

引用本文:李群,陆云才,邵剑,等.一种基于双膜结构的宽频光学麦克风[J].光通信技术,2024,48(5):73-79.

一种基于双膜结构的宽频光学麦克风

李群¹,陆云才¹,邵剑¹,吴鹏¹,梁家碧¹,李晓涵¹,但德春²,蔚超³

(1.国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院,南京 211103;

2.上海大学 通信与信息工程学院,上海 200444;3.国网江苏省电力有限公司,南京 210024)

摘要:由于传统基于膜片或悬臂梁式的光学麦克风频响范围较窄,且在不同环境和需求下检测的声波频率范围不同,设计了一种基于双膜结构的宽频光学麦克风。该光学麦克风由单模光纤、超材料膜片和波导膜片组成。理论分析了2个膜片的结构参数对传感器性能的影响,利用COMSOL Multiphysics进行了仿真,并对制备出的光学麦克风进行了测试。仿真结果表明:所设计的光学麦克风在1~100 kHz频率内具有平坦的频率响应,其谐振频率为170 kHz。

关键词:光学麦克风;宽频响;超材料膜片;波导膜片;双膜结构

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)05-0073-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Wideband optical microphone based on dual-diaphragm structure

LI Qun¹, LU Yuncai¹, SHAO Jian¹, WU Peng¹, LIANG Jiabi¹, LI Xiaohan¹, DAN Dechun², WEI Chao³

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

2. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: Due to the narrow frequency response range of traditional optical microphones based on diaphragm or cantilever beam, and the different frequency ranges of sound waves detected in different environments and requirements, a wideband optical microphone based on a dual diaphragm structure has been designed. This optical microphone is composed of single-mode fiber, metamaterial membrane, and waveguide membrane. Theoretical analysis is conducted on the influence of the structural parameters of two membranes on the performance of the sensor. COMSOL Multiphysics is used for simulation, and the prepared optical microphone is tested. The simulation results show that the designed optical microphone has a flat frequency response within the frequency range of 1~100 kHz, with a resonant frequency of 170 kHz.

Key words: optical microphone, wide frequency response, metamaterial diaphragm, waveguide diaphragm, dual-diaphragm structure

0 引言

声波是一种常见的机械波,能够承载信息,因此对声波的探测在现代社会非常重要。声学检测已经广泛应用于地表表征^[1]、自然灾害预警^[2]、局部放电检测^[3-5]、

航空航天^[6-7]、水下检测(或识别)与通信^[8]以及军事国防^[9-10]等领域。声传感器亦可称为光学麦克风,是进行声波检测的重要工具,也是获取信息的关键。相较于传统的电声传感技术,光纤传感器具有体积小、灵敏度高、电绝缘性良好和抗电磁干扰等特性,因此在声传感领域得到了广泛的研究^[11-13]。

光纤声学传感器种类繁多,其中基于膜片类型的声学传感器因其优异的性能而较为常见^[14]。对于这类传感器,传感性能在很大程度上取决于可变形膜片的特性,传感灵敏度则取决于膜片形变量^[15]。例如,XI-ANG Z等人^[16]将光纤准直器和膜片结构相结合,获得了频响范围为400 Hz~12 kHz的光学麦克风。SI W等

收稿日期:2024-04-07。

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023092)资助。

作者简介:李群(1967—),男,博士,研究员,国网江苏省电力有限公司电力科学研究院副院长、国家电网首席专家,主要从事光纤传感技术、电力设备状态监测、电力系统运行优化等研究工作,负责国家“863”、自然科学基金、省部级项目30项,作为第一完成人获国家级奖2项、省部级奖27项。



李群,陆云才,邵剑,等:一种基于双膜结构的宽频光学麦克风

人^[17]提出一种可以准确定位局放源的光学麦克风,其灵敏度为 733 nm/kPa。但是,这些光学麦克风灵敏度相对较低。为此,LI S 等人^[18]提出了一种具有波纹结构的光纤法布里-珀罗(F-P)水听器。经实验测试,其频响范围为 20~800 Hz。LIU B 等人^[19]采用银膜片制备了波纹结构,最终麦克风的灵敏度达到了 52 nm/Pa,且其平坦频率响应范围为 63 Hz~1 kHz。然而,尽管上述几种光学麦克风都能提高灵敏度,但在频率响应范围方面表现并不突出,尤其是在平坦响应范围内的灵敏度仍有待提升。为了扩大光学麦克风的频率响应范围,本文设计一种基于双膜结构的宽频光学麦克风。

