

# 基于非本征光纤法布里-珀罗干涉仪的局放声发射传感器设计

张伟超<sup>1,2</sup> 赵洪<sup>1</sup> 楚雄<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨理工大学工程电介质及应用技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

<sup>2</sup>哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

**摘要** 采用耦合石英膜和光纤接头构成非本征法布里-珀罗干涉仪(EFPI)传感器,检测液-固复合绝缘电介质中的局部放电声发射信号。为解决目前EFPI传感器灵敏度低的问题,依据弹性力学原理和有限元分析方法确定EFPI膜片结构设计方法,并制作传感器样品。建立以分布式反馈(DFB)激光器为光源的EFPI正交强度解调系统。以绝缘油针-板电极局部放电为信号源,利用压电陶瓷(PZT)传感器与EFPI样品进行对比测试。结果表明,EFPI传感器局放检测灵敏度取决于传感器频响带宽和静压灵敏度,完善了EFPI膜片设计方法,获得局放检测灵敏度与PZT相近的EFPI传感器。

**关键词** 光纤光学;超声波传感器;光纤非本征法布里-珀罗干涉仪;膜片设计;局放声发射检测

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0406002

## Partial Discharge Acoustic Emission Sensor Design Based on Extrinsic Fiber Fabry-Perot Interferometer

Zhang Weichao<sup>1,2</sup> Zhao Hong<sup>1</sup> Chu Xiong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Harbin University of Science and Technology, Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application, Ministry of Education, Harbin, Heilongjiang 150080, China

<sup>2</sup>Harbin University of Science and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin, Heilongjiang 150080, China

**Abstract** An extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) consisted of coupling quartz diaphragm and fiber optic pigtailed is designed to detect acoustic signal generated by partial discharge (PD) in liquid-solid dielectric insulation. To solve the problem of low sensitivity, based on the theory of elasticity the structure parameters of EFPI diaphragm are determined using finite element analysis method, and EFPI samples are manufactured. In order to demodulate acoustic signal, a quadrature intensity demodulation system is established using distribute feedback (DFB) laser. A piezoelectric transducer (PZT) and EFPI sensor contrast measurement system is designed using needle-plate electrode to produce partial discharge. Results show that the sensitivity of EFPI sensor is determined by response frequency and static pressure sensitivity of EFPI. Design method of EFPI diaphragm is improved, and an EFPI sensor which has the same sensitivity as PZT for partial discharge detection is designed.

**Key words** fiber optics; acoustic sensor; extrinsic Fabry-Perot interferometer; diaphragm design; partial discharge acoustic detection

**OCIS codes** 060.2310; 230.1040; 120.3180

收稿日期: 2014-07-24; 收到修改稿日期: 2014-11-24

基金项目: 国家973计划(2012CB723308)、工程电介质及应用技术国家重点实验室培育基地资助项目(103504)

作者简介: 张伟超(1984—),男,博士研究生,主要从事光纤传感及高压绝缘测试方面的研究。E-mail: weichaozhang@163.com

导师简介: 赵洪(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事高压绝缘技术方面的研究。E-mail: hongzhao@hrbust.edu.cn  
(通信联系人)

## 1 引 言

局部放电是造成电力设备绝缘破坏的重要因素之一,对于局部放电行为的实时监测可以发现潜伏性绝缘破坏并对绝缘状态进行定期评价,可在大规模绝缘破坏前采取防范措施减小因绝缘击穿造成的重大经济损失。电学、化学和声学的局放检测方法已被大量研究,但是对运行的电力设备实行局部放电的在线监测依然存在很大困难。如脉冲电流法会受到电磁干扰影响,以气相色谱为代表的化学监测方法具有时间的滞后性等。由于局部放电声发射信号频率范围 50~300 kHz<sup>[1]</sup>,可避开电力设备运行过程中油循环振动等噪声信号干扰,且通过相应算法实现局放位置定位,因此超声测量方法成为液固复合介质局部放电在线监测的一种有效手段。

传统局放超声波监测方法主要采用压电陶瓷(PZT)传感器,但 PZT 只能采用在变压器等电力设备容器外壁安装方式。一方面声波受到器壁衰减;另一方面对于体积较大设备在距器壁较远的绝缘处发生的声信号很难检测,且 PZT 传感器的传输线及电路存在严重的电磁干扰问题。光纤传感器凭借其体积小、灵敏度高、高频响应优良、具有电绝缘性和抗电磁干扰等优点<sup>[2-4]</sup>,使人们试图将其用于电力设备局部放电监测的兴趣不减。早期人们主要关注应用 Michelson 干涉仪<sup>[5-6]</sup>和 Mach-Zehnder 干涉仪<sup>[7]</sup>方式进行局放检测,然而由于随机偏振的影响使干涉条纹存在边缘衰减问题,同时双臂干涉导致系统结构复杂。

