

文章编号 1004-924X(XXXX)XX-0001-09

基于多孔式敏感膜片的MEMS光纤珐珀 传感器及其局部放电检测

司文荣¹, 傅晨钊¹, 卜剑², 倪鹤立¹, 李浩勇², 王谢君², 鞠登峰³, 虞益挺^{2*}

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437;

2. 西北工业大学 空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710072;

3. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 基于微机电系统(Microelectromechanical systems, MEMS)的非本征光纤珐珀超声传感器具有抗电磁干扰、信号传输距离远、体积小、重量轻等特点, 对电力设备中局部放电(Partial discharge, PD)所释放的超声信号有着良好的检测与定位能力, 具有十分广泛的应用前景。目前, 大多数已报道的该型传感器敏感结构通常为圆形完整膜片, 它的加工方法相对简单, 但是膜片的内外温度差异或压力不平衡会导致传感器性能指标的偏移, 减小或消除这种影响是促进光纤珐珀超声传感器工业化应用的基本前提。本文提出了一种基于多孔式敏感膜片的光纤珐珀超声传感器, 敏感膜片采用MEMS工艺制造, 其厚度仅有5 μm , 加工方法简单, 成本低廉; 进一步地, 结合3D打印技术与防水透声膜完成了敏感膜片的保护性封装。实验结果表明: 该传感器在液体中具有良好的超声响应, 静压灵敏度可达到1.25 V/Pa, 距离衰减、方向响应与静态压力等性能与空气中保持相同规律, 且通气孔避免敏感膜片内外出现气压不平衡的情况。因此, 该传感器在液体中局部放电检测领域展现出较好的应用潜力。

关键词: 微光机电系统; 局部放电; 珐珀超声传感器; MEMS敏感膜片

中图分类号: TN253 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.XXXXXXXX.0001

MEMS optic fiber Fabry-Perot sensors based on porous sensing diaphragms and applications for partial discharge detection

SI Wen-rong¹, FU Chen-zhao¹, BU Jian², NI He-li¹, LI Hao-yong²,

WANG Xie-jun², JU Deng-feng³, YU Yi-ting^{2*}

(1. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China;

2. Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace (Ministry of Education),

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd, Beijing 102209, China)

* Corresponding author, E-mail: yyt@nwpu.edu.cn

Abstract: MEMS (Micro-electromechanical systems) -based extrinsic optic fiber Fabry-Perot ultrasonic sensor has the characteristics of anti-electromagnetic interference. It has long signal transmission distance, small size, light weight, etc. Also, it has good detection and positioning ability for ultrasonic signals re-

收稿日期: 2021-04-01; 修订日期: 2021-04-20.

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (No. 52094019000S)

leased by partial discharge (PD). It has a very wide application prospect. Currently, most of the reported sensitive structures of this type of sensors are usually circular complete diaphragms. And they are relatively simple to process. But the temperature difference or pressure imbalance between the inside and outside will lead to deviation. So reducing or eliminating this effect is the basic prerequisite to promote the industrial application of sensors. In this paper, we propose an optic fiber Fabry-Perot ultrasonic sensor based on porous sensing diaphragm. In addition, it is manufactured by the MEMS process with thickness of only 5 μm . The results show that the sensor has good ultrasonic response in liquid. Moreover, the static pressure sensitivity can reach 1.25V/Pa. And the performance of distance decay, directional response all keep the same rule as in air. And pores can avoid the air pressure imbalance inside and outside the sensing diaphragm. Therefore, the proposed sensor shows a wide application potential in partial discharge detection in liquids.

Key words: Microoptoelectromechanical systems; Partial discharge; Fabry-Perot ultrasonic sensor; MEMS sensing diaphragm

1 引言

光纤珐珀传感器由于具有尺寸小、重量轻、精度高、耐高温、抗电磁干扰能力强等优势,被成功应用于压力、温度、声波等物理量的测量,在工业与军事领域具有广泛的应用前景^[1]。其中珐珀腔是传感器实现精准测量的关键,膜片式光纤珐珀传感器使用光纤端面与膜片作为珐珀腔的两个反射面,外界压力作用到膜片上使膜片发生形变从而改变珐珀腔腔长,通过对腔长的解调实现对外界信息的检测,通常选取硅、银或有机聚合物等材料制造高性能的膜片^[2-3]。近年来随着微机电系统(Microelectromechanical systems, MEMS)技术的迅速发展,作为珐珀腔反射镜一端的膜片应用该工艺可以变得更薄、加工精度更高、成本更低,而受迫形变范围更大,从而使得灵敏度更高^[4-7]。

