

doi:10.3788/gzxb20154405.0506007

基于可调谐激光器的局部放电光纤法珀传感器

郭少朋^{1,2}, 韩立^{1,2}, 殷伯华^{1,2}, 鞠昱¹

(1 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对局部放电测量中的光纤法珀传感器,研究了其工作点稳定和提高灵敏度的参数优化方法.通过改变可调谐激光器的波长稳定了传感器的工作点.用激光器波长调谐范围确定腔长,令玻璃薄板的反射率为 1,根据单模光纤对高斯光束的耦合特性和多光束干涉原理,通过迭代算法得出光纤端面的最优反射率.基于波长调谐范围 1530~1565nm 的可调谐激光器,制作了自由光谱范围 28nm,腔长 43 μ m,玻璃薄板反射率大于 0.97,光纤端面反射率 0.52 的法珀传感器.经实验测试,法珀腔光损耗为 10%,条纹对比度为 1.实验结果表明,基于可调谐激光器的传感器工作点稳定,可测试最小局放声压约为 1Pa,达到实用要求.

关键词:光纤光学;超声波传感器;数值模拟;法布里-珀罗干涉仪;可调谐激光器;高斯光束;反射率;灵敏度;局部放电

中图分类号:TN253; TM835.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)05-0506007-5

Fiber Fabry-Perot Sensor for Partial Discharges Based on Tunable Lasers

GUO Shao-peng^{1,2}, HAN Li^{1,2}, YIN Bo-hua^{1,2}, JU Yu¹

(1 Institute of electrical engineering, Chinese Academy of sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A fiber fabry-perot sensor for partial discharges measurement was studied on getting stable working points. The parameters of the sensor were optimized to achieve higher sensitivities. The working points could be stabilized illuminated by a tunable laser. For a sensor, the cavity length of the sensor was determined by the tuning range of the tunable laser. Then, the reflectivity of the silica film was set to 1. Finally, the reflectivity of the fiber end was optimized by numerical simulations according to Gaussian beams and multi-beam interference theory. In experiments, a sensor was made with 28nm-FSR, 43 μ m-cavity length, the reflectivity of the silica film is above 0.97, and the reflectivity of the fiber end is 0.52. The losses of the cavity are 10 percent of the total energy. The fringe contrasts of the sensors arrive to 1. The sensor operates steadily illuminated by a tunable laser with 1530nm to 1565nm tuning range. The minimum detectable acoustic-pressure is about 1Pa. The performances of the sensor meet the demand of practical applications.

Key words: Fiber optics; Ultrasonic sensors; Numerical simulation; Fabry-Perot interferometers; Tunable lasers; Gaussian beams; Reflectivity; Sensitivity; Partial discharges

OCIS Codes: 060.2370; 120.2230; 140.3600; 140.3325; 120.7280

0 引言

电力变压器的安全运行具有重要的社会经济价值.局部放电(Partial Discharges,PD)简称局放是变压

器内部绝缘破坏的前期征兆和诱发因素.对变压器进行局放监测可以提前发现绝缘缺陷,避免重大事故的发生^[1].光纤法珀(Fabry-Perot,FP)传感器不仅具有一般光纤传感器绝缘、耐腐蚀、抗电磁干扰的特点,还具

基金项目:国家自然科学基金(No. 51375470)和北京市科委科技计划项目(No. Z131100005313011)资助

第一作者:郭少朋(1974-),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为光电传感技术. Email: gsp@mail. iee. ac. cn