光纤法布里-珀罗干涉仪由于结构精巧、灵敏度高已被广泛用于温度、应力、位移、电压和电流等物理量测量之中<sup>[8-12]</sup>。以石英膜或者硅膜为声耦合单元的非本征法布里-珀罗干涉仪(EFPI)结构简单紧凑更适用于局部放电在线检测。文献中曾多次报道采用该方式的 EFPI 传感器进行局部放电检测<sup>[13-15]</sup>,并获得具有较高灵敏度的传感器;但主要报道了实验成果,对 EFPI 传感器设计过程中涉及的膜片结构和传感器固有频率对测试灵敏度的影响分析较少。本文利用镀有 50% 反射率反射膜的石英膜片和光纤跳线平面构造 EFPI 探头。以弹性力学原理为依据结合有限元分析方法,探讨了传感器膜片结构与灵敏度的关系,明确了膜片耦合方式的 EFPI 传感器膜片设计原则。在针-板局部放电系统中,采用正交强度解调方式对 EFPI 传感器测试,从时域和频域两个角度对传感器样品灵敏度进行分析。最终获得对局放诱发超声信号具有较高检测灵敏度的 EFPI 传感器探头。

## 2 EFPI 基本结构及解调原理

光学法布里-珀罗腔由经镀膜处理的光纤跳线和石英膜片平行放置组成,其基本结构如图 1 所示。为获得较大线性工作区域,石英膜片内侧和光纤跳线端面镀 50% 反射率的反射膜,在支撑结构下封装成法布里-珀罗腔。入射激光经光纤传输至跳线端面处,50% 功率被反射回光纤中,另 50% 透射光经折射率为 1.0 的空气后被镀有反射膜的石英膜反射,经两个膜片反射的反射光形成干涉。由于采用紧套的支撑结构可认为入射光为正入射,因此根据多光束干涉的原理,当入射光波长为  $\lambda$  时法布里-珀罗腔的反射光强函数可表示为<sup>[16]</sup>

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

式中  $l$  为腔长,  $R_1, R_2$  为两个反射面的反射率为 50%,  $I_0(\lambda)$  为入射光的在波长  $\lambda$  处的光强。  $n$  为法布里-珀罗腔内介质折射率,法布里-珀罗腔内介质为空气  $n=1.0$ 。EFPI 反射输出光强度是腔长与入射光中心波长的双变量函数,如图 2 所示为 EFPI 反射光光强随波长变化关系。

由于(1)式是在光波无损耗的理想状态下表达式,但实际法布里-珀罗腔内光束由于介质材料的吸收等原因会产生光损耗,因此在(1)式中引入介质损耗系数  $\alpha$ ,则(1)式可表示为

$$I(\lambda, l) = \frac{R_1 + \alpha R_2 - 2\sqrt{\alpha R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n l}{\lambda}\right)}{1 + \alpha R_1 R_2 - 2\sqrt{\alpha R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n l}{\lambda}\right)} \cdot I_0(\lambda). \quad (2)$$

传感系统以中心波长 1550 nm 窄带激光器为光源,根据(2)式可获得传感器载波信号规律(EFPI 工作曲线)。如图 3 所示为 EFPI 反射输出光强随法布里-珀罗腔长的变化关系,随着腔长的增大,EFPI 调制深度变