局部放电(Partial discharge, PD)是高压电力设备中经常出现的绝缘失效现象,强烈的局部放电会使得电力设备绝缘设施强度剧烈下降,长期放电往往会产生绝缘击穿,导致绝缘设施损坏,产生极大的损失与危害,因此局部放电的检测对于高压电力设备运行十分重要。局部放电往往伴随着声、光、辐射、化学气体等现象,如会产生20 kHz到300 kHz的微弱超声波信号,通常的信号检测也是将其转化为较显著的其它物理量变化来描述放电状况。膜片式光纤珐珀超声传感器是采集局部放电发出的超声信号,根据膜片受

迫产生的形变,将声信号转化为光信号,从而可以通过光电探测器得到电压信号进行分析,理论上可以避免电磁干扰的影响,并且在精度与灵敏度方面也高于许多其它类型传感器,因此光纤珐珀超声传感器在局部放电的检测中有着较为广泛的应用潜力。近年来光纤传感器被大量报道,如用于局部放电检测的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)传感器^[8]、光纤迈克尔逊干涉(Fiber Michelson interference, FMI)传感器^[9]、外置油腔耦合局放超声非本征光纤法布里-珀罗传感器^[10]及用于温度检测的端面腐蚀的双法布里-珀罗光纤温度传感器^[11]。上述光纤传感器一些已经可以进行实际应用,光纤布拉格光栅传感器通过测量光谱分析仪中的波长偏移从而检测局部放电,可以应用到一些较低频段的超声检测;光纤迈克尔逊干涉传感器检测频率可达150 kHz,在近距离使用时有较大的应用潜力;外置油腔耦合局放超声非本征光纤法布里-珀罗传感器通过设计油腔内部安装方法从而使用光纤传感器有了更广泛的应用场景。但是有一些成本较高或制造过程复杂,如以黄金作为膜片材料、带宽可达150 kHz的光纤珐珀传感器^[5],或者仅能在电力设备外部安装使用,如传统的压电式超声传感器,给实际检测带来了较大困难。另外,高压电力设备中的局部放电经常处于变压器油等液体中,因此光纤珐珀超声传感器在液体中对局部放电的检测与定位在传感检测领域也是一个研究热点^[12-15]。

本文设计了一种新型多孔式超声检测用敏感膜片,并利用MEMS工艺在SOI(Silicon-On-Insulator)硅片的顶层硅上完成了所设计敏感膜片的高保真、低成本制造。进一步地,直接利用光纤跳线的端面与敏感膜片的表面作为珐珀腔的两个反射镜面,完成了光纤珐珀腔的构建。最后,通过在油中搭建实验平台测量了传感器的距离衰减、方向性以及静态压力响应特性,实验结果表明:该传感器在液体中可以稳定工作,对脉冲放电枪模拟的局部放电也有着良好的响应,对于局部放电的检测研究具有良好的应用前景。

2 传感器设计与制造

2.1 传感器工作原理

基于珐珀干涉(Fabry-Perot interference, FPI)原理的非本征珐珀干涉(Extrinsic Fabry-Perot interference, EFPI)传感器以光纤作为信号传输载体,利用光的干涉原理来检测局部放电产生的超声波信号。此种方法靠光信号进行传输,可以避免周围环境的电磁干扰。EFPI传感器可以深入到电力设备内部的绝缘介质中(比如变压器绝缘油)来检测PD发出的微弱超声波信号,灵敏度高,不受高压电磁场的影响,而且结构简单、安装方便,是一种有效的内置式电力设备PD在线监测或带电检测用传感耦合技术,是国内外研究的热点。

光纤珐珀超声传感系统的组成如图1所示,波长为1 550 nm的激光光源(北京中讯光谱科技有限公司, COSC-DFB-C-20)发出的光,经单模光纤与光纤环形器进入传感器探头,被膜片反射后又经光纤环形器进入光电探测器被转化为电信号,最终被示波器(美国泰克 Tektronix, MDO3024)采集显示。当局部放电释放出的超声波激励敏感膜片时,珐珀腔腔长因敏感膜片形变而改变,进而导致反射光的光强随之改变,通过采集处理光强的变化实现超声信号的探测。

2.2 传感器膜片设计

在设计敏感膜片时,首先需要根据实际应用场景,将膜片的固有频率设置在合适的区间。固

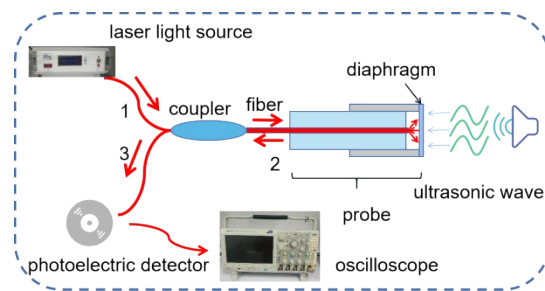


图1 光纤珐珀超声传感系统

Fig. 1 Optic fiber Fabry-Perot ultrasonic sensing system

有频率的计算通常如公式(1)所示:

$$f = \frac{ah}{4\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\mu^2)}} = \alpha \frac{h}{R^2}, \quad (1)$$

