

用于局部放电检测的光纤 Fabry-Perot 声传感器

黄小花¹, 安静¹, 李瑾¹, 王丽黎^{2*}

(1. 国家电网宁夏电力有限公司, 银川 750002; 2. 西安理工大学, 西安 710077)

摘要: 目前的研究工作都集中在如何提高法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 传感器的灵敏度和线性响应度, 而传感器的方向响应性在局部放电定位中的研究较少。对基于微机电系统 (MEMS) 的 F-P 声传感器的方向灵敏度进行了实验研究, 制作了膜片厚度为 5 μm 的 F-P 声传感器, 并测量和分析了来自不同入射角和线性距离的放电源的声信号。实验结果表明: 该传感器在 $\pm 60^\circ$ 入射范围内具有 5.90 dB 的振幅波动, 信噪比高, 使其具备 3 m 以外检测微弱局部放电信号的能力。

关键词: 光纤传感器; 法布里-珀罗; 声传感器; 局部放电

中图分类号: TN818 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)02-0066-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.02.013

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Optical fiber Fabry-Perot acoustic sensor for partial discharge detection

HUANG Xiaohua¹, AN Jing¹, LI Jin¹, WANG Lili^{2*}

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750002, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710077, China)

Abstract: The current research work focuses on how to improve the sensitivity and linear response of Fabry Perot (F-P) sensor, while the directional response of the sensor is less studied in partial discharge location. The directional sensitivity of F-P acoustic sensor based on micro electro mechanical system (MEMS) is experimentally studied. The thickness of diaphragm is 5 μm , and the acoustic signals from discharge sources with different incident angles and linear distances are measured and analyzed. The experimental results show that the sensor has 5.90 dB amplitude fluctuation and high signal-to-noise ratio in the incident range of $\pm 60^\circ$, which makes it capable of detecting weak partial discharge signals beyond 3 m.

Key words: fiber optic sensor, Fabry-Perot, acoustic sensor, partial discharge

0 引言

基于振膜结构的光纤非本征法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 传感器具有灵敏度高、体积小、通用性强和抗电磁干扰等优点被广泛研究^[1]。这些传感器已经成功用于声波、振动、温度、压力、折射率和应变等物理量的检测^[2]。其中, 膜片作为 F-P 传感器的重要结构, 对传感器的性能尤其是灵敏度起着至关重要的作用,

这些膜片的材质通常是硅、银、聚合物或石墨烯等^[3-4]。在一定的共振频率下, 半径小、厚度薄的膜片将会发生较大的形变^[5], 这样的膜片具备检测微弱信号的能力。此外, 快速发展的微机电系统 (MEMS) 技术在膜片制造、器件组装和大规模生产方面体现了巨大的优势^[6-7]。

精确检测电气设备中局部放电产生的声波, 并进一步对其进行定位, 这对于预防电力系统灾难性故障至关重要^[8-10]。因此, 声传感器应具有对声压变化的线性响应^[11]; 同时, 考虑到声音的传播特性和环境噪声, 声传感器的带宽应覆盖 40~300 kHz 的频率范围^[12]。然而, 当灵敏度为 67.01 nm/Pa、共振频率为 3 kHz 时, 传感器的超声响应会受限制^[4]。当灵敏度为 3.9 nm/kPa、共振频率为 242 kHz 的声传感器也可能无法检测大入射范围内的低声压和响应^[13], 这使灵敏度和声共振频

收稿日期: 2021-03-14。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61771389) 资助。

作者简介: 黄小花 (1978—), 女, 汉族, 河南开封人, 硕士, 国家电网宁夏电力有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力营销管理、核算、服务, 电力业务应用系统适应性改造方面。2018 年参与了《具有票据计算与监测功能的电力自助终端》专利研究。

* 通信作者: 王丽黎 (1968—), 女, 研究生学历, 硕士学位, 副教授, 主要研究方向为信号传输与检测等。



率之间需要有一个折中。因此, 在局部放电引起的超声频率范围内制造具有高灵敏度的膜片至关重要。此外, 在超声波的宽入射角范围内, 传感膜片应具有相对平坦的角度响应, 这种平坦的角度响应有利于局部放电位置的精确定位和减少定位所需传感器的数量^[1], 这在以前的研究中很少被考虑。此外, 传感器的方向响应也会受到 F-P 腔对准方式和封装材料的影响。因此, 本文对基于 MEMS 的高灵敏度 F-P 声传感器在不同入射角和线性距离方向的灵敏度进行时域测量和分析。