1 光学麦克风的结构与传感原理

本文设计的基于双膜结构的宽频光学麦克风的结构如图 1 所示。该结构由超材料膜片、波导膜片、单模光纤和石英套管组成。根据力学理论,无残余初始应力的薄膜片有助于实现高机械灵敏度。然而,在实际制备过程中,由于工艺上的局限性,平坦的薄膜往往不可避免地携带这种应力。为了有效缓解这一问题,波纹结构的引入成为了一种有效的解决方案,它能显著释放薄膜中的残余初始应力^[20]。

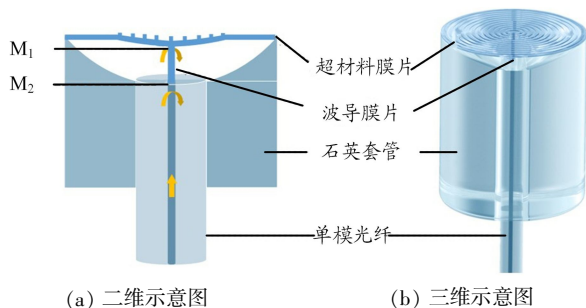


图 1 双膜结构的宽频光学麦克风示意图

超材料膜片的材料为石英玻璃,它是通过在圆形膜片上刻蚀波纹来制备的。超材料膜片无波纹的一面作为反射面 M_1 ,光纤的端面作为反射面 M_2 。当光在单模光纤中传输到达端面时,一部分光在端面发生反射,一部分光透射出去,沿着波导膜片传输,最终到达 M_1 ,并在此发生反射。最终,2 束反射光在单模光纤中发生干涉。因此,超材料膜片、单模光纤和波导膜片共同构成一个法布里-珀罗干涉仪(FPI)^[21]。2 束反射光的干涉信号可以表示为

$$I = I_{R1} + I_{R2} + 2\sqrt{I_{R1}I_{R2}} \cos\left(\frac{4\pi L n_{\text{eff}}}{\lambda} + \phi_0\right) \quad (1)$$

其中, λ 为波长, I_{R1} 和 I_{R2} 表示 2 束反射光的强度, L 为 FPI 腔长(波导膜片长度), n_{eff} 为波导的有效折射率, ϕ_0

为 FPI 的初始相位。当超材料膜片在声压的作用下发生弯曲时,根据力学原理可知,波导膜片会因受到挤压而发生形变^[22]。由于弹光效应的影响,其折射率也会发生改变;同时,声压导致折射率发生变化,干涉强度 I 的大小受折射率影响,因此干涉强度取决于声压大小。

2 传感器结构参数仿真

2.1 超材料膜片

2.1.1 理论分析

对于超材料膜片,特征频率 ω_{mn} ^[23]可以描述为

$$\omega_{mn} = \frac{\varphi_{mn}^2}{R_d^2} \sqrt{\frac{D_{\text{eff}}}{\rho h_d}} \quad (2)$$

超材料膜片的有效抗弯刚度 D_{eff} 可以描述为

$$D_{\text{eff}} = \frac{a_p E h_d^3}{64} \quad (3)$$

其中, R_d 为超材料膜片半径, ρ 为材料密度, h_d 为超材料膜片的厚度, E 为膜片的杨氏模量。当 m 和 n 取不同值时, φ_{mn}^2 取值不同。本文只研究膜片的基频,即 φ_{00}^2 ,值约为 10.21。当材料固定时,型面系数 a_p ^[23]和波纹的品质因数 q 可以表示为

$$a_p = \frac{2(q+3)(q+1)}{3 \left(1 - \frac{\nu^2}{2}\right)^2} \quad (4)$$

$$q^2 = \frac{S}{l} \left(1 + 1.5 \frac{H^2}{h_d^2}\right) \quad (5)$$

其中, ν 为泊松比; S/l 为波纹的占空比,其随着波纹间距的增加而减小; H 为刻蚀的波纹厚度。因此,超材料膜片的厚度越大,特征频率越高;超材料膜片半径越大,特征频率越低。二者对特征频率的作用规律相反。 a_p 变化规律与 q 相同,对于矩形波纹而言, $S/l = (R_d + 2NH)/R_d$ ^[24], N 为波纹的数目。在其它条件不变的情况下,波纹间距越大, N 越小, q^2 越小,开方后的值也越小, a_p 也就越小。因此,特征频率随着波纹间距的增加而降低,而随着波纹厚度的增加而升高。

当圆形膜片四周被固定且施加均匀的载荷于膜片表面时,形变量最大点位于圆心。膜片的中间点形变量^[25-26]可以描述为

$$y = \frac{3(1-\nu^2)P}{16Eh^3} a^4 \quad (6)$$

其中, P 为压强大小, h 为圆形膜片的厚度, a 为圆形膜片半径。显然,膜片的形变量主要受膜片半径和厚度

影响较大。

对于具有波纹结构的膜片,其形变量^[27]也可以描述为

$$P_0 = a_p \frac{E}{1-\nu} \frac{h_d^3}{R_d^4} u(0) + b_p \frac{E}{1-\nu} \frac{h_d^3}{R_d^4} u^3(0) \quad (7)$$