其中 a 为振型系数, ρ 为膜片材料的密度, R , h 分别为膜片的厚度与半径, E 是膜材料的弹性模量, μ 是其泊松比,由于材料的密度、振型系数、弹性模量与泊松比通常是不变的,因此用等效系数 α 来代替表示。从公式中可以看出,膜片固有频率与其厚度成正比,与半径的平方成反比。

当传感器接收到超声信号时,膜片因为受到声压的激励而发生中心形变,其形变公式由公式(2)给出:

$$y(p) = \frac{3(1-\mu^2)p}{16Eh^3} R^4 = \beta \cdot p \frac{R^4}{h^3}, \quad (2)$$

其中 p 是局部放电对膜片造成的声压,使用常数 β 作为等效系数代替公式中恒定的量。如公式(2)的右半部分所示,膜片受迫产生形变的程度与受到的压力、半径的四次方成正比,与厚度的三次方成反比。当形变量小于厚度的30%时,属于小挠度弯曲,这种情况下,膜片的形变量与其所受到的压力近似成线性关系,传统的圆形膜片光纤珐珀传感器探头如图2所示,其在温度变化较大时,珐珀腔内外压力不平衡,膜片会因此发生形变,从而对检测超声信号造成干扰,使得圆形膜片传感器无法应用到实际场景中。本文中提出了一种通过在圆形膜片的外围增加多个对称式通气孔,在不改变膜片半径与厚度的情况下,可以有效避免不平衡气压对测试结果造成的影响。研究证明:多孔式结构光纤珐珀传感器对温度的灵敏度较低,相比圆形膜片光纤珐珀传感器更适用于局部放电的检测研究。

传统圆形膜片在外界温度变化时,内外温度不平衡,会导致膜片发生形变,出现检测误差,图

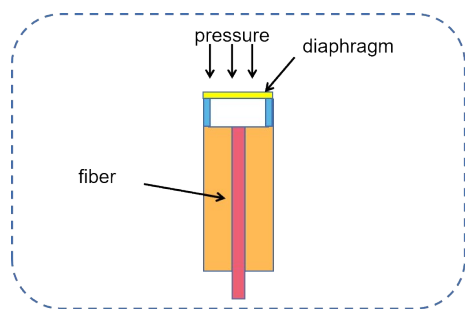


图2 膜片式光纤珀传感器探头示意图

Fig. 2 Diaphragm based optic fiber Fabry-Perot sensor probe diagram

3所示为传统圆形膜片因不同内外温差产生的气压差导致膜片发生的形变,本文中所研制的多孔式敏感膜片因为内外气压几乎一致,可以有效避免这个情况;另外,膜片受温度影响本身也会产生一定形变,通过仿真计算表明,在相同温度下,本文所研制的多孔式敏感膜片比传统圆形膜片形变小,且随着温度的升高,两者之间的形变差距越来越大,其结果如图4所示。

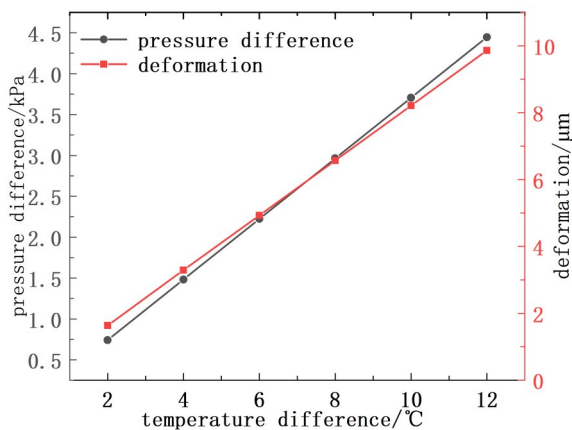


图3 温差造成的气压差导致的膜片形变

Fig. 3 Deformation caused by pressure difference due to temperature

使用有限元仿真软件COMSOL分析通气孔半径对敏感膜片固有频率的影响,以 $2\text{ }\mu\text{m}$ 为步长,仿真得到孔半径从 $2\text{ }\mu\text{m}$ 到 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的多孔式敏感膜片的固有频率。结果如图5所示,随着通气孔半径的增加,其固有频率在孔半径 $2\text{ }\mu\text{m}$ 到 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的区间内近似抛物线式降低。最终从工艺精度与固有频率两方面考虑,加工时将通气孔的半径设置为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

