

激光与光电子学进展

基于膜片式光纤法布里-珀罗传感器的超声波检测

鞠玲^{1*}, 翁蓓蓓¹, 牛锡玲², 邓传鲁², 黄恽²¹国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司, 江苏 泰州 225300;²上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444

摘要 为了研究光纤传感器在超声波检测方面的应用,提出了一种膜片式光纤法布里-珀罗(F-P)传感器的结构和制备方法。首先探究了声场中放置距离和角度对膜片式光纤F-P超声传感器的声振动敏感膜片形变量的影响,仿真得到光纤F-P传感器的传感效果随距离、角度的增加而下降,然后提出了一种基于熔接、切割、抛磨方式制备的膜片式光纤F-P超声传感器,最后对该传感器的传感性能进行了实验验证。实验结果显示,提出的传感器的频率探测范围为20~80 kHz,信噪比不小于25 dB。此传感器的制备使用全焊接方式,与传统的胶连接方式相比,结构更稳定,使用寿命更长,因此在电网局部放电检测等场景中具有广泛的应用前景。

关键词 光纤光学与光通信; 光纤法布里-珀罗传感器; 膜片; 超声波; 信噪比

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221726

Ultrasonic Detection Based on Diaphragm Optical Fiber Fabry-Perot Sensor

Ju Ling^{1*}, Weng Beibei¹, Niu Xiling², Deng Chuanlu², Huang Yi²¹State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Taizhou Power Supply Company, Taizhou 225300, Jiangsu, China;²Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract In order to study the application of optical fiber sensors in ultrasonic detection, a diaphragm optical fiber Fabry-Perot (F-P) sensor, including its structure and fabrication method, is proposed. In this study, the influence of the placement distance and angle on the acoustic vibration sensitive shape change of the diaphragm optical fiber F-P sensor is first investigated. The sensing effect of the sensor decreases with an increase in the distance and angle. Then, a method to fabricate the diaphragm optical fiber F-P sensor based on welding, cutting, and polishing is proposed. Finally, the sensing performance of the sensor is experimentally verified. The experimental results show that the frequency detection range of the proposed sensor is 20–80 kHz, and the signal-to-noise ratio is not lower than 25 dB. This sensor is prepared using an all-welded method, which provides it with a more stable structure and longer service life than one prepared using the traditional adhesive connection method. Therefore, the proposed sensor can be used for a wide range of applications, such as partial discharge detection in power grids.

Key words fiber optics and optical communication; optical fiber Fabry-Perot sensor; diaphragm; ultrasonic wave; signal-to-noise ratio

1 引言

气体绝缘开关(GIS)设备具有运行稳定性高、占地面积小、可扩展性强及检修维护方便等特点^[1-3],是输电网络的重要组成部分,其可靠性对于保障电力系统安全稳定运行具有重要意义^[4]。由于局部放电是GIS发

生绝缘故障的重要征兆和表现形式,因此通过对GIS局部放电信号进行检测,可以及时有效地发现GIS内部存在的缺陷,从而实现故障预警。局部放电常伴随着光、超声波及电磁辐射等现象发生^[5-8],通过对这些参量的检测可以实现局部放电信号的测量。目前常用的电检测方法主要有脉冲电流法^[9]、超高频检测法^[10]以及超

收稿日期: 2022-05-30; 修回日期: 2022-07-01; 录用日期: 2022-07-14; 网络首发日期: 2022-07-24

基金项目: 国网泰州供电分公司2021年科技项目(J2021224)、上海市自然科学基金面上项目(22ZR142300)

通信作者: *juling163@163.com

声波检测法^[11]等,而基于光纤法布里-珀罗(F-P)传感器的超声波检测法属于非电检测法,具有抗电磁干扰的优势,且能够用于传统电声传感器难以正常工作的高温、高压、强电磁等环境,因此得到了广泛研究。

光纤 F-P 传感器通常采用声振动敏感膜片与光纤端面所构成的谐振腔结构,因此敏感膜片材料一直是研究人员研究的焦点之一。2013 年, Ma 等^[12]制备了灵敏度为 2380 nm/kPa 的石墨烯膜片 F-P 传感器,石墨烯膜片的厚度仅为 4.615 nm,但膜片与毛细管端面的连接仅靠范德华力吸附,难以在户外长时间使用。2014 年,徐峰等^[13]使用有效直径 2.4 mm 的大直径圆形银膜片制备了灵敏度为 160 nm/Pa 的 F-P 传感器,虽然其灵敏度较高,但银作为一种导电金属材料,在高电压环境中的应用受到限制。2020 年,张蔚等^[14]在光刻胶上利用电子束蒸发技术制备出厚度仅为 300 nm 的金膜,基于此金膜的 F-P 传感器最远探测距离可达 3 m,金膜片与毛细管端面采用 353ND 胶剂进行粘结,但由于其热膨胀系数的差异,导致传感器产生较大的测量误差。同年, Yao 等^[15]提出了一种基于光机微谐振器的超小型光纤声学传感器,该谐振器采用光学 3D 微打印技术直接在标准单模光纤的端面上制备,其制备方式复杂、成本较高。2021 年,郭珉等^[16]在硅膜片上制备悬臂梁,使其在 0.01~3 Pa 的声压作用下具有 0.99995 的线性度,但是硅与光纤端面的集成工艺极其复杂^[17],大大增加了传感器的制备难度。