导师(通讯作者):韩立(1970-),男,研究员,博士,主要研究方向为微纳加工技术及光电传感技术. Email: lihan@mail. iee. ac. cn

收稿日期:2014-12-04;录用日期:2015-02-12

<http://www.photon.ac.cn>

有体积小、成本低、灵敏度高的优点^[2-6]。光纤 FP 超声波传感器可以内置于变压器箱体内,解决传统外置压电传感器定位局放源时遇到的声波经油-壳体传输的多路径问题和壳体对声波的衰减问题。采用的石英薄片作为超声波敏感膜结构的非本征法珀干涉 (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, EFPI) 传感器灵敏度高、响应频率高,适合用于油浸变压器内的局放监测^[7-11]。局放产生的超声波在传输中由于呈球面波扩散衰减,以及绝缘结构的折射、反射和吸收损耗等原因,可能非常微弱,所以测试中需要高灵敏度的 FP 传感器。对 FP 传感器镀膜,提高反射率可以提高传感器的灵敏度^[8-11]。这是因为提高反射率,可以降低光损耗,增加多光束干涉的强度和级次。另外 FP 传感器测量微弱声波时,需要把工作点维持在干涉条纹的中值附近才会具有高的灵敏度,而当工作点处于干涉条纹的峰值或者谷底时,则灵敏度接近于零。传感器由于制作误差以及工作中环境温度变化对传感器腔长的影响,使传感器的工作点具有随机性和漂移性^[8,10]。对于未镀膜的低精度 FP 传感器(反射率约 3.6%),FP 多光束干涉可以简化为双光束干涉,干涉条纹呈余弦函数,可以采用双波长法^[12]。对于镀膜的高反射率 FP 传感器,双波长法不能满足工作点调节的要求。采用光源、可调谐滤波器及光放大器的系统较复杂、成本较高^[13]。分布反馈激光器(Distributed Feed Back, DFB)的可调谐范围较小($<4\text{nm}$),仅适用于腔长大于 $300\mu\text{m}$ 的 FP 传感器^[14-15],不能满足腔长较短(几十 μm)的 FP 传感,而短 FP 腔具有光损耗低、灵敏度高的优点。本文介绍了一种廉价的大范围集成可调谐激光器模块(Integratable Tunable Laser Assembly, ITLA)用于工作点的稳定,并以此为基础研究了传感器参数的优化方法。

本文采用 ITLA 解决了局放测量中 FP 传感器工作点的设定和漂移问题。以高斯光束耦合理论和多光束干涉理论为基础,给出了激光器调谐波长和传感器腔长及反射率的参数优化方法并制作了条纹对比度为 1、光损耗小、灵敏度高的 FP 传感器。实验测试表明:采用 ITLA 可调谐激光器的 FP 测试系统工作稳定,参数优化后的 FP 传感器对油中的局放声波检测具有较高的灵敏度。

1 传感器的工作原理

如图 1 所示,检测系统由 ITLA、环形器、FP 传感器、光电探测器、MCU 及信号调理电路组成。ITLA 的输出光,经环形器输入到 FP 传感器,在 FP 腔内因多次反射形成多光束干涉,干涉的反射光沿入射光纤返回,再经环形器输出至光电探测器。FP 传感器由两个反射面构成:一个是光纤端面 R_1 ;另一个是玻璃薄片

制作的反射镜 R_2 。 R_1 、 R_2 的间距是腔长 L ,反射镜 R_2 可随油介质中局放产生的超声波振动,造成腔长 L 和干涉光相位及强度的变化。

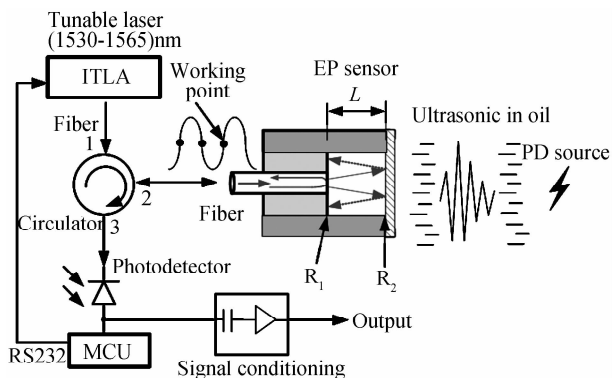


图 1 光纤 FP 传感器的测量原理

Fig. 1 Measure principle of fiber FP sensor

传感器的灵敏度与干涉条纹的级次、峰峰值和工作点相位有关。FP 腔损耗低时,干涉级次多,灵敏度高。条纹最小值为 0 时,条纹对比度大,条纹的峰峰值大,灵敏度高。传感器工作点处于干涉条纹中值附近时,灵敏度高。所以提高灵敏度的方法是降低 FP 腔损耗,提高条纹对比度,控制工作点位置正确。工作点的相位 $\theta(\theta=2\pi \cdot 2L/\lambda)$ 是腔长 L 和波长 λ 的函数。传感器因 L 的变化造成 θ 的偏移量可以通过调节 ITLA 的波长 λ 来补偿。