其中, $u(0)$ 为膜片的形变位移量和膜片的大小之比, b_p 表示高阶形变对应的型面系数。对于小挠度的膜片, $u^3(0)$ 近似为零。根据式(7)可知,膜片的半径越大,形变量越大;膜片越厚,形变量越小。刻蚀的波纹深度增加也会导致形变量的减小;波纹数目越少,形变量越大。

2.1.2 仿真分析

本文在超材料膜片的基础上添加了圆柱体,用于模拟不同环境,如空气或水溶液等。在圆柱体上还设置了完美匹配层(PML)表面,用于吸收边界上的反射波,以减少对模拟环境的影响。由于选择了压力声学的频域作为物理场,PML表面的效果与PML层相同,都是为了吸收声波以防止反射,从而模拟实验测试中的消音室。2种膜片的仿真建模如图2所示。

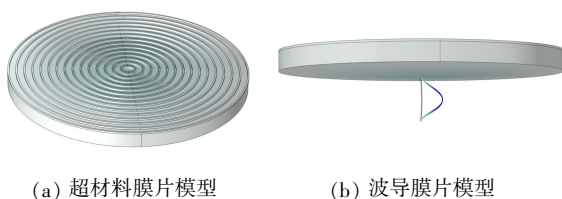


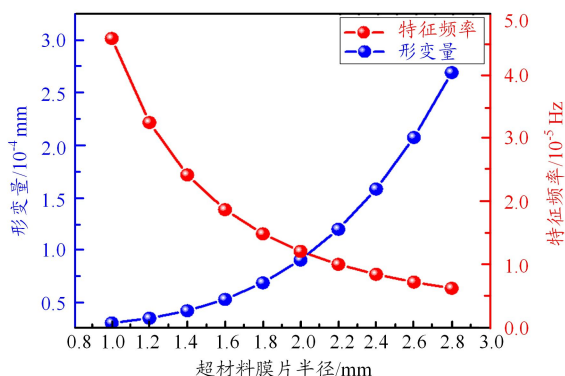
图2 2种膜片仿真模型

在仿真过程中,需确保压力声学 with 固体力学这2个物理场有效耦合。若二者未同时引入,则需手动配置耦合设置。此外,可将环境和声源整合至压力声学模块内,随着环境的纳入,该模块中已添加的材料属性将自动调整以适应新环境。例如,当将研究环境设定为空气时,便无需再顾虑如杨氏模量等固体力学的基本属性,这一设定极大地简化了研究流程,使得研究过程更为高效。将环境和膜片分类后,需在压力声学和固体力学模块中进行条件的设置。例如,在实际制备的传感探头中,膜片的四周是固定的。因此,在进行仿真时也需要设置这一边界条件,否则结果可能会出现误差。基本条件设置完毕后,可以在仿真中添加具体的研究模块。例如,在压力声学的频域研究中,可以包括固体力学和声学的基本物理量,如膜片的位移、膜片的振动模式、声压以及声压级等。通常情况下,对膜片结构参数的分析是通过在研究中添加参数化扫描来实现的。

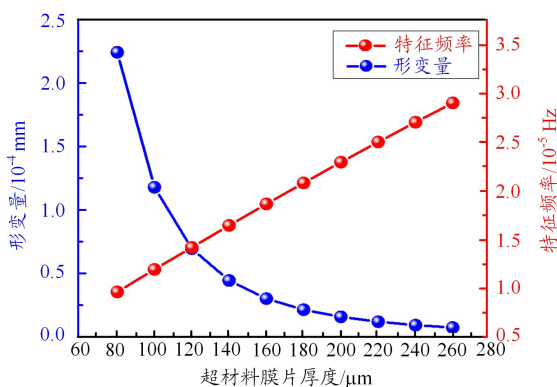
首先,研究在声压的作用下2个膜片的形变情

况。当超材料膜片表面受声压的作用后会发生弯曲。由于波导膜片与超材料膜片直接相连接,且波导膜片一端固定,在超材料膜片的挤压下,波导膜片也发生了弯曲形变。

然后,研究了超材料膜片半径和厚度对传感器性能的影响,结果如图3所示。可以看出,特征频率和形变量随膜片半径和厚度变化的规律与式(2)和式(7)所述相同。图3(a)中,在其它条件不变时,调整超材料膜片的半径可以使形变量增大或减小。通常,为了提高灵敏度,膜片的半径越大越好。然而,实际的应用需要考虑物理条件,即传感器的尺寸必须紧凑。另外,半径在超过2 mm之前,其微小的变化就可能导致特征频率大幅波动。一般来说,平坦的频率响应范围小于谐振频率的三分之一或高出三倍^[6]。可见,频率响应范围是由谐振频率决定的,因此在增大灵敏度的同时,要保证频率响应处在合适的范围。超材料膜片的形变量同样可以通过调整膜片的厚度来改变。图3(b)中,膜片越厚,其形变量越小,相应的灵敏度也就越低(灵敏度与形变理成正比)。这说明厚度对特征频率和形变量的影响同样很大。由于在制备传感探头时通常