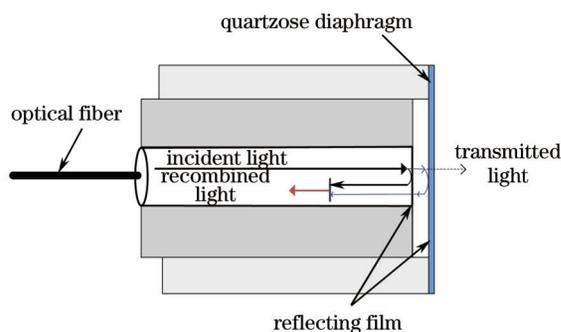


图1 非本征法布里-珀罗传感器结构图

Fig.1 Extrinsic Fabry-Perot sensor structure

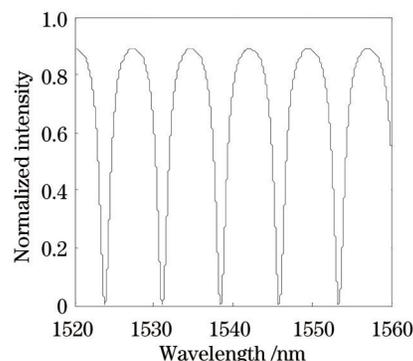


图2 EFPI反射光谱随波长变化关系

Fig.2 Reflectance spectra of EFPI versus wavelength

小。EFPI传感器解调通常有光谱解调和正交解调两种方式,依据电工与电子工程师协会(IEEE)局放声信号检测标准,EFPI传感器检测的局部放电声发射信号频率大于 50 kHz,本文采用正交解调方式检测被测信号。正交解调也可称为线性解调,是使EFPI传感器工作区域限制在静态工作点  $Q$  附近的一个小线性区域,在该区域内信号可线性输出并具有最高灵敏度。局部放电超声波激励石英膜片振动,EFPI腔长随外激励做周期性变化,进而调制EFPI反射光强度成同频率的周期性变化,通过光电转换器接收EFPI光强信号后便获得被测超声信号强度和频率信息。而当静态工作点  $Q$  处于条纹的波峰或波谷时,腔长的改变呈现在光强上的变化几乎为零,传感器灵敏度将大大衰减。

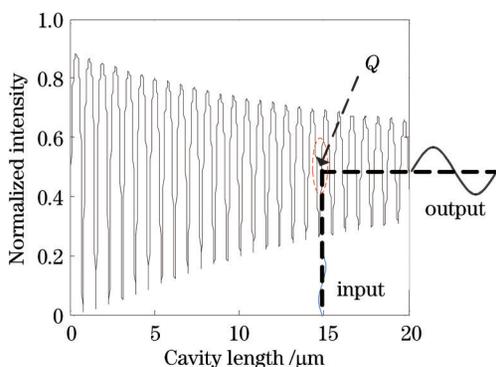


图3 归一化光功率随腔长变化关系

Fig.3 Normalized intensity versus cavity length

### 3 传感器设计及制作

#### 3.1 膜片静压灵敏度和频响特性分析

石英膜片是非本征法布里-珀罗超声传感器的换能元件,作为声波信号和光信号耦合媒介其特性参数直接影响传感器灵敏度。根据弹性力学原理,对于四周全约束的圆形薄片固有频率可表示为<sup>[17]</sup>

$$f = \frac{10.21}{2\pi a^2} \left[ \frac{Dg}{h\rho} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (4)$$

式中  $h$  为膜片厚度,  $D$  为抗弯刚度,  $a$  为膜片半径,  $\rho$  为材料密度,石英材料为  $2.2 \times 10^{-3} \text{kg/m}^3$ ,  $E$  为弹性模量,石英材料约为 73 GPa,  $\mu$  为泊松比,本文为 0.17,  $g$  为重力加速度。设一个单位应力作用下膜片中心位移为静压灵敏度,则圆形膜片的静压灵敏度可表示为

$$y(P) = \frac{3(1-\mu^2)}{16Eh^3} a^4 P. \quad (5)$$

以石英膜片为耦合单元的EFPI传感器的频响特性决定于膜片固有频率。根据弹性力学原理,四周约束的圆形膜片作受迫振动时,在激励频率远小于固有频率的频段范围,膜片受迫振动振幅随激励信号频率改变基本不变;当激励频率在膜片固有频率附近时,膜片处于共振状态振幅出现最大值;当激励频率高于膜片固有频率时,膜片受迫振动振幅输出几乎为零。因此,若假设EFPI膜片固有频率为 $f_0$ ,则可近似认为该传感器有效频响带宽为 $0\sim f_0$ 。局放声发射信号频率分布均具有较大随机性,根据上述EFPI膜片受迫振动频响特性,若传感器频响带宽 $0\sim f_0$ 不包含局放声信号频率丰富的区域,即使拥有较高静压灵敏度仍然不能获得较高局放检测灵敏度。因此,局放检测传感器的灵敏度不仅与静压灵敏度有关,而且与传感器频响特性有关。为获得高灵敏度传感器,EFPI传感器具有较高静压灵敏度的同时,其有效带宽应包括局放声信号频率最丰富的频带。