1 传感原理

局部放电检测的声传感系统如图 1 所示。中心波长为 1550 nm、带宽为 0.1 nm 的入射光经过耦合器到声传感器探头, 从 F-P 腔反射回来的光将发生干涉, 在不同的声压 p 下, F-P 腔的膜片将会对反射光光强进行调制^[9], 膜片的中心形变 $y(p)$ 可以表示为

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

其中, h 和 R 分别是膜片的厚度和半径, E 和 μ 分别是膜片材料的弹性模量和泊松比。光电探测器收集反射回来的光并将其转换为电流, 经过放大电路和滤波处理后, 电压信号 V_{out} 由数据采集装置 (DAQ) 采集^[14] 可得

$$V_{out} \propto P_i \cdot G \cdot R_{FP} \quad (2)$$

其中, P_i 是光源发出的功率, G 是光电探测器的增益。F-P 腔的反射率 R_{FP} 是反射率与入射功率之比^[15], 可以表示为

$$R_{FP} = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi} \quad (3)$$

其中, R_1 和 R_2 分别是 F-P 腔 2 个面的反射率, 而相位差 φ 定义为

$$\varphi = \frac{4\pi n l}{\lambda} \quad (4)$$

其中, n 表示 F-P 腔的折射率, l 表示 F-P 腔的长度, λ 表示中心波长。通过强度解调可得出用电压幅度表示

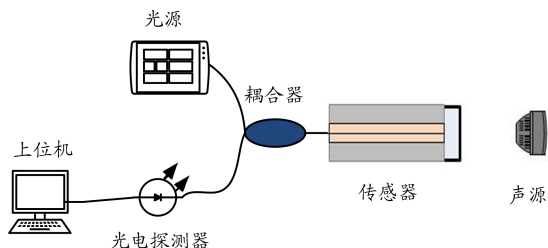


图 1 局部放电检测的声传感系统示意图

受声压调制的干涉光强度。由于在超声波传播过程中声压呈指数衰减, 因此 V_{out} 会因从声源到传感器的距离和方向不同而发生变化。

2 传感器的膜片设计和制作

在 F-P 声传感器的膜片设计中, 膜片的厚度 h 和半径 r 确定了膜片的谐振频率 f 和中心形变 $y(p)$, 通常较大的中心形变 $y(p)$ 意味着较高的响应灵敏度。通过将 f 和 $y(p)$ 相乘可得

$$f \cdot y(p) = \alpha \frac{h}{r^2} \cdot \beta \cdot p \frac{r^4}{h^3} = \alpha \beta \cdot p \left(\frac{r}{h} \right)^2 \quad (5)$$

其中, α 和 β 是等效系数, 受弹性模量、泊松比和膜材料密度影响。所以, r/h 的最大比值, 即谐振频率引起的最大中心形变 $y(p)$ 时的 r 和 h 值。为了保持一定的频率, 厚度变化量 Δh 和半径变化量 Δr 应满足以下公式。

$$\begin{cases} \frac{h+\Delta h}{(r+\Delta r)^2} = \frac{h}{r^2} \\ \Delta h = \frac{h[2r\Delta r + (\Delta r)^2]}{r^2} \end{cases} \quad (6)$$

整理后可以得到

$$\frac{r+\Delta r}{h+\Delta h} = \frac{r}{h} \cdot \frac{r^2+r\Delta r}{r^2+2r\Delta r+(\Delta r)^2} < \frac{r}{h} \quad (7)$$

由式 (5) 可知, 在确定的谐振频率下, 半径和厚度较小的膜片, 其形变量越大。本文中所使用的膜片厚度为 5 μm , 在谐振频率为 60 kHz 时, 通过仿真计算得到硅膜片的直径为 1120 μm , 可以达到的灵敏度为 733 nm/kPa。

由式 (3) 得出的 F-P 腔长与干涉强度之间关系的模拟结果如图 2 所示, 其中 $R_1=0.04$, $R_2=0.9$ 和 $\lambda=1550$ nm。可以看出, 为了获得强度变化的线性范围, 初始 F-P 腔长应设置在 $\lambda/4$ 周期的中间值左右, 为