因此,本文研究了一种用于超声波检测的膜片式光纤 F-P 传感器。首先,采用 COMSOL 软件建立声源模型,探究了声源与传感器之间距离、角度对传感效果的影响。然后,利用熔接、切割、抛磨等工艺实现了光纤 F-P 传感器的制备,并测试了由此方法制备的光纤 F-P 传感器对标准超声信号的传感性能。最后实验验证了声场中放置距离和角度对膜片式光纤 F-P 超声传感器的信噪比的影响。此传感器的声振动敏感膜片为石英材料,与光纤材料具有良好的一致性,同时仅利用熔接、切割、抛磨等简单工艺,即有效提升了传感器的寿命和稳定性。另外,分析了声源与膜片角度以及声源与膜片间距离对膜片形变量的影响,对传感器的实际应用具有一定的参考价值。

2 光纤 F-P 传感器工作原理

图 1 为光纤 F-P 传感器结构示意图,其主要由膜片、毛细管和单模光纤(SMF)组成,当光在 SMF 中传输时,一部分光从 SMF 端面反射,另一部分光入射到 F-P 腔,经膜片反射后再入射到 SMF。因此,SMF 中总的反射光强度 $I^{[18]}$ 可以写为

$$I(\lambda, L) = \left[R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n_0 L}{\lambda}\right) \right] \cdot I_0(\lambda), \quad (1)$$

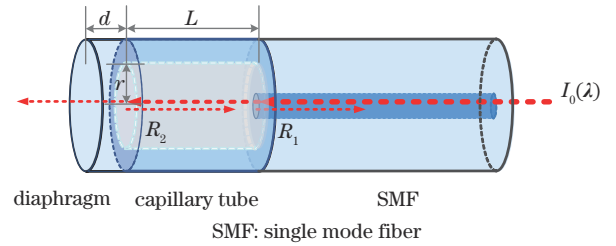


图 1 光纤 F-P 传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber Fabry-Perot (F-P) sensor

式中: R_1 和 R_2 分别为 SMF 端面和膜片端面的反射率; n_0 为 F-P 腔内空气的折射率; L 为 F-P 腔的长度; $I_0(\lambda)$ 为入射波长为 λ 时的入射光强。

由式(1)可知,反射光强是关于 F-P 腔长的一个余弦函数。当超声波作用到光纤 F-P 传感器时,膜片受到压力作用产生形变,相应地,其反射光谱也发生偏移。当膜片的弹性形变小于其厚度 d 的 30% 时,其形变与压力成正比^[19]。对于膜片的中心点,其压缩形变的最大值^[20]可以表示为

$$\Delta L_{\text{MAX}} = \frac{3(1-u^2) \cdot P}{16Ed^3} \cdot r^4, \quad (2)$$

式中: r 和 d 分别为膜片的有效半径和厚度; u 和 E 分别为膜片材料的泊松比和杨氏模量; P 为作用在膜片上的压强大小。

光纤 F-P 声传感器传感机理示意图如图 2 所示,原始超声波信号作用在膜片上时引起膜片振动,继而造成 F-P 腔长在干涉光谱图的线性区间 AB 内来回振荡变化,相应地,干涉光强随腔长振荡变化,从而得到了原始声波信号与光强变化信号的转换。F-P 原始腔长处在工作点 Q 时,其光强变化率最大,即传感器灵敏度最高。

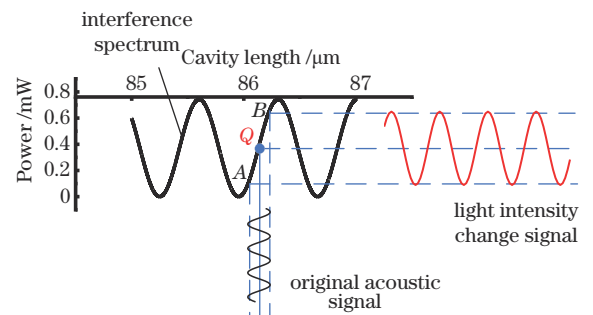


图 2 光纤 F-P 腔声传感器传感机理图

Fig. 2 Sensing mechanism diagram of optical fiber F-P cavity acoustic sensor

3 膜片在声场中的仿真

3.1 声压模型的建立

本文采用 COMSOL 仿真软件中的声固耦合模块对膜片在超声波作用下的形变情况进行仿真,其中压

力学模块产生超声波和声压,固体力学模块使膜片产生形变。如图 3(a)所示,首先设置一球体作为声场边界,球体内充斥空气,作为声波传输介质;球体内包含一个单极点声源和一个侧边为固定边界的石英膜片。在仿真过程中,改变声源与膜片间的相对位置,如图 3(b)所示,探究声场中放置距离和角度对膜片式光

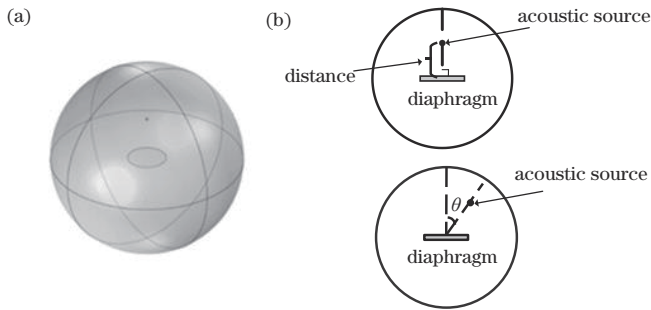


图 3 模拟声场的建立。(a) 声场与膜片的三维仿真模型;(b) 声源与膜片的相对位置变化

Fig. 3 Establishment of simulated acoustic field. (a) 3D simulation model of acoustic field and diaphragm; (b) changes in position of acoustic source relative to diaphragm