局部放电是电介质在高场强下局部绝缘破坏的一种跃变过程,复杂的物理过程导致绝缘油中局部放电声发射信号幅值和频率具有极大随机性,难以通过某单一的频率和静压灵敏度来确定传感器局放检测灵敏度,设计具有合理频响带宽的传感器成为提高局放检测灵敏度的关键。根据(3)式和(5)式,如图4所示是不同厚度膜片固有频率和静压灵敏度随半径变化关系曲线,可见膜片固有频率和静压灵敏度呈相互制约关系,若使传感器带宽能够包括被测信号频带而增大频率带宽,将导致静压灵敏度过低;反之,设计传感器具有较高静压灵敏度,又使传感器频带过窄而无法满足局放检测要求。

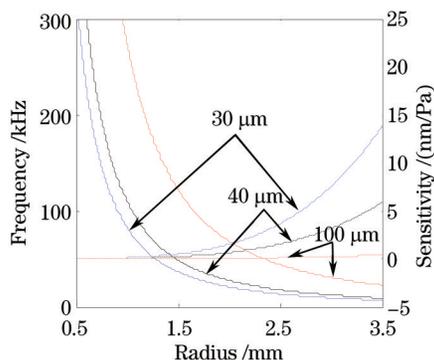


图4 不同膜片厚度EFPI固有频率和灵敏度随半径变化关系

Fig.4 EFPI intrinsic frequency and sensitivity versus radius under different thickness diaphragm

由于局放声发射信号幅值和频率的随机性,为探究适用于局放声发射检测的最优化的传感器频响带宽,设计不同频响带宽传感器进行实验对比。由(3)式和(5)式可知相同固有频率下,膜片厚度越小,静压灵敏度越高。由于加工工艺限制,本研究采用最薄石英膜片厚度为 $40\ \mu\text{m}$ 。为分析相同膜片厚度、不同固有频率时EFPI局放检测灵敏度,设计两个膜厚 $40\ \mu\text{m}$ 传感器;另为分析传感器固有频率对局放检测灵敏度影响,设计具有较低静压灵敏度和较高固有频率的膜厚 $100\ \mu\text{m}$ 传感器,将其与具有较低固有频率的 $40\ \mu\text{m}$ 传感器对比。在考虑实验室制备传感器样品技术基础上,根据目前用于变压器局放检测的传感器频响范围一般在 $100\sim 250\ \text{kHz}$ 之间,通过仿真技术进行固有频率和静压灵敏度分析后,设计的三种固有频率的EFPI传感器膜片厚度和直径尺寸如表1所示。再经有限元仿真软件计算获得三种结构EFPI固有频率和静压灵敏度,可见三种结构EFPI固有频率 $f_{\text{EFPI}3} > f_{\text{EFPI}1} > f_{\text{EFPI}2}$ ;静压灵敏度 $S_{\text{EFPI}2} > S_{\text{EFPI}3} > S_{\text{EFPI}1}$ 。

表1 三种结构EFPI传感器参数

Table 1 Parameters of three kinds of EFPI sensors

Sensor	Diameter /mm	Thickness / $\mu\text{m}$	Static pressure sensitivity /(m/Pa)	Intrinsic frequency /kHz
EFPI 1	2.5	100	$6.10 \times 10^{-12}$	175
EFPI 2	2	40	$3.86 \times 10^{-11}$	110
EFPI 3	1.5	40	$1.22 \times 10^{-11}$	224

### 3.2 EFPI传感器制作

EFPI传感器探头主要由三部分构成:石英膜片、支撑结构和光纤插芯。根据上述设计结构参数,试制三种样品传感器。将构成法布里-珀罗腔的石英膜一侧和光纤跳线外表面同时镀50%反射率反射膜;将石英

膜片镀膜一侧作为内表面粘贴于支撑套管一侧,套管另一端插入光纤跳线,将三者用环氧胶封装制成 EFPI 传感器。如图 5 所示为采用放大自发辐射(ASE)宽带光源和日本横河光谱仪(AQ6370)测得的 EFPI 传感器反射光干涉谱线,其谱线分布均匀平整,在 1550 nm 光波附近干涉谱线调制度最大可达 10 dB。