(a) 薄膜半径



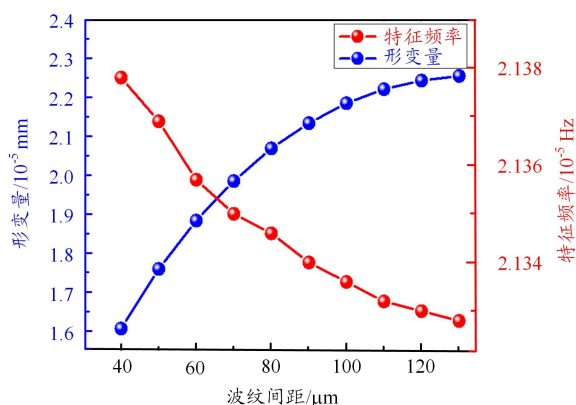
(b) 薄膜厚度

图3 超材料膜片参数对形变量和特征频率的影响

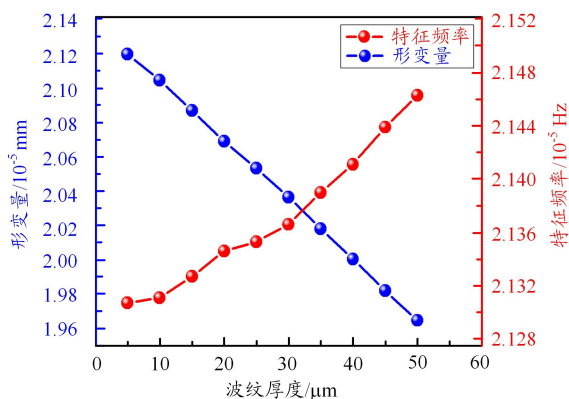
李群,陆云才,邵剑,等:一种基于双膜结构的宽频光学麦克风

需要考虑整体尺寸,这限制了超材料膜片半径的大小。因此,在这种情况下,需要通过设计一个合适的膜片厚度来确保足够的灵敏度。当膜片半径被要求足够小时,会面临特征频率过大、形变量过小的问题。为了解决这一问题,需要将膜片设计得很薄。例如,可以将厚度设置为 $1\text{ }\mu\text{m}$,此时形变量会大幅增加,特征频率也会下降,从而保证整体的高灵敏度和较为合适的频率响应范围。然而,在实际制备过程中,膜片会发生弯曲,并且制备厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的石英材料膜片也相对困难。此外,膜片若过于纤薄,将无法生成足够的挤压力作用于波导膜上,进而引发 2 个显著问题:一是波导膜无法弯曲;二是超材料膜片自身因缺乏足够的反作用力而无法发生形变。在这种情况下,即便受到声压的影响,整个系统依然保持稳定,光强也未受影响,但系统内部的某种机制可能因此受到微妙干扰,进而导致传感器无法正常工作。

本文还分析了波纹参数对传感器形变和特征频率的作用规律,结果如图 4 所示。可以看出,特征频率和形变量随着波纹间距和波纹厚度变化的规律与式(2)



(a) 波纹间距



(b) 波纹厚度

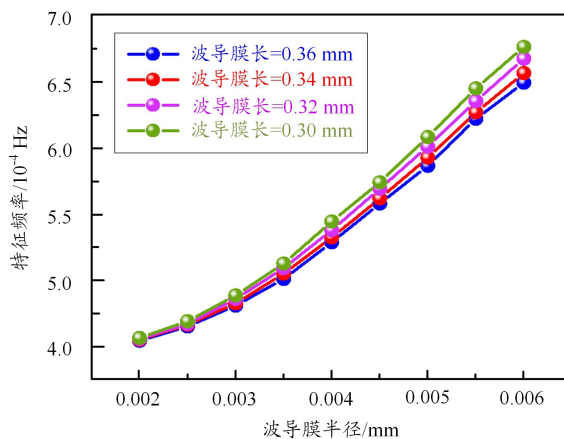
图 4 超材料膜片波纹参数对形变量和特征频率的影响

和式(7)所述相同。图 4 中,相较于膜片的厚度和半径,波纹的相关参数对特征频率和形变量影响比较小。但是,由于膜片半径不变,如果波纹间距越大,那么波纹数量就越少,膜片的形变量就越大。同时,随着波纹厚度的增加,形变量反而减小。减小波纹厚度会导致形变量增加,因此灵敏度会增加,并且对特征频率的影响不大。然而,正如前文所述,波纹的引入有助于有效降低膜片的残余应力。此外,如果膜片较薄,那么在石英材料的膜片上刻蚀出微小的波纹会比较困难。因此,考虑到制造工艺的问题,波纹的厚度避免设计得过于薄。