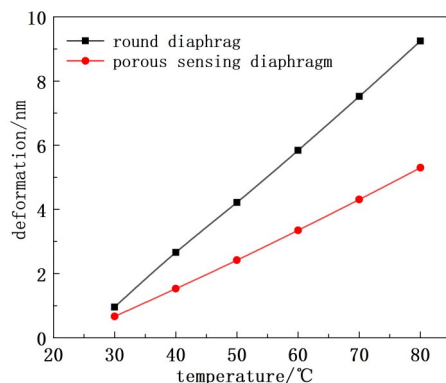
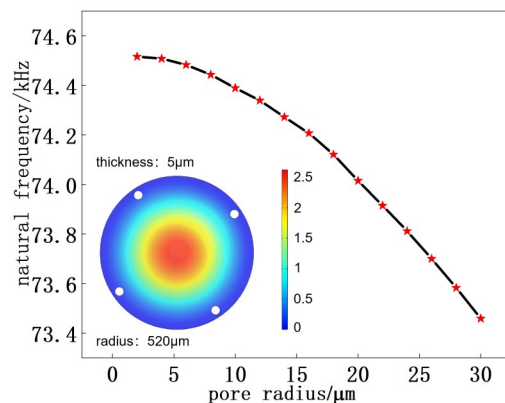


图4 温差导致的膜片形变

Fig. 4 Deformation caused by temperature difference

图5 不同孔半径的多孔式敏感膜片固有频率仿真结果
Fig. 5 Simulation results of natural frequency of porous sensing diaphragm with different hole radius

2.3 膜片加工与制造

在探头的装配中,为了使光纤与膜片最中央对准并且不会损伤到膜片本身,特意在MEMS膜片制造工艺中进行分步刻蚀得到阶梯状结构膜片。采用SOI硅片,如图6(a)所示,顶层为5微米厚的硅层,中间为1微米厚的二氧化硅层,底层是500微米厚的硅。加工前对SOI硅片进行清洗,去除表面的氧化物,得到洁净的硅片。加工首先在顶层硅上刻蚀出通气孔,底层硅上刻蚀出一定厚度的大孔,再以二氧化硅为截止层,在大孔的基础上刻蚀得到小孔,并且不会出现过刻蚀情况对敏感膜片造成影响,然后使用HF去除二氧化硅层,最后,进行镀金膜,即可得到阶梯状结构,其工艺流程如图6所示,

图6中阶梯状膜片大孔直径为 2.5 mm ,与直径为 2.5 mm 的单模光纤刚好嵌合,便于装配的

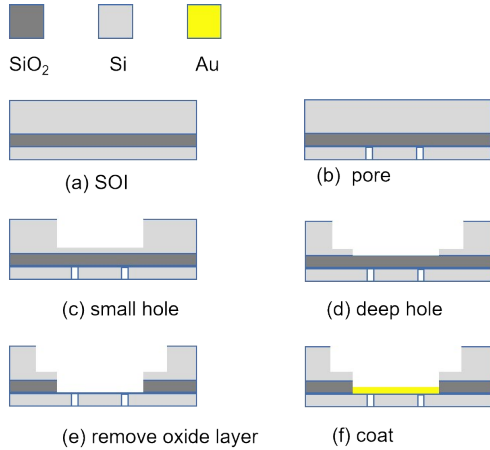


图6 多孔式敏感膜片MEMS工艺制作流程

Fig. 6 Production process of porous sensing diaphragm MEMS technology

同时有利于光纤端面的定位;顶层硅表面镀了一层金属膜,通常使用金,因其具有良好的化学稳定性,将金属镀层与光纤端面作为珐珀腔的两个反射端面。图7为敏感膜片样件及其扫描电镜图。

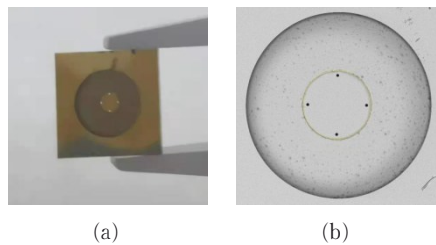


图7 多孔式敏感膜片样件(a)及其扫描电镜图(b)

Fig. 7 Porous sensing diaphragm sample (a) and its scanning electron microscope image (b)

2.4 传感器探头装配

由于油液进入珐珀腔后会使得传感器失效,因此需要进行保护性封装。本文研究中,主要使用定制的3D打印外壳,将传感器探头固定在外壳里,在膜片与外界接触处粘贴防水透声膜(亚源泰科技有限公司,微孔滤膜),由于防水透声膜过于单薄,很容易损坏,因此在透声膜外使用3D打印制作的透声外壳进行防护。另外,在光纤与密封外壳的连接处会因为结构原因存在空隙,使用环氧胶(米占科技有限公司,1102德国树脂AB胶)做密封处理。