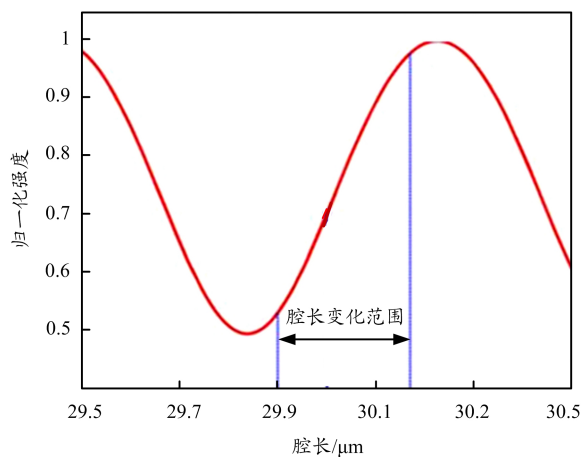


图 2 F-P 腔的强度响应

F-P 腔提供足够的工作范围。因此, 本文设计的 F-P 腔长为 $30\ \mu\text{m}$ 。

传感器膜片的制造过程示意图和结构如图 3 所示。首先, 通过光刻对绝缘体上硅(SOI)晶片 $500\ \mu\text{m}$ 厚的衬底层进行构图; 其次, 利用深反应离子刻蚀(DRIE)为光纤套管刻蚀一个深孔; 然后, 蚀刻深度为 $30\ \mu\text{m}$ 的阶梯, 此深度刚好到 SiO_2 层, 以形成 F-P 腔和振动膜片; 最后, 将膜片放到缓冲的氢氟酸中, 并在膜片的内表面上溅射 Au 膜以形成 F-P 腔的反射面。

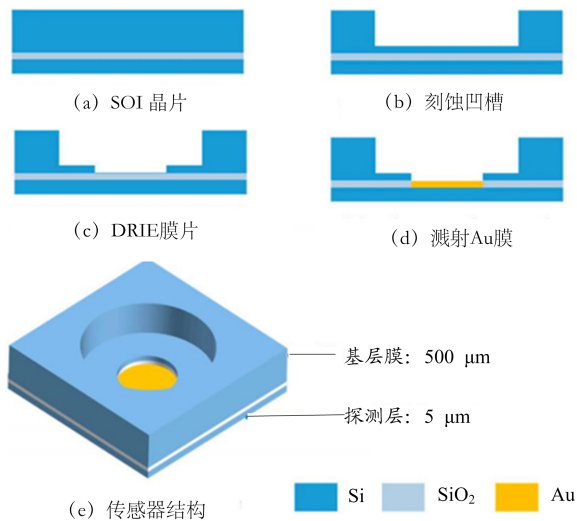
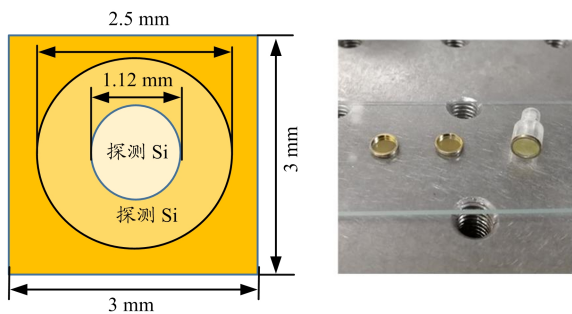


图 3 膜片制造过程示意图和传感器膜片结构

制作完成的传感器膜片结构示意图和传感器探头的实物图如图 4 所示。本文使用直径为 $10\ \text{mm}$ 的不锈钢管来确保其刚性, 并考虑到环境影响, 通过密封膜保护声波传感器免受污染和湿气的影响, 以实现更可靠的测量。电气设备中的温度变化可能导致膜片结构的热膨胀变形, ANSYS 仿真结果显示, 当环境温度从 $22\ ^\circ\text{C}$ 升高到 $85\ ^\circ\text{C}$ 时, $5\ \mu\text{m}$ 的膜片沿 Z 方向的形变量仅为 $1\ \text{nm}$, 这种较小的 F-P 腔长变化不会影响传感器的线性性能。