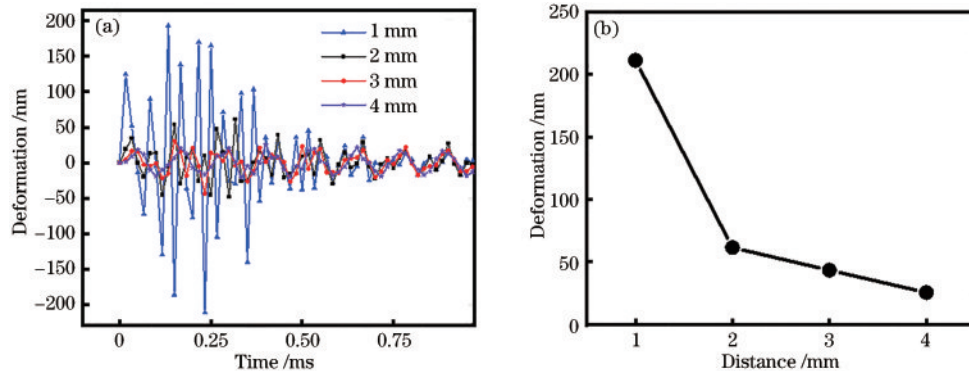


图 4 膜片形变量与距离的关系。(a) 不同距离下的膜片形变;(b) 膜片最大形变量随距离的变化趋势

Fig. 4 Relation between deformation of diaphragm and distance. (a) Deformation of diaphragm at different distances; (b) relation between maximum deformation of diaphragm and distance

3.3 膜片形变量与角度的关系

由于声音具有方向性,因此保持声源与膜片中心距离为 3 mm 不变,改变声源与膜片法向角 θ ,探究膜片形变与角度的关系。图 5 的仿真结果显示,声源与膜片法向角 θ 为 0° 时,石英膜片中心形变量为 43.28 nm,而当 θ 增大到 90° 时,石英膜片中心形变量仅为 0.48 nm。这是因为当 θ 减小时,声源产生的声压在石英膜片上的有效作用面积增大。根据作用力与压强关系,声源产生的声压相同时,有效作用面积越大,膜片中心承受的作用力越大,因此膜片中心的形变量越大。

从上述仿真结果可知,在实际使用时,应使传感器端面正对声源,同时传感器的放置应尽量靠近声源,以达到最佳的传感效果。

纤 F-P 超声传感器的声振动敏感膜片形变量的影响。在研究放置距离与声振动敏感膜片形变量的关系时,保持声源在膜片中心正上方,调整二者间距;在研究放置角度与声振动敏感膜片形变量的关系时,保持声源与膜片中心距离不变,调整二者角度。

高斯脉冲是研究瞬变场常用的激励信号,其时域形式^[21]可表示为

$$Q_s = A \exp[-\pi^2 f_0^2 (t - t_p)^2], \quad (3)$$

式中:参数 A 表示声源强度,仿真时设置为 $1 \text{ m}^3/\text{s}$;参数 f_0 表示脉冲带宽,仿真时设置为 80 kHz;参数 t_p 表示此高斯脉冲最高值出现的时间点,仿真时设置为 $20 \mu\text{s}$ 。

3.2 膜片形变量与距离的关系

将声源置于膜片中心正上方,探究二者的距离对膜片形变量的影响。如图 4(a)所示,石英膜片中心点的形变量在超声波作用下呈现震荡衰减趋势,当声源与膜片中心的距离从 1 mm 依次增加到 4 mm 时,膜片的最大形变量则从 211.26 nm 降低到 25.39 nm。图 4(b)进一步给出了膜片最大形变量与距离的关系,图中表明,当声源距离膜片越近时,其作用在膜片上的声压越大,因此膜片的最大形变量也越大。

4 传感器制备

本文采用二氧化硅膜片作为声振动敏感膜片,且此膜片通过 SMF 制备所得。传感器的制作主要包括熔接、切割和抛磨等主要冷加工工艺技术流程,首先,将 SMF 与毛细管进行端对端熔接,如图 6(a)所示;接着,利用切割刀切割毛细管,如图 6(b)所示;然后,重复第一步操作,再次熔接毛细管与 SMF,并切割 SMF,如图 6(c)和 6(d)所示。此时传感器已完成初步制作,形成了非本征型 F-P 腔,但 SMF 长度过长,在探测超声波时难以引起形变从而改变腔长,因此需要对右侧 SMF 进行端面抛磨,如图 6(e)所示,减小 SMF 长度,使之成为石英膜片。光纤 F-P 传感器中,SMF 的直径为 $125 \mu\text{m}$,毛细管外径为 $150 \mu\text{m}$,内径为 $75 \mu\text{m}$,因此膜片的有效直径为 $75 \mu\text{m}$ 。