对于膜片与光纤的连接固定,常用的方法有:环氧胶粘合、阳极键合与激光热熔等方式^[16]。其中阳极键合虽然有键合强度高、密封性好等优点,但是其过于苛刻的实现条件与对材料的要求使其无法大规模生产,且造价昂贵;激光热熔一般指CO₂激光热熔法,适用于光纤的固定,在热熔过程中需要对连接部分进行热处理,操作复杂并且通常专门针对石英材料,有一定的局限性。本文采用环氧胶粘合方式,简单方便,价格便宜,普通环氧胶固化后耐热在110摄氏度左右(局部放电中产生的温度最高约90摄氏度),且固化过程中无明显异味,粘结力强,密封性也满足要求,因此可以应用在检测局部放电的传感器探头制作中。

由于敏感膜片的厚度只有5 μm,相对而言体积非常小,因此在利用光纤端面与膜片形成珐珀腔时,需要较高的装配精度,既要保证膜片与光纤之间连接牢固,珐珀腔维持在理想长度;又要防止膜片被破坏,因此本研究在珐珀腔的装配时使用高精度位移平台进行调控。首先使用3D打印的夹持装置将光纤尾端与膜片对准固定,通过光谱仪(北京波威科技有限公司,I-MON USB)获得光谱图,如图8所示,根据光谱图计算出珐珀腔腔长,然后通过精密位移平台调节光纤位置,直至获得最优的反射光强与所需腔长,最后进行胶封。图9中所示为传感器探头及其成品图。

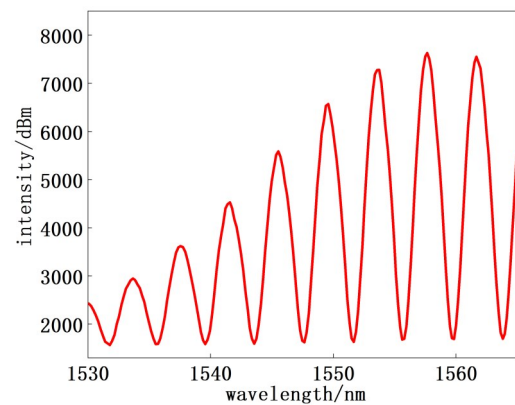


图8 光纤珐珀传感器反射光谱

Fig. 8 Reflection spectrum of optic fiber Fabry-Perot sensor

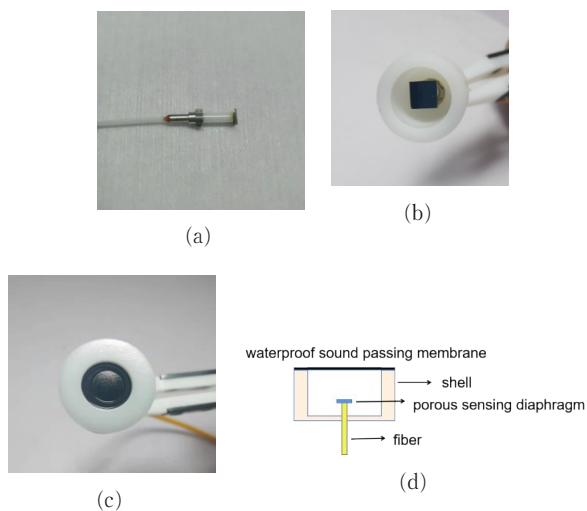


图9 多孔式敏感膜片传感器探头实物图(a)、未封装图(b)、传感器成品图(c)及示意图(d)

Fig. 9 Physical view of porous sensing diaphragm sensor probe (a), unencapsulated view (b), Finished sensor package view (c) and sketch view (d)

3 实验结果与分析

3.1 实验设置

在实验过程中,使用可以发射出固定频率和幅值超声波信号的函数发生器作为声源,向传感器探头发射标准正弦超声波信号。在实验容器中以密度为 400 kg/m^3 的变压器油作为液体介质,封装的环氧胶粘合与防水透声膜可以密封与保护传感器探头,使油液不会进入到琥珀腔而导致传感器失效。函数发生器驱动的声源可以在液体中发射稳定的标准超声波信号,便于传感器的性能测试。