2.2 波导膜片仿真分析

在 COMSOL 软件中对波导膜片进行模拟时,应当设置预形变。这是因为实际制备的圆柱形波导膜片并不是完全笔直的,而是会略微弯曲。如果不对其进行预形变设置,则无法准确模拟其真实情况,并且在受到外力作用时也无法正常弯曲。另外,双膜结构中,波导膜片的上端面与超材料膜片接触,而下端面则与光纤接触,并承受来自两侧的挤压和固定。为了模拟实际情况,在进行固体力学分析时,需要添加相应的约束条件。考虑到波导是基于超材料膜片的底面建模的,因此只需在波导膜片的底面施加这些约束即可。此外,由于受到压力,超材料膜片会向下弯曲,导致波导膜片也随之发生较大形变。

波导膜片半径和长度对传感器性能的影响结果如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,不论波导膜的长度如何变化,只要波导膜片的半径有所增加,其特征频率的数值就会相应地呈现出增大的趋势。图中,4 条曲线相近,表明波导膜片的长度对特征频率的影响并不大,尤其是在半径较小的情况下。从图 5(b)可以看出,



(a) 特征频率

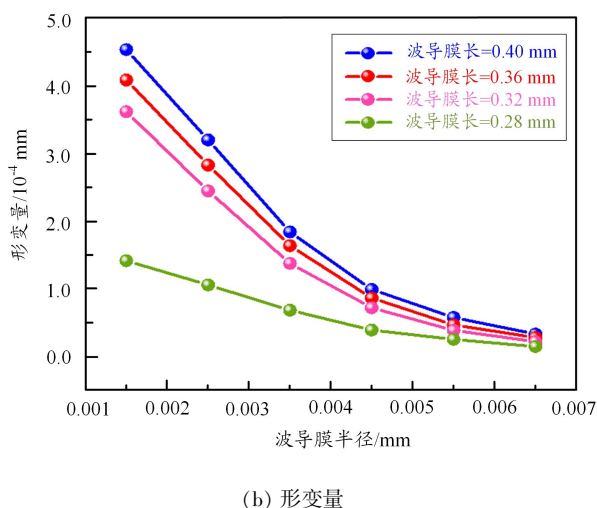


图5 波导膜半径和长度对传感器性能的影响

波导膜的半径越大,形变量越小;在半径确定的情况下,波导膜片越长,形变量就越大。在设计波导膜片时,如同考虑其半径和厚度一样,也需要充分考虑到实际情况,因此波导膜片的半径并非越小越好。由于波导膜片同样采用石英玻璃材料,考虑到加工的难易程度,其半径不宜设计得过小;即便技术上能实现小半径加工,也可能会导致波导膜片发生不必要的弯曲。至于波导膜片的长度,则需依据传感器探头的整体尺寸来设计,以确保整个结构的紧凑性。在保证整体尺寸合适的情况下可以适当增加波导膜片的长度。

2.3 宽频响双膜结构性能分析

当波导发生弯曲时,波导的有效折射率会随着弯曲半径的改变而变化。在弯曲状态下,折射率分布^[28]可表示为

$$n_{\text{eff}}(x) = n_0(x) \left(1 + \frac{d}{R} \cos \varphi \right) \quad (8)$$

其中, $n_0(x)$ 表示直波导中原始有效折射率的分布, R 表示波导膜片的弯曲半径, d 表示测试点距离纤轴的纵向距离。 φ 为波导横截面与 xy 平面的倾斜角。为了便于分析,根据几何原理,折射率变化最大处可用以下公式来表示。

$$\Delta n = \frac{2\omega D}{l_d} \quad (9)$$

其中, ω 为波导膜片中心点处的位移量, D 为波导膜片的直径, l_d 为波导膜片长度的一半。此时,仅考虑波导某一点的折射率变化。因此,可将折射率的变化与波导膜片的形变量近似为成正比关系,即形变量越大,折射率的变化越大。