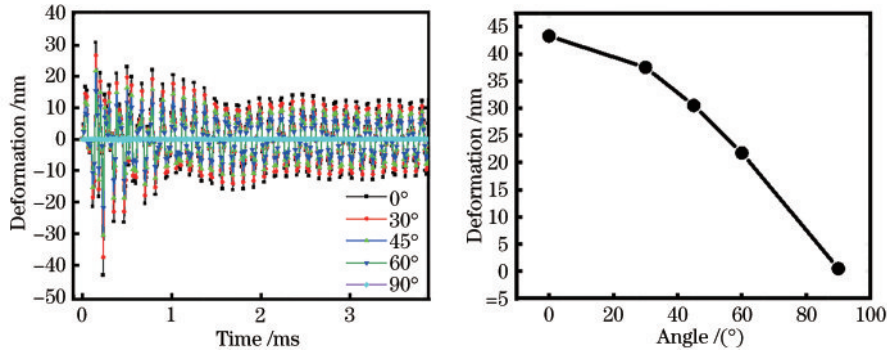


图 5 膜片形变量与角度的关系。(a) 不同角度下的膜片形变;(b) 膜片最大形变量与角度关系

Fig. 5 Relation between deformation of diaphragm and angle. (a) Deformation of diaphragm at different angles; (b) relation between maximum deformation of diaphragm and angle

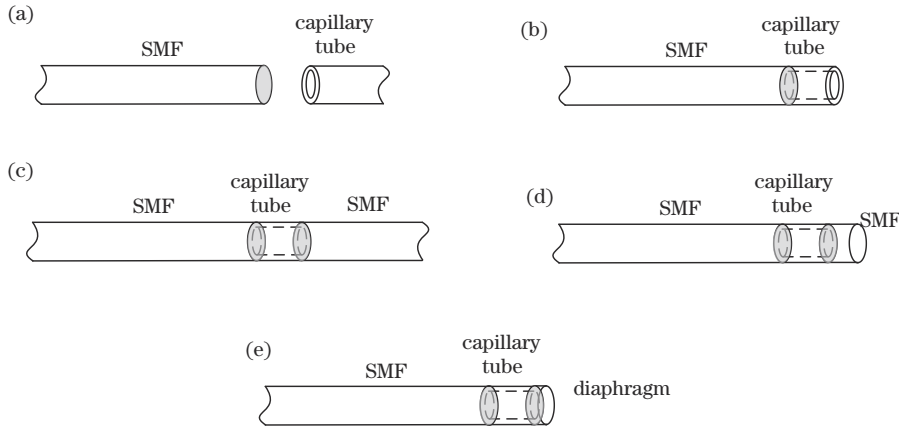


图 6 传感器制备过程示意图。(a) 第一次熔接;(b) 第一次切割;(c) 第二次熔接;(d) 第二次切割;(e) 抛磨

Fig. 6 Schematic diagram of sensor preparation process. (a) Welding for the first time; (b) cutting for the first time; (c) welding for the second time; (d) cutting for the second time; (e) polishing

毛细管右侧 SMF 抛磨前的长度过长,使其作为膜片时不仅难以在超声信号作用下产生形变,还易使 F-P 传感器形成空气-石英双介质复合 F-P 腔^[22],而复合 F-P 腔的形成使得光纤 F-P 传感器的光谱难以保持标准的余弦形状,影响传感器解调。抛磨 SMF 外端面后,SMF 长度从 116.97 μm 减小到 30.27 μm ,形成了石英

膜片,如图 7(a)所示。本文采用磨料粒度为 8000 目、粗糙度为 1 μm 的抛磨砂纸对膜片外端面进行抛磨,抛磨操作在减小膜片厚度的同时也增加了石英膜片外表面的粗糙度。由于端面散射随表面粗糙度增大而增大^[23],因此当膜片外端面粗糙度较大时,端面散射也较大,镜面方向散射光斑的光能则较弱,导致石英膜片外端面

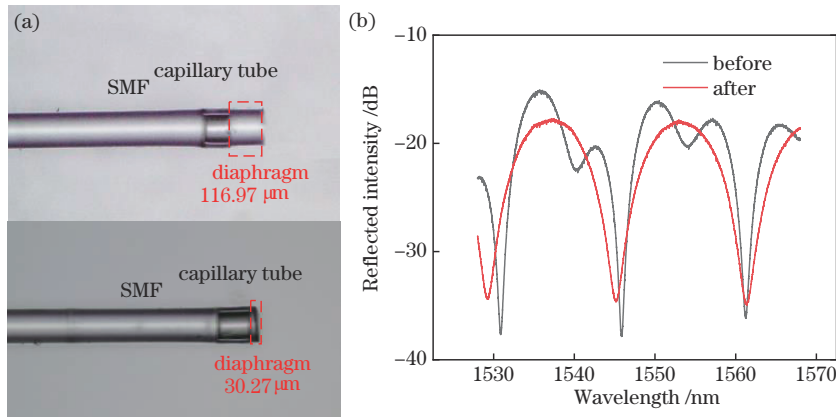


图 7 打磨前后的传感器实物图及其光谱图。(a) 打磨前后实物图;(b) 打磨前后的传感器光谱图

Fig. 7 Images of sensor and its spectra before and after polishing. (a) Images of sensor before and after polishing; (b) spectra of sensor before and after polishing

