary tube and hydrogel diaphragm [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 185: 112582.
[46] Hill G C, Melamud R, Declercq F E, et al. SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 138(1): 52-62.

[47] Liu Li, Lu Ping, Wang Shun, et al. UV adhesive diaphragm-based FPI sensor for very-low-frequency acoustic sensing[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 8(1): 1-9.
[48] Monteiro C S, Raposo M, Ribeiro P A, et al. Acoustic optical fiber sensor based on graphene oxide membrane[J]. Sensors, 2021, 21(7): 2336.
[49] Liu Yang, Li Cheng, Li Buxuan, et al. Ultrasensitive acoustic detection using an enlarged fabry-perot cavity with a graphene diaphragm[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(44): 51390-51398.
[50] Guo Xing, Yao Qingkai, Zhang Xue, et al. Fabrication of acoustic sensor using multilayer transferred monocrystal graphene and graphene-polymethyl methacrylate composite film based on extrinsic Fabry-Pérot interference effect[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(8): 12374-12384.
[51] Wang Yangfeng, Wan Shengpeng, Li Yujie, et al. Respiratory system disease recognition based on diaphragm fiber-optic FP sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2025, 383, 116237.
[52] Ojaghloo A, Parvin P, Moradi H, et al. OFS-EFPI ultra-fine manometer based on nitrogen-doped MoS_2 diaphragm[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 181, 111639.
[53] Yu Feifan, Liu Qianwen, Gan Xin, et al. Ultrasensitive pressure detection of few-layer MoS_2[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.), 2016, 29(4): 1603266.
[54] Li Honglin, Deng Hui, Zheng Guangqi, et al. Reviews on corrugated diaphragms in miniature fiber-optic pressure sensors[J]. Applied Sciences, 2019, 9(11): 2241.
[55] Jerman J H. The fabrication and use of micromachined corrugated silicon diaphragms[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1990, 23(1-3): 988-992.
[56] Scheeper P R, Olthuis W, Bergveld P. The design, fabrication, and testing of corrugated silicon nitride diaphragms[J]. Journal of microelectromechanical systems, 1994, 3(1): 36-42.
[57] Liu Bin, Zhang Xiqu, Wang Ailin, et al. Optical fiber fabry-perot acoustic sensors based on corrugated PET diaphragms [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(13): 14860-14867.
[58] Zhou Ruling, Guan Chenggang, Lv Hui, et al. The performance characterization and optimization of fiber-optic acoustic pressure sensors based on the moems sensitized structure[J]. Sensors, 2023, 23(19): 8300.
[59] Liu Bin, Zhou Han, Liu Lei, et al. An optical fiber Fabry-Perot microphone based on corrugated silver diaphragm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(8): 1994-2000.
[60] Liu Bin, Zheng Guangqi, Wang Ailin, et al. Optical fiber Fabry-Perot acoustic sensors based on corrugated silver diaphragms[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(6): 3874-3881.
[61] Sun Yan, Feng Ganhua, Georgiou G, et al. Center embossed diaphragm design guidelines and Fabry-Perot diaphragm fiber optic sensor [J]. Microelectronics journal, 2008, 39(5): 711-716.
[62] Wang Fuyin, Shao Zhengzheng, Xie Jiehui, et al. Extrinsic Fabry-Pérot underwater acoustic sensor based on micromachined center-embossed diaphragm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(23): 4628-4636.
[63] Ge Yixian, Wang Ming, Yan Haitao. Optical MEMS pressure sensor based on a mesa-diaphragm structure[J]. Optics express, 2008, 16(26): 21746-21752.
[64] Hayber Ş E, Aydemir U. Design and simulation of a novel fungus-shaped center embossed diaphragm for fiber optic pressure sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 61: 102429.
[65] Niu Xiling, Huang Yi, Zhang Lina, et al. A sensitivity-enhanced fiber optic Fabry-Perot acoustic sensor based on grooved diaphragm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(8): 422-425.
[66] Hayber Ş E, Tabaru T E, Saracoglu O G. A novel approach based on simulation of tunable MEMS diaphragm for extrinsic Fabry-Perot sensors [J]. Optics Communications, 2019, 430: 14-23.
[67] Li Haoyong, Lv Jiaming, Li Delin, et al. MEMS-on-fiber ultrasonic sensor with two resonant frequencies for partial discharges detection[J]. Optics Express, 2020, 28(12): 18431-18439.
[68] Li Haoyong, Bu Jian, Li Wenli, et al. Fiber optic Fabry-Perot sensor that can amplify ultrasonic wave for an enhanced partial discharge detection[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 8661.
[69] 王巧云,闻妲,王纪,等. 基于L型轮辐结构膜片的窄频光纤F-P声学传感器研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(5):110-117.