根据前面仿真结果的分析,综合考虑制备材料和

工艺,本文最终确定波导膜片的半径为 $4 \mu\text{m}$, 长度为 $115 \mu\text{m}$, 超材料膜片的厚度为 $5 \mu\text{m}$, 直径为 $125 \mu\text{m}$ 。在设计出合适的双膜结构尺寸之后,将在不同的压力下研究波导膜片的放大作用。双膜结构(包括超材料膜片和波导膜片)与单膜结构(仅含超材料膜片)在不同压强下的形变量对比情况如图6所示。可以看出,相较于普通单个圆形膜片结构,双膜结构可以显著放大形变量。因此,当波导膜片产生线性弹光效应时,可以基于其放大效果实现较大的折射率变化。

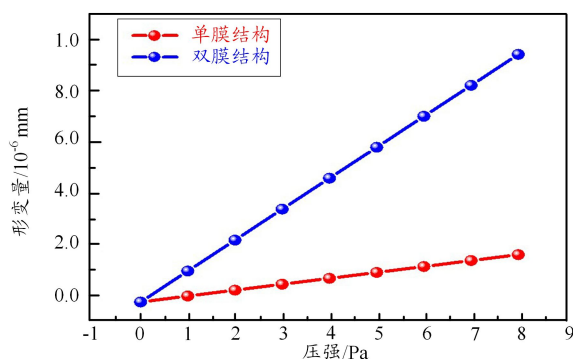


图6 双膜结构和单膜结构的形变量对比

在 1 kPa 的压力下,本文对设计的光学麦克风进行频率响应范围的测试。

在 $1 \text{ Hz} \sim 300 \text{ kHz}$ 内的测试结果如图7所示。可以看出,低于谐振频率时,在 $1 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$ 频率内的波动相对较小。在 1 Hz 时,膜片的总位移量为 28.5 nm ,而在 $1 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$ 频率内,膜片的平均总位移量为 35.2 nm 。在 100 kHz 之后,传感器的灵敏度开始大幅提高,并在 170 kHz 处达到最大值。此时,膜片的位移量可以达到 3443.8 nm 。这是因为声波的频率与光学麦克风的一阶谐振频率相同,所以灵敏度最高^[29]。

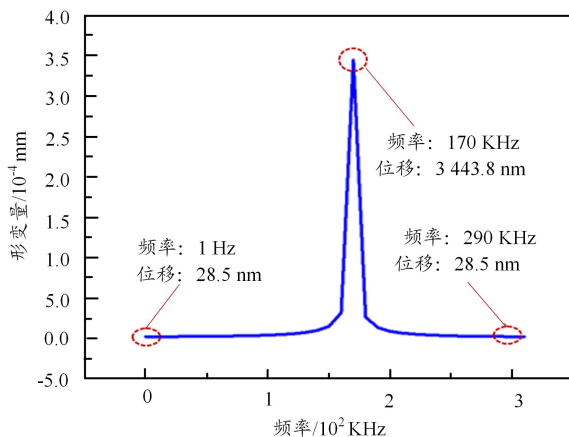


图7 光学麦克风频响范围

李群,陆云才,邵剑,等:一种基于双膜结构的宽频光学麦克风

2.4 双膜结构的宽频光学麦克风的制备和测试

本文利用3D打印技术制备了双膜结构的宽频光学麦克风。通过借助显微镜观察并测量其双膜结构得出,超材料膜片的直径为 $125\text{ }\mu\text{m}$,厚度为 $5\text{ }\mu\text{m}$,波导膜片的长度为 $115\text{ }\mu\text{m}$,半径为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。这与仿真设计的结构参数相同,这说明打印出的结构与设计的结构相差无几。

本文利用SM125测试了制备的光学麦克风的反射谱,测试结果如图8所示。对于F-P型光纤传感器,干涉条纹的对比度越高,干涉条纹越细,器件的性能越好。从图8可以看出,光学麦克风的反射谱呈现出标准的正弦波,在 1550 nm 波长附近,干涉条纹的对比度(正弦波的波谷和波峰的差值)约为 9 dB 左右,说明制备的器件性能相对较好。经计算得出的F-P腔腔长也在 $115\text{ }\mu\text{m}$ 左右,这说明器件没有出现非预期的干涉现象。光纤端面与超材料膜片端面共同构成了2个反射面,从而验证了腔长的理论预测与实际测量结果之间的高度一致性。

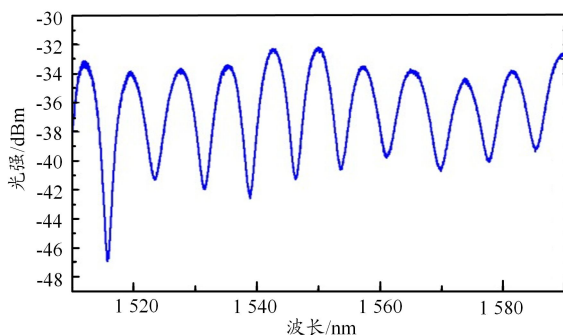


图8 光学麦克风反射谱

本文根据反射谱的测试结果找出光学麦克风的 Q 点,并对其声学特征进行表征和测试。利用正弦波信号模拟声信号,通过改变施加的声信号频率找出传感器实际的特征频率。经测试,当施加的声信号频率为 170 kHz 时得到的正弦波信号幅度最大,这说明该频率下传感器的灵敏度最大,因此制备出的声传感器的谐振频率为 170 kHz 。谐振频率下光学麦克风响应的时域信号图如图9所示,此时的时域信号是正弦波信号,且该正弦波的峰峰值约为 0.0022 V 。