无法形成良好的反射效果^[24],从而避免空气-石英双介质复合 F-P 腔结构的形成。如图 7(b)所示,抛磨后的光纤 F-P 传感器的反射光谱较抛磨前更平滑。

4 实验

实验室制备了 5 个膜片式光纤 F-P 传感器,其结构参数如表 1 所示,抛磨前膜片厚度 d_0 相差较大,而抛磨后的膜片厚度 d_p 为 $27 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$,此制备方法使膜片厚度具有一致性。

表 1 样品参数

Table 1 Sample parameters

Sample No.	Cavity length L	Initial film thickness d_0	Polishing thickness d_p
1	90.82	31.65	24.08
2	94.95	38.53	27.52
3	83.94	116.97	30.27
4	85.32	63.30	30.96
5	85.32	59.17	28.90

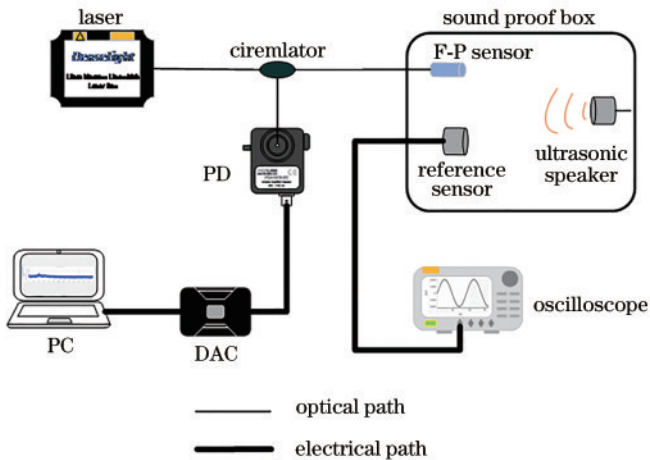


图 8 光纤 F-P 超声传感系统原理图

Fig. 8 Schematic diagram of optical fiber F-P ultrasonic sensing system

将单频声信号应用到传感系统中进行实验验证。利用数字信号发生器(DG4102, RIGOL)将电压峰峰

图 8 为光纤 F-P 超声传感器系统原理图,窄线宽激光器(DL-CLS101B-S1550-LW10, DenseLight)发出波长为 1550 nm 的连续光,通过环形器传输到光纤 F-P 传感器,经传感器的反射光再经环形器传输到光电探测器(PDA20CS2, THORLABS)中被转换成电信号,最终通过数据采集卡(USB3200, 阿尔泰科技公司)对电信号进行采集,并传输到计算机进行数据处理、显示和保存。

值为 5 V、频率分别为 20、40、60 kHz 的正弦波信号施加到声发射传感器(40-CT, FUS)上,此时声发射传感器的发射声压值约为 1.875 Pa。光纤 F-P 传感器在距离声发射传感器 30 cm 处作为信号接收端,所监测的电信号输出和频谱如图 9 所示,其频谱曲线分别在 20、40、60 kHz 频率点处急剧上升,信噪比(SNR)分别为 46.10、50.43、41.69 dB。结合光纤 F-P 超声传感器位置处的声压和电信号输出幅度,计算可得传感器灵敏度为 0.0424 nm/Pa。

保持信号电压峰峰值为 5 V 不变,依次调节数字信号发生器,使频率从 20 kHz 升到 80 kHz,记录 SNR,即可获得光纤 F-P 传感器的频响范围。1~5 号光纤 F-P 传感器的频响范围测试结果如图 10 所示,所有传感器样品均能在 20~80 kHz 频率范围内保持 SNR 高于 25 dB,且在 35 kHz 处达到 SNR 的最大值。除了样品 4 因熔接处有轻微塌陷而影响了传感效果外,其余样品在 35 kHz 处的 SNR 均超过了 65 dB,其中样品 1 的 SNR 达到了 66.45 dB。