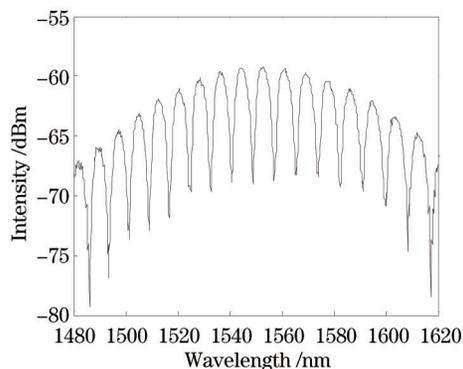


图 5 EFPI 传感器反射光谱

Fig.5 Reflection spectrum of EFPI sensor

## 4 传感器测试结果与分析

### 4.1 测试系统组成

实验室中以针-板电极系统局部放电为测试对象,利用 PZT 传感器和 EFPI 传感器进行对比测试,如图 6 所示为测试系统结构示意图。针-板电极置于长宽高为 50,40,30 cm 充满绝缘油的长方形铁箱中,将其与可调交流无局放实验变压器连接构成针-板局部放电发生系统。以分布式反馈(DFB)激光器为传感器工作光源,DFB 激光器具备波长可调制、窄线宽、光谱纯度高和高边模抑制比的特点。DFB 激光器在驱动电路和温度控制电路辅助下激发连续的窄带激光,激光经光路耦合器及引导光纤入射到 EFPI 传感器探头。EFPI 薄膜受迫振动调制激光信号后,经耦合器被馈入到光电转换器转换为电流信号。EFPI 传感器埋置于油箱内的一侧,并通过引导光纤将其信号引导至解调系统。在铁箱同侧壁外安装 PXR15 PZT 探测器,为提高传感器与声波耦合效率,利用耦合剂增加 PZT 与箱壁的耦合度。

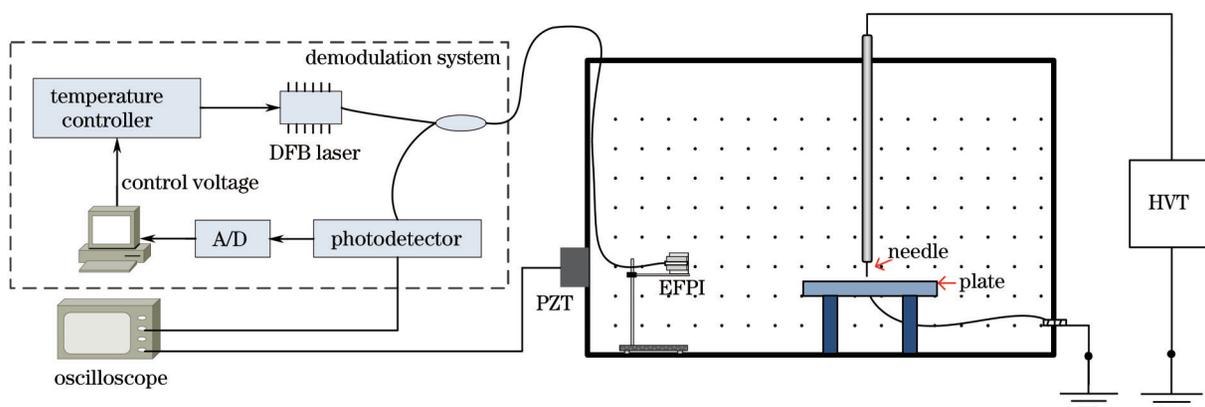


图 6 测试系统结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of measurement system

### 4.2 实验结果及分析

由于绝缘油针-板电极局部放电声发射信号幅值和频率的随机性,及单位时间的放电次数的随机性,难以通过人为控制重现特定频率或幅值的局放声信号,故无法采用定量测量某一固定幅值和频率局放信号的方式直接对比三个 EFPI 传感器灵敏度。PZT 传感器已经广泛用于电力变压器局放声发射信号检测,在相同的放电模型中 PZT 输出信号幅值与局放声信号大小呈线性关系,相同的 PZT 输出信号幅值可代表基本相当的局放强度大小。在同一放电模型下,不同的 EFPI 分别与 PZT 同时检测同一放电信号,将 EFPI 输出幅值分

别与同组 PZT 输出幅值做比值,即得 PZT 单位输出强度下对应的 EFPI 输出,该比值可等效为相同局放大信号下不同 EFPI 输出大小,因此通过该比值即可间接衡量不同 EFPI 传感器的灵敏度。设  $U_{EFPI}$  和  $U_{PZT}$  分别是编号为  $i$  ( $i=1,2,3$ ) 的 EFPI 传感器和 PZT 传感器对相同局放信号同时测得的输出电压幅值,比例系数  $K_i$  即为不同 EFPI 传感器局放检测灵敏度衡量指标,则  $K_i$  表达式为