传感器结构中所设计的阶梯孔可以轻松固定光



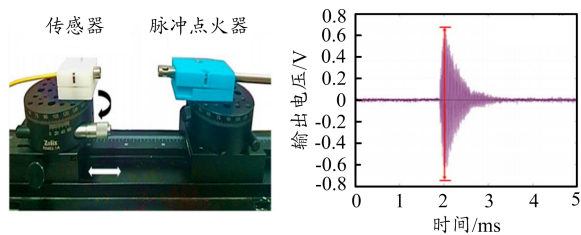
(a) 传感器膜片结构示意图 (b) 封装后的 F-P 传感器探头

图 4 完成后的传感器膜片的结构示意图和传感器探头的实物图

纤末端。与聚合物或石墨烯膜片制造工艺相比, 通过 MEMS 制造工艺的传感器生产率更高、成本更低, 且易于批量制作。

3 实验研究与结果讨论

为验证基于 MEMS 的 F-P 传感器的可行性, 本文对其在不同入射角和线性距离方向的灵敏度进行实验。实验中, 将脉冲点火器的放电设定为在空气中发生, 传感器探头固定在旋转平台上, 并堆叠在光学滑轨上; 传感器探头和脉冲点火器都在同一高度对齐; 光信号由直流稳压电源激励的光纤激光器发出, 带有光电二极管的高速放大器用于将光信号转换成噪声为 $\pm 5\ \text{mV}$ 的电压, 该器件中 InGaAs 光电二极管的响应度为 $0.9\ \text{A/W}$, 放大器的转换增益为 $0.6 \times 10^6\ \text{V/A}$ 。考虑到大多数局部放电发生在 $40\sim 300\ \text{kHz}$ 的频率范围内^[17], 因此 DAQ 设备的采样率设置为 $1\ \text{MHz}$ 。实验装置的照片如图 5(a) 所示, 从脉冲点火器检测到的超声信号如图 5(b) 所示。可以看出, 超声信号由 F-P 传感器检测到的局部放电声信号和来自整个传感系统的 $20\ \text{mV}$ 左右的低噪声信号组成。由于脉冲点火器的每次放电都是随机的, 并且能量不完全相同, 类似于电气设备中发生的局部放电, 因此在每个电源位置至少测量了 10 次有效放电, 然后计算这些放电的平均峰峰电压值 V_{pp} , 以确保定向响应测量的准确性。由计算结果可知, 传感器的最高灵敏度可达 $733\ \text{nm/kPa}$ 。



(a) 实验装置的照片 (b) 从脉冲点火器检测到的超声信号

图 5 实验装置的照片和从脉冲点火器检测到的超声信号

以 15° 为步长, 从 $0^\circ\sim 360^\circ$ 变化的不同超声入射角的 V_{pp} 值在放电源和传感器之间的 4 个不同距离 d ($25\ \text{cm}$ 、 $50\ \text{cm}$ 、 $75\ \text{cm}$ 和 $100\ \text{cm}$) 下进行角度相关的测量, 测得的电压显示出类似的变化趋势, 如图 6 所示。可以看出, 每条拟合曲线均沿水平轴显示出近似的对称分布。在 $d=50\ \text{cm}$ 时 $\pm 45^\circ$ 入射范围内接收到的信号具有相对平坦的响应, 在 $\pm 60^\circ$ 范围内变化为 $5.90\ \text{dB}$, 这与环氧树脂封装的 F-P 传感器的结果接近^[11]。但是, 由于橡胶或聚合物的声阻抗比钢界面小, 因此使用橡