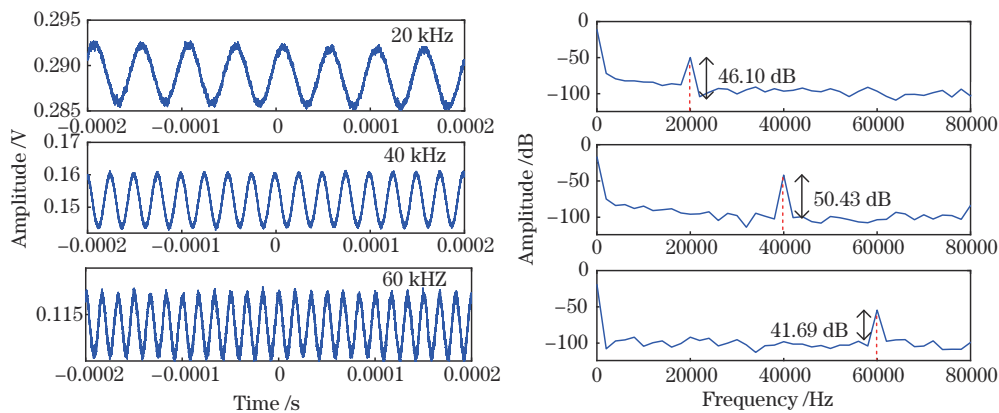


图 9 20、40、60 kHz 的时域和频域信号

Fig. 9 Time-domain and frequency-domain signals of 20, 40, and 60 kHz

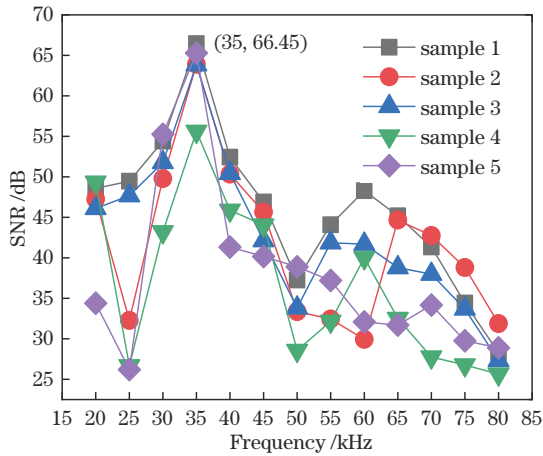


图 10 F-P 超声传感器的频率响应范围
Fig. 10 Frequency response range of F-P ultrasonic sensor

本文所制备的 5 个样品的工作点如图 11 所示。经理论分析可知,本文传感器的参数中影响传感效果的是腔长和膜片的厚度。比较表 1 中样品 4 和样品 5 的参数和图 10 的传感效果可知,在腔长一致的情况下,膜片厚度更薄的样品 5 的传感性能优于样品 4,符合理论推导得出的膜片越薄,传感器传感效果越好的结论。比较表 1 中样品 3 和样品 4 的参数和图 10 的传感效果可知,在膜片厚度基本一致的情况下,工作点更接近 Q 点的样品 3 的传感性能优于样品 4,符合理论推导得出的传感器原始腔长越接近 Q 点,传感器传感效果越好的结论。因此,实验结果与理论推导一致。

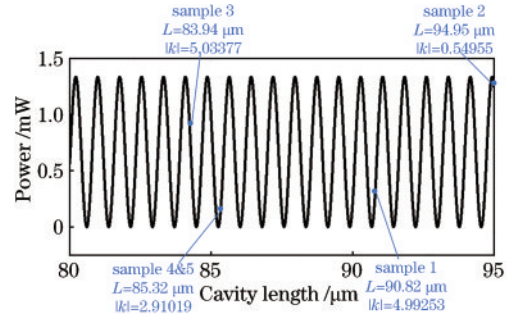


图 11 各传感器样品工作点位置
Fig. 11 Working point position of each sensor sample

利用数字信号发生器将电压峰峰值为 5 V、频率为 40 kHz 的正弦波信号施加到声发射传感器上,转换为声波信号,如图 12 所示。声发射传感器端面与 1 号光纤 F-P 传感器端面中心的法向角 θ 分别为 0° 、 30° 和 60° ,距离从 0.5 cm 开始依次增加 1 cm,如图 12(a) 内插图所示,得到不同距离时传感系统输出的 SNR 结果。图 12(a) 所示结果显示,在相同角度下,所得信号的 SNR 随距离增加而下降,且下降速度逐渐减慢。保持传感器与声源之间距离分别为 1、2、3 cm,调整角度,如图 12(b) 内插图所示,得到不同角度时传感系统输出的 SNR 结果。图 12(b) 所示结果显示,在相同距离下,所得信号的 SNR 随角度增加而下降,且下降速度逐渐增加。因此在传感器的实际使用过程中,应尽量避免传感器距离声源过远和角度过偏的情况,否则将严重影响传感器的使用效果。

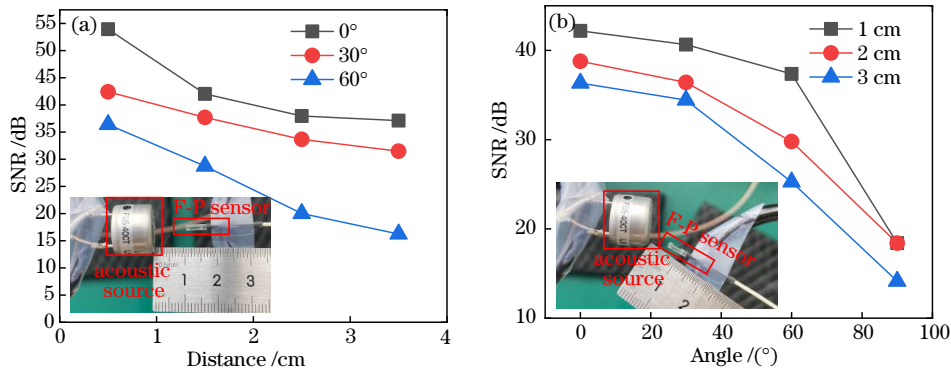


图 12 距离与角度对传感效果的影响。(a) 不同距离下的 SNR; (b) 不同角度下的 SNR
Fig. 12 Influence of distance and angle on sensing effect. (a) SNR at different distances; (b) SNR at different angles

为验证本文提出的光纤 F-P 超声传感系统在电力场景下的超声检测能力,本文参照国家电网公司企业标准《局部放电超声波检测仪技术规范》(Q/GDW11061-2017)设计并加工了 GIS 模拟放电装置,如图 13 所示,GIS 模拟罐体直径为 260 mm,其内部能承受 0.4 MPa 的气体压力,且设有绝缘良好的高压电极和接地极,高压电极导杆可调,可通过调整电极间隙以改变局部放电量。使用 GIS 模拟装置进行放电,在 GIS 模拟装置的高压电极处加压,使其与接地电极间产生极高电势差,从而击穿两电极间介质,产生局部放