$$K_i = \frac{U_{EFPI}}{U_{PZT}}. \quad (6)$$

实验系统中在距局放源相同距离处分别安装 EFPI 1、EFPI 2 和 EFPI 3 三个传感器,三者分别与 PZT 同时进行局放检测实验。由于局放信号的随机性,为对比三个 EFPI 灵敏度研究中多次测试后,选取 PZT 输出幅值分别在 1, 2.7, 4 V 附近时的结果进行对比,如表 2 所示为三组实验结果对比,随 PZT 幅值的增大 EFPI 幅值同比例增大,EFPI 与 PZT 幅值比比例系数  $K$  具有较好的一致性。如图 7~9 所示为从上述测试结果选取的一组 EFPI 和 PZT 输出的时域波形图和频谱图。图 7(b)所示 EFPI 1 信号输出频谱集中在 130~200 kHz 之间;图 8(b)所示 EFPI 2 信号输出频率集中在 100~120 kHz 之间;图 9(b)所示 EFPI 3 信号输出频率主要集中在 30 kHz 附近、80~110 kHz 和 150~200 kHz 之间,30 kHz 不在超声波法局放检测频率范围内,分析其原因可能是由于在 EFPI 3 传感器外侧采用了 1.5 mm 直径膜片做约束而导致,且经仿真计算约束环固有频率恰好在 28 kHz。

表 2 EFPI 传感器和 PZT 传感器局放测试输出幅值

Table 2 EFPI sensors and PZT signal output amplitude for photoelectric detector

No.	EFPI /mV	PZT /mV	$K$
Group 1	1	160	0.159
	2	46	0.045
	3	768	0.842
Group 2	1	462	0.167
	2	136	0.052
	3	2380	0.869
Group 3	1	670	0.167
	2	192	0.049
	3	3580	0.877

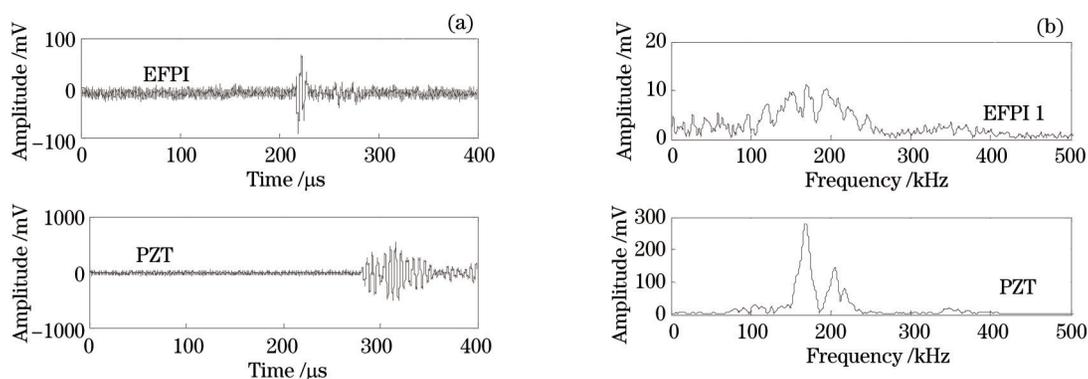


图 7 EFPI 1 与 PZT 局放超声信号测试结果。(a) 时域波形;(b) 快速傅里叶变换频域图

Fig.7 Results of photoelectric detector acoustic signal by EFPI 1 and PZT. (a) Time domain waveforms; (b) fast Fourier transforms waveforms

将表 2 中三组测试的  $K$  值分别求平均值,三个 EFPI 的固有频率、静压灵敏度和局放检测灵敏度系数  $K$  的对比结果如表 3 所示。由于 EFPI 1 膜片较厚,静压灵敏度 EFPI 1 远小于 EFPI 2;但固有频率 EFPI 1 高于 EFPI 2,EFPI 1 传感器带宽包含部分频段的局放声波信号,因此局放检测灵敏度  $K_1 > K_2$ 。EFPI 2 和 EFPI 3 具有相同膜片厚度,静压灵敏度 EFPI 2 高于 EFPI 3,固有频率 EFPI 2 低于 EFPI 3;由于 EFPI 3 具有较合理的频响带宽,EFPI 3 的局放检测灵敏度远高于 EFPI 1 和 EFPI 2。上述结果表明,EFPI 传感器频响带宽和静压灵敏度共同影响其局放检测灵敏度,且传感器带宽对局放检测灵敏度具有更大的约束性。EFPI 传感器膜片设