2 传感器的腔长设计

腔长的优化应考虑工作点调节范围和降低损耗两方面因素。小的腔长有利于降低光损耗,但过小的腔长可能导致传感器的自由光谱范围(FSR)过大,通过激光器波长调节无法找到工作点。激光器的波长调谐范围应大于等于传感器的自由光谱范围,实用中为了避免极端情况,应使调谐范围相对于 FSR 有一定的冗余量。

$$\lambda_2 - \lambda_1 = K \cdot \text{FSR} \approx K \frac{\lambda_0^2}{2L} \quad (1)$$

$$L \approx K \frac{\lambda_0^2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (2)$$

λ_2 、 λ_1 是激光器可调谐波长的最大值与最小值, λ_0 是平均波长,可取 λ_1 、 λ_2 的平均值。 K 为冗余系数: $1 < K < 1.5$ 。 $K < 1$ 可能找不到工作点; $K > 1.5$ 光损耗增加。设计中采用 AOC 公司的 ITLA 模块,波长调谐范围 $1530 \sim 1565 \text{ nm}$,取 1.25 倍的条纹周期扫描范围 ($K=1.25$),由式(2)得, $L=43\mu\text{m}$ 。

3 传感器的反射率设计

为了保证传感器的正常工作,由激光器的波长调谐范围确定了腔长后,接着应在腔长确定的条件下优化反射率,以降低损耗和优化条纹对比度。

3.1 高斯光束传输距离与能量耦合效率

从单模光纤出射进入 FP 腔的光以高斯光束形式扩展,传输距离 z 后部分耦合回单模光纤,文献[16-19]研究了出射距离 z 和能量耦合效率 η 之间的关系,共有 A,B,C 三种形式,即

A:

$$\eta(z) = \frac{4(4X^2 + 1)}{(4X^2 + 2)^2 + 4X^2} = \frac{1}{X^2 + 1} \quad (3)$$

B:

$$\eta(z) = \frac{\int_0^{\omega_0} \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)}\right)^2 \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right] r dr}{\int_0^{\omega_0} \left(\frac{\omega_0}{\omega_0}\right)^2 \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right] r dr} = \frac{1 - \exp\left[-\frac{2\omega_0^2}{\omega^2(z)}\right]}{1 - \exp(-2)} \quad (4)$$

C:

$$\eta(z) = \frac{\int_0^{\omega_0} \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)}\right)^2 \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right] r dr}{\int_0^{\infty} \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)}\right)^2 \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right] r dr} = \frac{1 - \exp\left[-\frac{2\omega_0^2}{\omega^2(z)}\right]}{1 - \exp(-2)} \quad (5)$$

式中 $X = 0.5z/Z_R$, $Z_R = \frac{\pi n \omega_0^2}{\lambda}$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z\lambda}{\pi n \omega_0^2}\right)^2} \quad (6)$$

ω_0 是单模光纤的模场半径, λ 是光波长, $\omega(z)$ 是高斯光束传输 z 距离后的束腰半径, Z_R 是瑞利距离, n 是传输介质的折射率(空气 $n=1$). A 的计算值比 B、C 略大. B、C 理论中分子积分形式相同, B 的分母仅对光纤模场区域积分, C 的分母对全部区域积分,所以 B 的结果比 C 稍大,图 2 给出了三种数值模拟的对比结果($\lambda = 1.550\mu\text{m}$, $\omega_0 = 5.20\mu\text{m}$).

实验中把 SMF28 单模光纤陶瓷芯(外径 2.50mm)插入与之可精密配合的玻璃管一端(内径 2.52mm),在玻璃管另一端垂直轴线粘接反射率约为 1 的反射

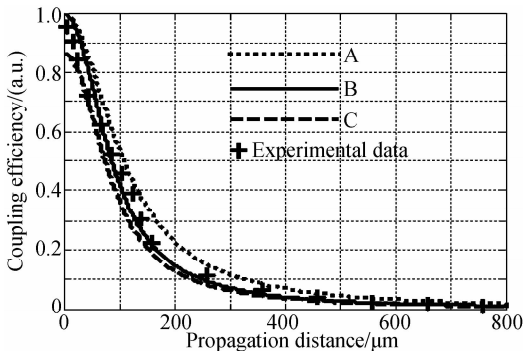


图 2 耦合效率与传输距离

Fig. 2 Coupling efficiency to propagation distance

镜,改变光纤端面与镜面的距离,得到耦合效率和出射距离的关系图 2(横坐标 $z=2L$). 实验结果比理论 A 稍小,比 B、C 稍大. 考虑到镜像原理具有消除光纤径向耦合误差的优点,以及光纤与反射镜的垂直度误差远小于高斯光束的发散角度,测试结果误差较小.