电。本实验基于针板放电缺陷模型进行测试,且光纤 F-P 超声传感器置于 GIS 模型内部,同时将电流互感器(CT)穿过地线,用于同步监测局部放电的产生。

从 0 开始依次增加高压电极上的电压,使两电极间发生局部放电,传感器采集到的数据传输到示波器上,记录示波器上显示的电压波形。图 14(a)、14(b) 分别为电极施加 4.7 kV 和 5.1 kV 的 50 Hz 交流电压时光纤 F-P 传感器和 CT 捕捉到的局部放电信号,由检测结果可知,在局部放电产生时,光纤 F-P 超声传感器能有效检测到超声信号。

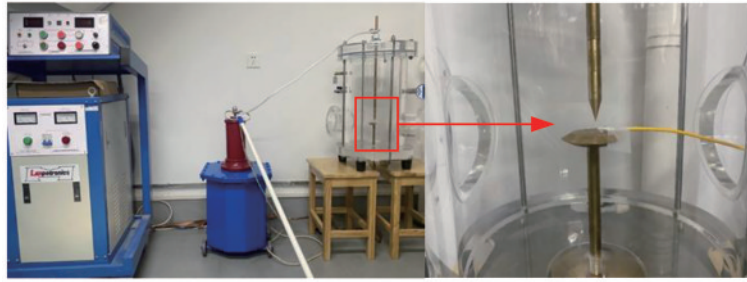


图 13 GIS 局部放电模拟装置
Fig. 13 GIS partial discharge simulation device

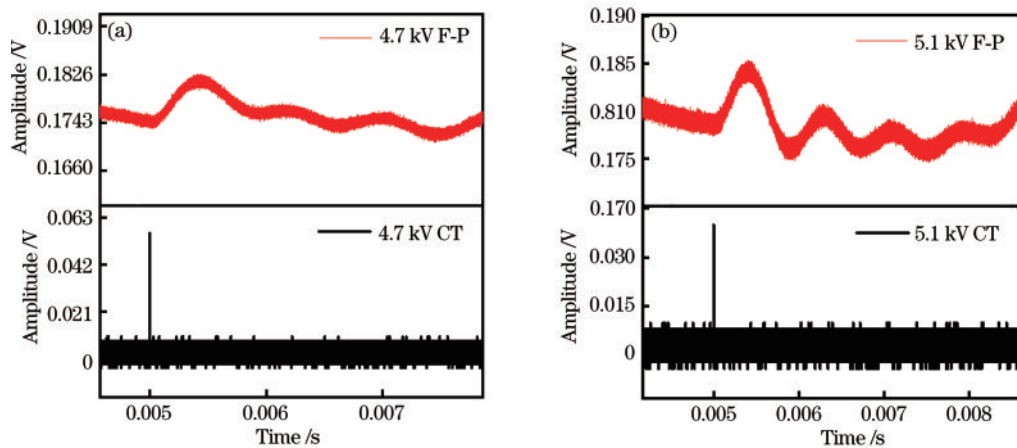


图 14 F-P 传感器与 CT 的局部放电检测结果。(a) 施加 4.7 kV 电压;(b) 施加 5.1 kV 电压
Fig. 14 Partial discharge detection results of F-P sensor and current transformer (CT). (a) 4.7 kV voltage is applied;
(b) 5.1 kV voltage is applied

本文与其他类似光纤声波传感器的性能指标对比如表 2 所示。由表中对比可知,参考文献[12]、[14]和[25]中的非石英材料膜片通常使用胶粘方式与传感器其他组件进行连接,而本文制备的光纤 F-P 超声传感器采用的膜片材料与光纤一致,能够使用焊接方式实现连接,从而延长传感器使用寿命,更适合应用于环境复杂的电力电场环境中。另外,本文制备的光纤 F-P 超声传感器的加工方式为传统的光纤加工方式,制备工艺成熟

简单且成本低廉,有望实现批量的工业化生产。由于本文传感器的小型化,其膜片的有效半径均小于参考文献[12]、[14]和[25],因此在传感器灵敏度方面略逊色于其他大面积膜片的传感器,但是通过实验结果可以看到,本文传感器能够有效探测到局部放电超声信号,因此本文所制备的光纤 F-P 超声传感器具有实际探测的能力。在今后的研究中,将通过镀介质膜或利用基于声标原理的双腔结构实现灵敏度的进一步提升。

表 2 光纤声波传感器性能指标对比

Table 2 Comparison of performance indexes of optical fiber acoustic sensor

Reference	Diaphragm material	Diaphragm size effective radius/thickness	Sensitivity	Fabrication method (difficulty)
[12]	Graphene	62.5 μm /4.615 nm	2.38 nm/Pa	Graphene separation and transfer (hard)
[14]	Gold	1.25 mm/300 nm	0.279 nm/Pa	Electron beam vapor deposition method (hard)
[25]	Silk fibroin	63.5 μm /20 μm	0.0123 nm/Pa	Chemical generation (hard)
Proposed	Quartz	37.5 μm /24 μm	0.0424 nm/Pa	Optical fiber processing (easy)