计应首先满足传感器频响带宽包括局放信号频率最丰富的频带,在此基础上使传感器频响带宽最小从而获得较高的静压灵敏度,最终提高EFPI局放检测的灵敏度。

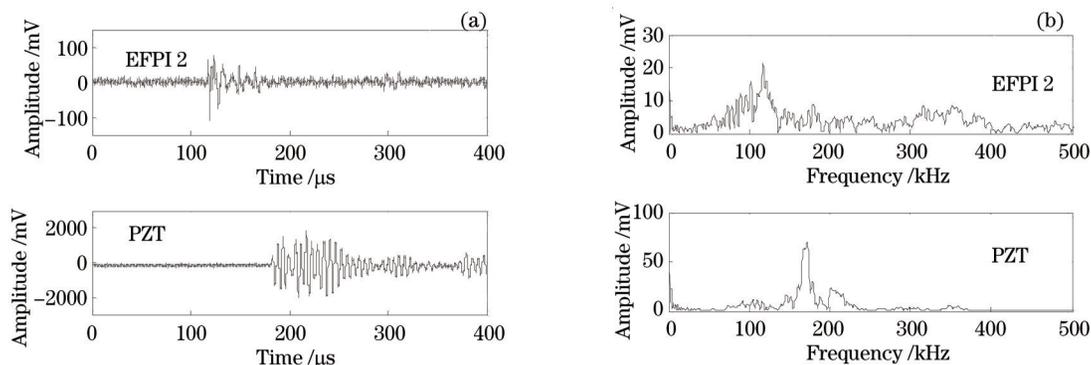


图8 EFPI 2与PZT局放超声信号测试结果。(a)时域波形;(b)快速傅里叶变换频域图

Fig.8 Results of photoelectric detector acoustic signal by EFPI 2 and PZT. (a) Time domain waveforms; (b) fast Fourier transforms waveforms

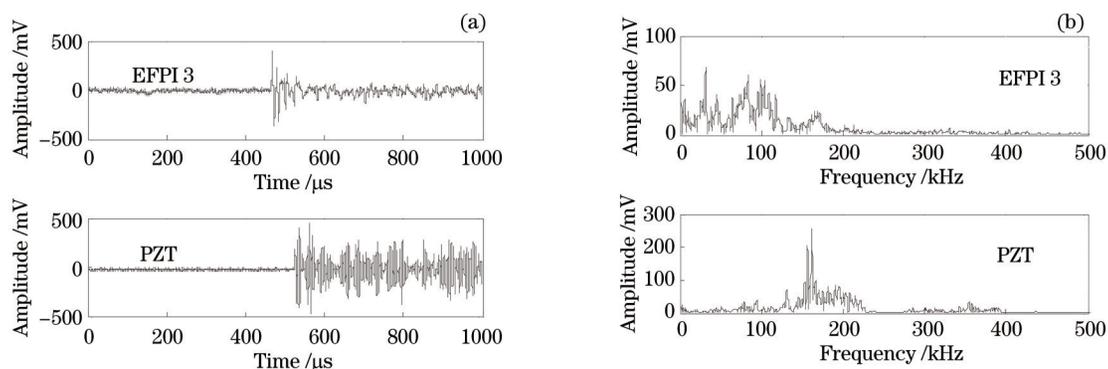


图9 EFPI 3与PZT局放超声信号测试结果。(a)时域波形;(b)快速傅里叶变换频域图

Fig.9 Results of photoelectric detector acoustic signal by EFPI 3 and PZT. (a)Time domain waveforms; (b) fast Fourier transforms waveforms

表3 三种结构EFPI传感器局放检测灵敏度对比

Table 3 Comparison of three kinds of EFPI sensors detection sensitivity

Sensor	Intrinsic frequency /kHz	Static pressure sensitivity /(m/Pa)	<i>K</i>
EFPI 1	175	$6.10 \times 10^{-12}$	0.164
EFPI 2	110	$3.86 \times 10^{-11}$	0.049
EFPI 3	224	$1.22 \times 10^{-11}$	0.863

## 5 结 论

利用石英膜片作为声波耦合换能元件,在其一侧表面镀以50%反射率反射膜与镀有相同反射膜的光纤插芯构成非本征法布里-珀罗干涉仪,并将其用于液-固复合绝缘电介质中的局部放电声发射信号检测。从理论分析获知EFPI传感器频响带宽和静压灵敏度的相互制约关系;阐述了因局放声发射信号频率和幅值的随机性的存在,因此不能仅以静压灵敏度衡量局放传感器灵敏度,以及分析了因该问题造成的传感器设计过程频响带宽和静压灵敏度最优匹配困难的问题。为解决传感器频带和静压灵敏度匹配困难,采用了设计三种不同结构参数传感器进行实验对比,从实验结果中获取最佳匹配方案。在绝缘油针-板电极局部放电声发射实验系统中进行检测实验,利用DFB激光器正交解调系统解调EFPI测得声波信号。三种EFPI传感器与PZT传感器的对比实验结果表明:EFPI传感器局放检测灵敏度受静压灵敏度和频响带宽共同约束,且带宽影响更大;针对本研究绝缘油中针-板电极放电源,通过实验对比方式获得的具有224 kHz固有频率和