传感器的距离衰减与静态压力性能测试装置如图10所示,整个探测系统其余部分保持不变,探头分别放置于装满油液的塑料管与玻璃烧杯中,塑料管上标有刻度方便调节探头与声源之间的距离;静态压力测试中,使用无外壳封装的探头,调节杆可以控制探头在液体中的深度,通过密度公式(3)来计算在某一位置时的静态压力,其中 ρ 为液体密度, h 为探头端面浸在液体中的深度, g 为重力加速度,

$$P = \rho gh. \quad (3)$$

3.2 传感器静态压力性能测试

传感器静态压力指直接对传感器施加特定

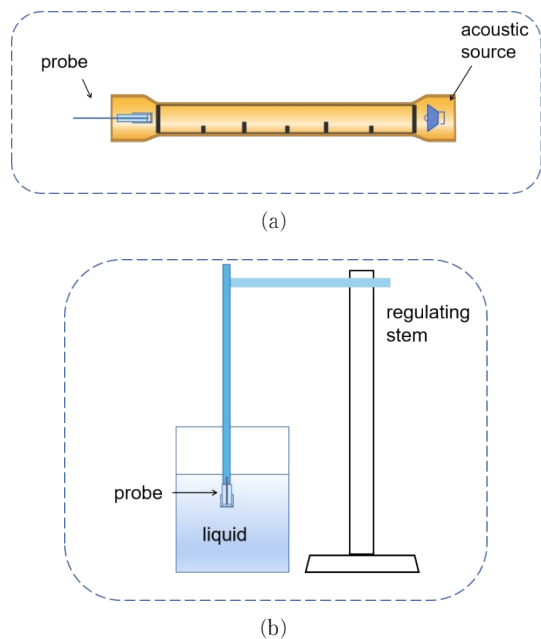


图10 实验装置示意图. 传感器输出信号随距离衰减测试装置(a)传感器输出信号随静态压力变化测试(b)

Fig. 10 Schematic diagram of the experimental setup.

Sensor output signal decay test device with distance
(a) Sensor output signal with static pressure change test (b)

大小的压力时,传感器输出信号随压力增加的波动变化。由于在测量静态压力时,需要将传感器探头直接浸入液体中,膜片与液体直接接触,实验在0到 $400 \mu\text{m}$ 内进行,将测量步长设置为 $50 \mu\text{m}$,同一个深度多次测量取平均值。

在小挠度弯曲情况下,膜片中心形变与压力是线性关系,则根据腔长可唯一确定出对应的压力。如图11所示,在测量范围内,传感器得到的电压幅值变化与其在液体中的深度成线性关系,即与感受到的静态压力成线性关系,灵敏度达到 1.25 V/Pa ,并可以保持长时间稳定工作。

3.3 传感器距离衰减与方向响应性能测试

传感器距离衰减指传感器输出信号随探测距离变化产生的波动变化;方向响应指输出信号随探头与声源之间夹角变化产生的波动变化。距离衰减测试实验中,研究多孔结构式EFPI传感器在液体中一米以内的距离衰减,始终将传感器探头与声源置于同一水平线上,通过函数发生器产生在传感器固有频率附近的超声信号,将探头与声源分别放置在不同刻度处,以 10 cm 为步

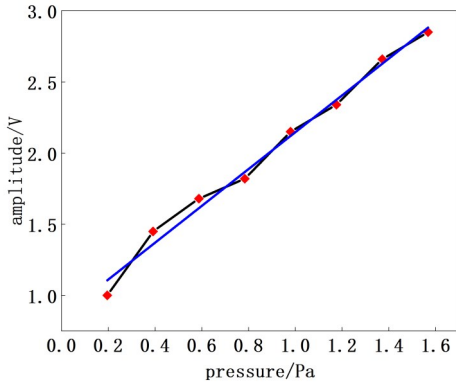


图11 多孔式敏感膜片EFPI传感器液体中的静态压力响应

Fig. 11 Static pressure response of porous sensing diaphragm EFPI sensors in liquids

长,测试探头与声源从对准到1 m处的信号幅度。将探头与声源无间隙对准时,使用函数发生器生成标准正弦波超声信号,示波器上显示出标准正弦曲线,对测量所得数据进行快速傅里叶变换,即可将时频曲线转化为所需要的幅频曲线。

图12中展示了时频曲线与转化后的幅频曲线。观察幅频曲线可以发现:在接收到给定频率的信号后,信号幅值远高于噪声幅值,因此传感器具有良好的信噪比。

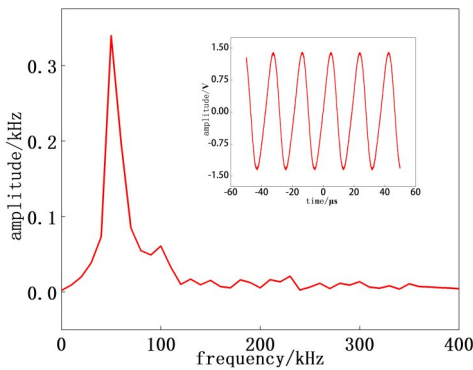


图12 多孔式敏感膜片EFPI传感器在液体中对于标准正弦波信号的幅频响应曲线

Fig. 12 Amplitude-frequency response curve of porous sensing diaphragm EFPI sensor in liquid for standard sine wave signal