5 结 论

提出了一种用于超声波检测的膜片式光纤 F-P 传感器,该传感器仅使用光纤熔接、切割和抛磨等冷加工方法在石英管端面制备石英膜片,组件间的连接摆脱传统的胶粘方式,制备简易且结构稳定。传感性

能实验证明,该传感器的频率响应范围为 20~80 kHz,此频率范围内的 SNR 均不低于 25 dB,具有良好的传感效果,特别地,在 35 kHz 时 SNR 高达 66.45 dB。在距离、角度对传感器的传感效果影响实验中,确定了传感器应尽量靠近且正对声源才能达到最佳的传感效果,为传感器在实际使用中的放置位置

提供参考。在实际应用中,该传感器材质安全、制备简易、结构稳定,有望在高压电网中的局部放电检测等领域得到广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Yoo W J, Cho D H, Jang K W, et al. Infrared fiber-optic sensor for non-contact temperature measurements[C]//2008 3rd International Conference on Sensing Technology, November 30-December 3, 2008, Taipei, China. New York: IEEE Press, 2008: 500-503.
- [2] Kaufmann B, Kudoke M, Großmann S. Experimental verification of convective heat transfer computations for gas insulated switchgear[C]//2013 4th International Youth Conference on Energy (IYCE), June 6-8, 2013, Siófok, Hungary. New York: IEEE Press, 2013.
- [3] 周鑫, 鲁铁成, 罗容波, 等. 气体绝缘组合电器触头电接触状态检测与评估方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 217-224.
Zhou L, Lu T C, Luo R B, et al. Detection and evaluation method of electrical contact state in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 217-224.
- [4] Zhang J Y, Zhang J Q, Li N, et al. Simulation research on the temperature field of GIS circuit breakers based on finite element analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 53-61.
- [5] Parent G, Rossi M, Duchesne S, et al. Determination of partial discharge inception voltage and location of partial discharges by means of Paschen's theory and FEM[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 1-4.
- [6] Han T, Su J G, Ma T T, et al. Partial discharge characteristics during treeing process in silicone rubber at 20 and $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 7700904.
- [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] Zhu P, Wen H Q, Che Q, et al. Disturbed partial discharge detection system based on an improved Φ -OTDR assisted by a wFBG array[J]. Applied Optics, 2020, 59(14): 4367-4370.
- [9] He C, Zhang L, Zhang X R, et al. Study on the influence of switching impulse superposition phase on AC partial discharge of epoxy surface in SF_6 gas[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1596-1598.
- [10] Li J H, Han X T, Liu Z H, et al. A novel GIS partial discharge detection sensor with integrated optical and UHF methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 2047-2049.
- [11] Li H Y, Lv J M, Li D L, et al. MEMS-on-fiber ultrasonic sensor with two resonant frequencies for partial discharges detection[J]. Optics Express, 2020, 28(12): 18431-18439.
- [12] Ma J, Xuan H F, Ho H L, et al. Fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10): 932-935.
- [13] Xu F, Shi J H, Gong K, et al. Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaphragm[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2838-2840.
- [14] 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): 6801612.
- [15] Yao M, Zhang Y X, Ouyang X, et al. Ultracompact optical fiber acoustic sensors based on a fiber-top spirally-suspended optomechanical microresonator[J]. Optics Letters, 2020, 45(13): 3516-3519.
- [16] Guo M, Chen K, Yang B L, et al. Ultrahigh sensitivity fiber-optic Fabry-Perot interferometric acoustic sensor based on silicon cantilever[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9511908.
- [17] 沈诗, 魏鹤鸣, 王俊, 等. 3D 打印光纤法布里-珀罗腔声发射传感器[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906004.
Shen S, Wei H M, Wang J, et al. 3D printing optical fiber Fabry-Perot cavity acoustic emission sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906004.
- [18] Guo M, Chen K, Gong Z F, et al. Trace ammonia detection based on near-infrared fiber-optic cantilever-enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. Photonic Sensors, 2019, 9(4): 293-301.
- [19] Wang C, Liu X Q, Kuan P W, et al. Similar to $1\text{ }\mu\text{m}$ laser output based on heterogeneous fiber with Yb^{3+} -doped fluorophosphate core and phosphate cladding[J]. Materials Letters, 2016, 179: 9-11.
- [20] di Giovanni M. Flat and corrugated diaphragm design handbook[M]. New York: M. Dekker, 1982.
- [21] Hua X C, Mu H B, Zhang Y M, et al. Simulation of ultrasonic wave propagation of partial discharge in converter transformer[C]//2021 Power System and Green Energy Conference, August 20-22, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2021: 708-712.
- [22] Liu X Y, Jiang J F, Wang S, et al. A compact fiber optic Fabry-Perot sensor for simultaneous measurement of acoustic and temperature[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 7104710.
- [23] 刘金泽. 多层光学薄膜散射特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2020: 26-30.
Liu J Z. Study on scattering characteristics of multilayer optical thin films[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020: 26-30.
- [24] Tian J J, Lu Y J, Zhang Q, et al. Microfluidic refractive index sensor based on an all-silica in-line Fabry-Perot interferometer fabricated with microstructured fibers[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 6633-6639.
- [25] Cheng L H, Wang C Z, Huang Y Y, et al. Silk fibroin diaphragm-based fiber-tip Fabry-Perot pressure sensor[J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19600-19606.