静压灵敏度  $1.22 \times 10^{-11}$  m/Pa 的 EFPI 3 传感器, 对局放声发射信号检测具有与 PZT 传感器相近的灵敏度。

## 参 考 文 献

- 1 IEEE std C57.127. IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors [S]. New York: IEEE Power Engineering Society, 2007.
- 2 Wang Yongjun, Liu Yongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensing system [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.  
王拥军, 刘永超, 张靖涛, 等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- 3 Zhu Tao, Xu Min, Rao Yunjiang, *et al.*. Miniature humidity sensor based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow core fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1592-1596.  
朱涛, 徐敏, 饶云江, 等. 基于空芯光纤的集成式全光纤法布里-珀罗干涉式湿度传感器[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1592-1596.
- 4 Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang, *et al.*. A miniature extrinsic Fabry-Perot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 17-20.  
段德稳, 朱涛, 饶云江, 等. 基于空芯光子晶体光纤的微型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 17-20.
- 5 David Te-Yen Yeh Huang, Sheng Lih Hsu, *et al.*. Measurement of objects with low vibration frequencies using modified Michelson interferometry [J]. Journal of Optics, 2011, 13(8): 085401.
- 6 En De, Chen Caihe, Cui Yuming, *et al.*. Integrated optics Michelson interference acceleration seismic geophone [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(3): 399-403.  
恩德, 陈才和, 崔宇明, 等. 集成光学迈克尔逊干涉型加速度地震检波器[J]. 中国激光, 2005, 32(3): 399-403.
- 7 T K Lim, Y Zhou, Y Lin, *et al.*. Fiber optic acoustic hydrophone with double Mach-Zehnder interferometers for optical path length compensation [J]. Opt Commun, 1999, 159(4-6): 301-308.
- 8 Li Chunheng, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. A novel Fabry-Perot micro-displacement sensor based on intensity demodulation method [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0628001.  
李春成, 王鸣, 夏巍, 等. 基于 F-P 腔强度解调的微位移传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0628001.
- 9 Yang Xianhui, Zhang Xuanyu, Wan Zhitao, *et al.*. Polymer micro-cavity based probe type fiber Fabry-Perot interferometer sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050606.  
杨先辉, 张轩宇, 万之套, 等. 聚合物微腔的探针型光纤法布里-珀罗干涉仪传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050606.
- 10 Sun Jiyong, Chen Weimin, Zhu Yong, *et al.*. An optic fiber Fabry-Perot strain sensor system based on tunable Fabry-Perot [J]. Laser Journal, 2002, 23(4): 49-50.  
孙吉勇, 陈伟民, 朱永, 等. 基于可调谐法布里-珀罗腔解调的光纤法布里-珀罗应变传感系统[J]. 激光杂志, 2002, 23(4): 49-50.
- 11 Wang Li, Zhou Yi, Hua Dengxin, *et al.*. Theoretical research and simulation of the atmospheric wind field and temperature based on the Fabry-Perot interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1001001.  
汪丽, 周毅, 华灯鑫, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪的大气风场及温度场探测理论研究及仿真[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1001001.
- 12 Wang Hong, Liu Xuebin, Feng Yutao, *et al.*. A new reduction technique for thermospheric wind and temperature measurement with Fabry-Perot interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1130003.  
王宏, 刘学斌, 冯玉涛, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪反演大气风速和温度的简化算法[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1130003.
- 13 X Wang, B Li, H Roman, *et al.*. Acousto-optical PD detection for transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1068-1073.
- 14 B Dong, M Han, L Sun, *et al.*. Sulfur Hexafluoride-filled extrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensors for partial discharge detection in transformers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(18): 1566-1568.
- 15 Sanderson E U Lima, Orlando Frazão, Rubem G Farias, *et al.*. Mandrel-based fiber-optic sensors for acoustic detection of partial discharges—a proof of concept [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2526-2534.
- 16 Bi Weihong. Mathematical model for fiber-optical non-symmetrical Fabry-Perot interferometric cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 20(7): 873-878.  
毕卫红. 本征不对称光纤法布里-珀罗干涉仪的理论模型[J]. 光学学报, 2007, 20(7): 873-878.
- 17 Jiang Liping. Engineering Elasticity [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006.  
江理平. 工程弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.

栏目编辑: 何卓铭