另外,使用脉冲放电枪在距离传感器探头1m处模拟局部放电产生超声信号,可得到如图13所示的结果,从图中可以发现,所研传感器对局部放电产生的超声信号具有良好的检测

能力。

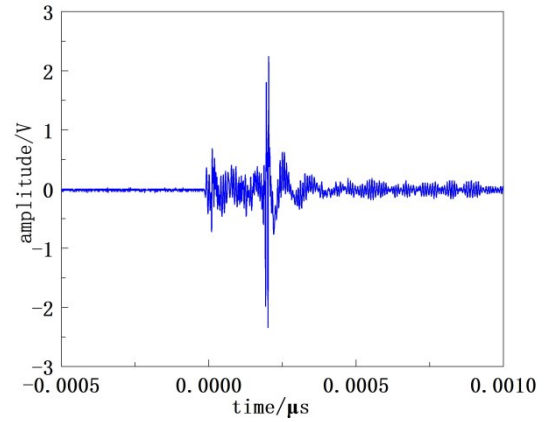


图13 多孔式敏感膜片EFPI传感器对脉冲放电枪放电响应曲线

Fig. 13 Response curve of porous sensing diaphragm EFPI sensor for discharge released by pulse discharge gun

对不同距离处测量得到的幅值结果如图14所示,进行拟合处理后可以发现测量得到的电压幅值与距离在0~20 cm之间可看作线性相关,20 cm以后随着距离成指数形式衰减,拟合得到指数函数为,

$$V = e^{-\frac{d}{30}}. \quad (4)$$

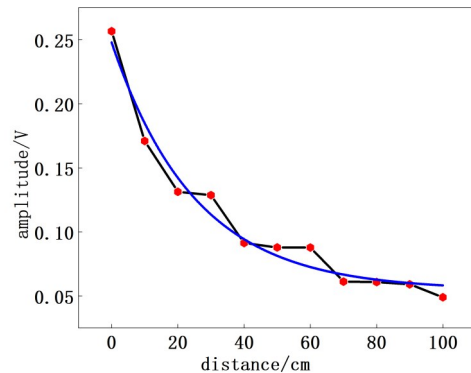


图14 多孔式敏感膜片EFPI传感器在液体中依据探测距离的信号变化

Fig. 14 Porous sensing diaphragm EFPI sensor in liquid based on the signal change of the detection distance

与之前在空气中探测结果^[4]相比,得到的电压幅值有所减弱,电压幅值与距离相关性与空气中基本一致,因此提升传感器性能可从放大接受

到的信号方面考虑。

测量传感器的方向响应时,将探头固定于液体中,通过移动声源来改变声源与探头之间的夹角和位置,测量从 0° 到 180° 间的方向响应测量角度步长为 30° , 90° 方向为声源正对探头位置。

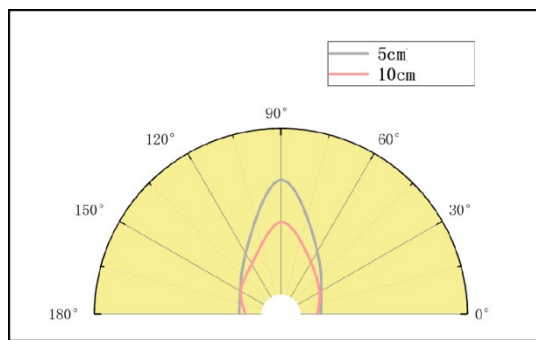


图 15 多孔式敏感膜片 EFPI 传感器液体中 5cm、10cm 距离时的方向响应

Fig. 15 Directional response of porous sensing diaphragm EFPI sensor at a distance of 5cm and 10cm in liquid

实验结果如图 15 所示,结果表明:当探头与声源正对时响应幅度最大,在侧面相应幅度减小,改变两者之间的距离时,可以得到相同的结果,因此在液体中 EFPI 传感器对不同方向上的信号识别能力较强,使用单个探头结合方向响应结果可大致确定液体中局部放电与探头夹角方

向,如需进行定位,可使用多个探头以三角定位法大致确定局部放电的位置。

通过传感器的距离衰减与方向响应测试可以发现:输出信号在距离增加时主要以指数形式衰减,在一定范围内可以看作线性衰减,因此测量时可以通过信号衰减形式判断出放电位置与探头之间的大致距离,且在声源正对探头时输出信号幅值最大,向两侧偏移时逐渐减小,实际应用过程中需要通过调整探头方向获得最佳信号输出。