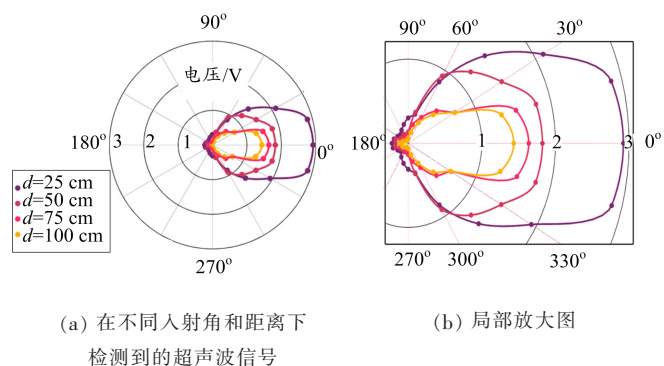


图6 在不同入射角和距离下检测到的超声波信号

胶或聚合物作为封装材料可产生更大的角度响应。重复实验后的结果表明:检测到的最弱的信号大多数是在 135° 处,而在 180° 的反向方向上却未被检测到。但是,传感器前面无反射介质可以产生回声,这可能是由于不锈钢管末端用来密封间隙的聚合物胶粘剂比不锈钢具有更好的超声波穿透性,因此一部分向后入射的超声波通过粘合剂传输到传感器芯片中并使振动膜片振动,而其它入射角(例如 135°)的超声波首先会遇到管子表面并导致巨大的衰减,另外管端的斜率也可能导致声压的降低。尽管如此,该传感器仍能够识别出所有入射角在 1 m 的距离范围内的生波,特别是在 $\pm 60^\circ$ 范围内的微弱放电信号。因此,该传感器仅需 3 个嵌入在电气设备中的传感器即可实现现场声压的检测和精确定位。

以 25 cm 为步长,从 $25\sim 300\text{ cm}$ 变化的不同距离 d 下检测到的信号的电压 V_{pp} 值如图 7 所示。可以看出,随着距离的增加, V_{pp} 值发生了衰减。使用 Matlab 拟合工具箱构建拟合曲线,得出 $V_{pp}=3.67^{-0.01089d}$ ($R^2=0.9772$),符合空气中超声波的衰减特性^[16]。

不同距离下的放电超声信号检测结果如图 8 所示。从图 8(a)可知,在放电声源距离传感器 300 cm

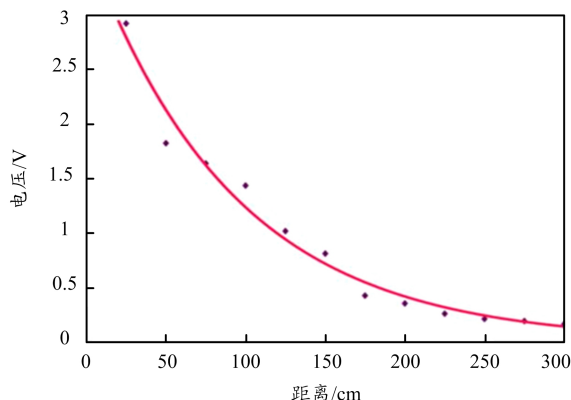


图7 在不同线性距离处检测到的超声波信号

处,仍能检测到声信号,这表明传感器具有很高的灵敏度;从图 8(b)可知,幅频响应由 Matlab 中的快速傅里叶变换(FFT)函数计算得出,且所有检测到的超声信号在 70 kHz 频率分量附近都显示出一个峰值。当放电电源较近时,可以在 127 kHz 附近观察到另一个较小的峰值幅度,此处较小的峰值可能是因为产生共振引起的。此外, $d=100\text{ cm}$ 时的信噪比(SNR)为 31.42 dB ,略高于已报道的光纤超声传感器^[17],这表明在较远的距离下,该传感器也能够检测到弱声信号。

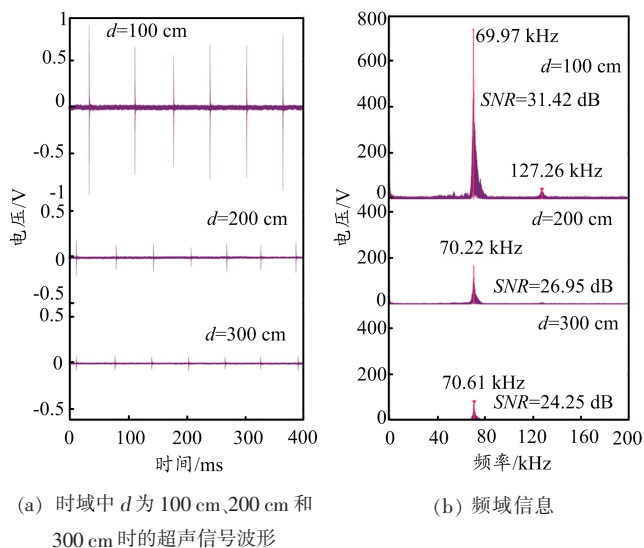


图8 不同距离下的放电超声信号检测结果

此外,方向灵敏度是由传感器的振动结构和封装方式所确定的,因此本文简化了局部放电的变压器环境。在实际应用中,由于该传感器体积小、安全性好和抗电磁干扰能力强,可以安装在变压器箱壁上,以实现比外部检测更好的性能。