图10为光学麦克风的灵敏度频率响应曲线图。可以看出,所制备的光学麦克风的谐振频率为 170 kHz ,谐振频率处的灵敏度为 $-242.8\text{ dB re } 1\text{ V}/\mu\text{Pa}$,且在 $160\sim 500\text{ kHz}$ 频率内均有响应。

为了进一步说明所设计的光学麦克风具备的宽频特性,本文将该光学麦克风与其它类型的声传感器

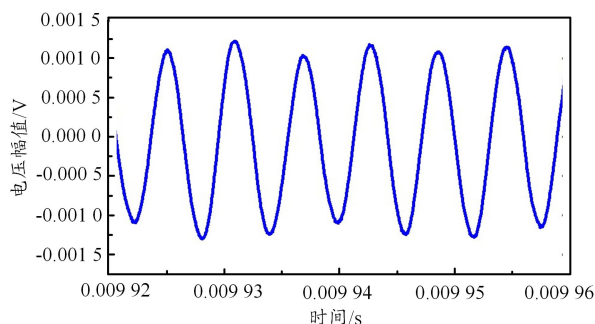
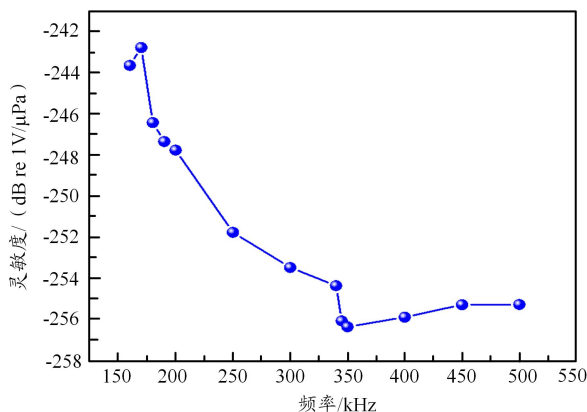
图9 光学麦克风在 170 kHz 频率下的时域信号

图10 光学麦克风的频率响应曲线

进行了对比,对比结果如表1所示。可以看出,本文设计的光学麦克风具有非常宽的平坦频率响应范围($350\sim 500\text{ kHz}$),远大于其它类型的声传感器。

表1 不同传感器的性能比较

参考文献	灵敏度	平坦响应范围
[14]	$-121.11\text{ dB re } 1\text{ rad}/\mu\text{Pa}@250\text{ Hz}$	$2\sim 250\text{ Hz}$
[15]	$-130.6\text{ dB re } 1\text{ rad}/\mu\text{Pa}@100\text{ Hz}$	$0.8\sim 250\text{ Hz}$
[30]	$-138.3\text{ dB re } 1\text{ V}/\mu\text{Pa}@1\text{ Hz}$	$1\sim 20\text{ Hz}$
[31]	$-160\text{ dB re } 1\text{ rad}/\mu\text{Pa}@100\text{ Hz}$	$0.5\sim 250\text{ Hz}$
本文	$-242.8\text{ dB re } 1\text{ V}/\mu\text{Pa}@170\text{ kHz}$	$350\sim 500\text{ kHz}$

3 结束语

本文设计了一种具有宽频响应和高灵敏度的光学麦克风声传感器。分析了双膜结构光学麦克风传感原理,研究了超材料膜片半径、厚度、波纹的深度和数量、波导膜片半径和长度对灵敏度和频响范围的影响。最后,利用COMSOL软件对传感器的性能进行了分析。仿真结果表明:所设计的光学麦克风在 170 kHz 时的灵敏度达到最大值,并且在 $1\text{ Hz}\sim 100\text{ kHz}$ 的频率内具有平坦的频率响应。相较于传统的传感器结构,

其频响范围得到了显著提升。鉴于其宽频响应的传感特性和全石英结构带来的化学与物理稳定性, 所设计的光学麦克风适用于电力、高温、强电磁干扰等恶劣环境的应用。

参考文献:

- [1] SHAO J, WANG Y, ZHENG Y, et al. Near-surface characterization using urban traffic noise recorded by fiber-optic distributed acoustic sensing[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 943424-1-943424-11.
- [2] XIA Y, LIU J-Y T, CUI X, et al. Abnormal infrasound signals before 92M $\geq$ 7.0 worldwide earthquakes during 2002-2008[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(4-5): 434-441.
- [3] SUWANASRI T, FUANGPIAN P, PANMALA N, et al. Partial discharge investigation on power cable termination using PD acoustic detection [C]//IEEE. *Proceedings of 2020 International Conference on Power, Energy and Innovations(ICPEI)*. Piscataway: IEEE, 2020: 97-100.
- [4] 张丽娜, 黄铎, 汪良杰, 等. 高灵敏硅凹槽膜片型光纤 F-P 局部放电超声传感器[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(5): 2-9.
- [5] 高建, 张浩然, 张可, 等. 高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测实验[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(1): 174-180.
- [6] MAHISSI M, TONG X, ZHANG C, et al. Study on the vibration performances for a high temperature fiber FP accelerometer[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 62: 102471-1-102471-10.
- [7] PAN R, YANG W, LI L, et al. High-sensitive fiber-optic pressure sensor based on Fabry-Perot interferometer filled with ultraviolet glue film and Vernier effect[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 67: 102710-1-102710-7.
- [8] 樊青青, 李俊红, 翟禹光, 等. 新型 MEMS 压电矢量水听器[J]. *声学学报*, 2023, 48(1): 102-111.
- [9] 蒋冰莉, 杨坤涛, 王江安, 等. MEMS 低频声传感器的设计与实验研究[J]. *激光与红外*, 2010, 40(10): 1096-1100.
- [10] 于砚廷, 苏伟, 王振, 等. 超低频声压水听器的设计仿真与测试[J]. *海岸工程*, 2019, 38(2): 96-104.
- [11] ZHAO X, BAI J, ZHENG Y, et al. Research on high-temperature characteristics of a miniature Fabry-Perot cavity acoustic sensor[J]. *Optics Express*, 2022, 30(15): 26609-26619.
- [12] ZHANG L, JIANG Y, GAO H, et al. Simultaneous measurements of temperature and pressure with a dual-cavity Fabry-Perot sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 106-109.
- [13] 韩世杰, 吕泽钦, 隋浩冉, 等. 基于 EFPI 传感器的 GIS 局部放电模式识别研究[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(1): 149-155.
- [14] ZHANG W, LU P, QU Z, 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.
- [15] FAN P, YAN W, LU P, et al. High sensitivity fiber-optic Michelson interferometric low-frequency acoustic sensor based on a gold diaphragm[J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 25238-25249.
- [16] XIANG Z, DAI W, RAO W, et al. A gold diaphragm-based Fabry-Perot interferometer with a fiber-optic collimator for acoustic sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(16): 17882-17888.
- [17] SI W, FU C, LI D, et al. Directional sensitivity of a MEMS-based fiber-optic extrinsic Fabry-Perot ultrasonic sensor for partial discharge detection[J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1975-1984.
- [18] LI S, ZHANG Y, MA C, et al. MEMS optical fiber F-P hydrophone based on corrugated PET diaphragm[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-10.
- [19] LIU B, ZHOU H, LIU L, 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.
- [20] LIU B, ZHENG G, WANG A, 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.
- [21] ZHANG D, WEI H, HU H, et al. Highly sensitive magnetic field microsensors based on direct laser writing of fiber-tip optofluidic Fabry-Perot cavity[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(7): 076112-1-076112-8.
- [22] ZHU C, CHEN Y, ZHUANG Y, et al. Optical interferometric pressure sensor based on a buckled beam with low-temperature cross-sensitivity[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(4): 950-955.
- [23] 杨文钊. 基于波纹膜片的高精度光纤激光水听器研究[D]. 广州: 暨南大学, 2017.
- [24] LIU B, ZHANG X, WANG A, et al. Optical fiber Fabry-Perot acoustic sensors based on corrugated PET diaphragms[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(13): 14860-14867.
- [25] LI H, LI D, XIONG C, et al. Low-cost, high-performance fiber optic Fabry-Perot sensor for ultrasonic wave [J]. *Detection Sensors*, 2019, 19(2): 406-416.
- [26] DASS S, KACHHAP S, JHA R. Hearing the sounds of aquatic life using optical fiber microtip-based hydrophone[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(7): 4015-4020.
- [27] 刘彬. 基于 Fabry-Perot 干涉仪的微型光纤声压传感器关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [28] 虞瑶. 微纳光纤弯曲传感器的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2023.
- [29] DASS S, JHA R. Tapered fiber attached nitrile diaphragm-based acoustic sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(24): 5411-5417.
- [30] 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.
- [31] FU X, LU P, ZHANG Z, et al. Micromachined extrinsic fabry-pérot cavity for low-frequency acoustic wave sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24300-24310.