4 结 论

面向光纤珐珀超声传感器的多孔式敏感膜片既有效避免了完整膜片内外压的不平衡,又有着同尺寸下几乎不弱于圆形完整膜片的固有频率,对信号测量无显著影响,同时利用 MEMS 工艺可制造出仅有 $5\text{ }\mu\text{m}$ 厚的敏感膜片,敏感膜片上的通气孔可以使得内外气压保持平衡。另外,在装配时使用环氧胶粘合方式,并利用 3D 打印技术进行保护封装,操作简单,价格低廉。通过在液体中的性能测试表明研制的传感器具有较好的距离衰减与方向性响应。同时静态压力测试结果表明:膜片在静压力的作用下,灵敏度可达 1.25 V/Pa ,在局部放电检测领域有着较大的应用潜力。

参考文献:

- [1] 姚维强,司文荣,吕佳明,等. EFPI 光纤超声传感器及其潜在局放检测应用综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1855-1866.
YAO W Q, SI W R, LÜ J M, *et al.* Review on EFPI fiber-based ultrasonic sensors and its potential-partially partial discharge detection application [J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(6): 1855-1866. (in Chinese)
- [2] MA J, XUAN H F, HO H L, *et al.* Fiber-optic Fabry-Pérot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(10): 932-935.
- [3] LIU B, LIN J, WANG J, *et al.* MEMS-based high-sensitivity Fabry - Perot acoustic sensor with a 45° angled fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(5): 581-584.
- [4] SI W R, FU C Z, LI D L, *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.
- [5] ZHANG W, LU P, NI W J, *et al.* Gold-diaphragm based Fabry - Perot ultrasonic sensor for partial discharge detection and localization [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 1-12.
- [6] FU C Z, SI W R, LI H Y, *et al.* A novel high-performance beam-supported membrane structure with enhanced design flexibility for partial discharge detection [J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 593-604.
- [7] YAACOB M M, ALSAEDI M A, RASHED J R, *et al.* Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors [J]. *Photonic Sensors*, 2014, 4

- (4): 325-337.
- [8] WU Q, OKABE Y. High-sensitivity ultrasonic phase-shifted fiber Bragg grating balanced sensing system[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28353-28362.
- [9] ZHANG T Z, PANG F F, LIU H H, *et al.* A fiber-optic sensor for acoustic emission detection in a high voltage cable system [J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2026.
- [10] 陈起超, 赵洪, 张伟超. 外置油腔耦合局放超声非本征光纤法布里-珀罗传感器[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(7): 1471-1479.
- CHEN Q C, ZHAO H, ZHANG W C. External oil cavity coupled with EFPI partial discharge ultrasonic detection sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(7): 1471-1479. (in Chinese)
- [11] 冯文林, 彭进, 余佳浩, 等. 端面腐蚀的双法布里-珀罗光纤温度传感器[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(4): 766-770.
- FENG W L, PENG J, YU J H, *et al.* Double Fabry-Pérot fiber optic temperature sensor based on end-face corrosion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 766-770. (in Chinese)
- [12] 黄俊, 文溢, 姜飞, 等. 光纤F-P腔传感器特性研究[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(4): 68-70.
- HUANG J, WEN Y, JIANG F, *et al.* Research on characteristics of optical fiber F-P cavity sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(4): 68-70. (in Chinese)
- [13] 李敏. 液体电介质局放声测的光纤非本征法珀型传感器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.
- LI M. *Fiber Extrinsic FP Sensor for Detection of PD-induced Acoustic Emission in Liquid Dielectrics* [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [14] 高超飞, 宋树, 童中宇, 等. 基于EFPI光纤超声传感器的油中局部放电定位[J]. *高压电器*, 2019, 55(4): 90-95, 101.
- GAO CH F, SONG SH, TONG ZH Y, *et al.* Partial discharge location in oil based on EFPI optical fiber ultrasonic sensor[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(4): 90-95, 101. (in Chinese)
- [15] 罗勇芬, 李彦明, 刘丽春. 基于超高频和超声波相控接收原理的油中局部放电定位法仿真研究[J]. *电工技术学报*, 2004, 19(1): 35-39.
- LUO Y F, LI Y M, LIU L CH. Simulation of PD location method in oil based on UHF and ultrasonic phased array receiving theory [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2004, 19(1): 35-39. (in Chinese)
- [16] 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.
- WANG Q Y. *Study on Fiber Optic Fabry-Pérot Acoustic Sensor and its Application* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)