4 结束语

本文研究了光纤 F-P 声传感器在不同入射角和线性距离下的方向灵敏度,该传感器的灵敏度最高可达到 733 nm/kPa ,其响应范围为 $\pm 60^\circ$,在 50 cm 处的振幅波动为 5.90 dB 。传感系统在 100 cm 处的 SNR 为 31.42 dB ,噪声低于 20 mV ,这表明它能够检测 3 m 以外的空气中微弱的放电信号。实验结果为传感器封装的优化以及用于检测局部放电的传感器阵列的优化配置提供了参考。

参考文献:

- [1] 单宁,史仪凯,赵江海,等. 光纤 Fabry-Perot 超声传感系统设计与应用[J]. 光电子·激光,2008,19(7): 881-883.

黄小花, 安静, 李瑾, 等. 用于局部放电检测的光纤 Fabry-Perot 声传感器

- [2] 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.
- [3] WU Y, YU C, WU F, et al. A highly sensitive fiber-optic microphone based on graphene oxide membrane [J]. Journal Lightwave Technol., 2017, 35: 4344–4349.
- [4] MA J, XUAN H, HO H L, et al. Fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm [J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2013, 25: 932–935.
- [5] FU C, SI W, LI H, et al. A novel high-performance beam-supported membrane structure with enhanced design flexibility for partial discharge detection[J]. Sensors, 2017, 17: 593–598.
- [6] 刘士伟, 刘雪颖, 王永洪, 等. 微型 FBG-MEMS 压力传感器在静压桩贯入过程测量中的应用[J]. 光电子·激光, 2020, 31(8): 32–39.
- [7] WANG Y, NI X, WANG M, et al. Demodulation of an optical fiber MEMS pressure sensor based on single bandpass microwave photonic filter [J]. Opt. Express, 2017, 25: 644–653.
- [8] BOCZAR T, BORUCKI S, CICHON A, et al. Application possibilities of artificial neural networks for recognizing partial discharges measured by the acoustic emission method [J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2009, 16: 214–223.
- [9] GAO S, ZHANG Y, XIE Q, et al. Research on partial discharge source localization based on an ultrasonic array and a step-by-step over-complete dictionary[J]. Energies, 2017, 10: 567–574.
- [10] ROSENTHAL A, RAZANSKY D, NTZIACHRISTOS V. High-sensitivity compact ultrasonic detector based on a pi-phase-shifted fiber Bragg grating[J]. Opt. Lett., 2011, 36: 1833–1835.
- [11] SONG L, WANG Z, WANG A, et al. Angular dependence of the frequency response of an extrinsic Fabry-Perot interferometric (EFPI) fiber acoustic sensor for partial discharge detection [J]. Journal Lightwave Technol., 2006, 24: 3433–3438.
- [12] IEEE. IEEE guide for the detection and location of acoustic emissions from partial discharges in oil-immersed power transformers and reactors: IEEE standard C57.127-2007[S]. Piscataway: IEEE, 2007: 112.
- [13] BO D, MING H, ANBO W. Two-wavelength quadrature multipoint detection of partial discharge in power transformers using fiber Fabry-Perot acoustic sensors[C]//SPIE. Proceedings of Fiber Optics sensor and Application. Maryland: SPIE, 2012: 56–63.
- [14] WANG L, FANG N. Applications of fiber-optic interferometry technology in sensor fields[M]. Optical Interferometry, 2017.
- [15] LEE C E, TAYLOR H F. Sensors for smart structure based upon the Fabry-Perot interferometer [J]. Fiber Optics Smart Structures, 1995 (5): 249–269.
- [16] LABY T H, KAYE G W C. Table of physical and chemical constants [M]. New York: Longman, 1973.
- [17] ZHANG W, WANG R. An optical fiber Fabry-Perot sensor based on functionalized diaphragm for ultrasound detection and imaging [J]. IEEE Photonics Journal, 2017(9): 1–8.