3.2 考虑腔长损耗的多光束干涉

如图 1 所示,入射光强 I , 振幅 E^i 在腔长为 L 的 R_1 、 R_2 间多次反射,反射光振幅 E_N^r 叠加形成多光束干涉. 干涉的反射光强为

$$I^r = E^r \cdot E^r \quad (7)$$

$$E^r = \sum_{N=0}^{\infty} E_N^r \quad (8)$$

$$E_0^r = r_1 \cdot E^i, E_1^r = t_1 q_1 r_2' t_1' E^i e^{-j\theta},$$

$$E_2^r = t_1 q_2 r_2' r_2' t_1' E^i e^{-j2\theta} \quad (9)$$

$$\dots E_N^r = t_1 q_N r_2'^N r_1'^{N-1} t_1' E^i e^{-jN\theta}$$

振幅反射数: $-r_1' = r_1 = \sqrt{R_1}$ 、 $-r_2' = r_2 = \sqrt{R_2}$. 振幅透射系数: $t_1 t_1' = 1 - R_1$. 相位 $\theta = 4\pi L/\lambda$, q_N 是计入高斯光束的振幅耦合系数,它是传输距离的函数,即

$$q_N = \sqrt{\eta_N(z)} = \sqrt{\eta(2NL)} \quad (10)$$

3.3 最优反射率设计

由高斯光束的发散特性,为了降低损耗, R_2 最优值应取 1. R_1 的最优值应满足腔长 L 时条纹对比度为 1,即干涉最小值为 0. 由式(8)、(9)求解 E^r 最小值为 0 时 R_1 的值($E^i = 1, R_2 = 1, \theta = 2N\pi$).

$$E^r = r_1 + \sum_{N=1}^{\infty} (1 - R_1) \cdot (-1)^{2N-1} r_1^{N-1} \cdot \sqrt{\eta_N} \cdot e^{-j2N\pi} =$$

$$\sqrt{R_1} - \sum_{N=1}^{\infty} (1 - R_1) \sqrt{R_1^{N-1}} \sqrt{\eta_N} = 0 \quad (11)$$

式(11)中仅 R_1 和 $\eta(L)$ 是变量,用 Matlab 数值模拟出不同 L 对应的 R_1 的值如图 3 所示(迭代次数 $N \leq 10 \text{ mm/L}$). 图 3 中给出 η 采用 3.1 节 A、B 两种损耗理论的仿真结果($\lambda = 1.55\mu\text{m}$, $\omega_0 = 5.20\mu\text{m}$). 文献[19-20]把 q_N 近似为指数函数: $q_N = q_1^N$, 得出对比度为 1 的条件为 $R_1 = q_1^2 R_2 = \eta_1 R_2$. 若令 $R_2 = 1$, 则结果与图 3 很接近. 由 2.1 节确定的 $L = 43\mu\text{m}$, 则根据图 3 中曲线, R_1 最优反射率应取 0.52 左右.

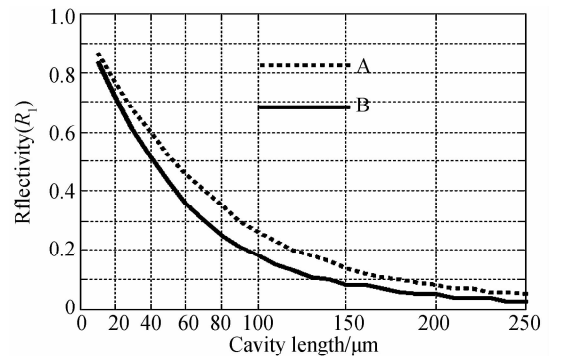


图 3 反射率 R_1 与腔长 L 的优化关系 ($R_2 = 1$)

Fig. 3 Optimal relation of R_1 to L ($R_2 = 1$)

4 实验结果

4.1 反射率与腔长最优关系实验

对单模光纤陶瓷芯端面(PC, 外径 2.50mm)和反射镜镀介质膜, 光纤端面反射率 R_1 为 0.52, 反射镜反射率大于 0.97. 如图 4 所示, 用精密螺旋推进器, 推动单模光纤陶瓷芯在一端粘接了反射镜的玻璃管中(内径 2.55~2.52mm)移动, 可得到如图 5 所示的干涉曲线($\lambda=1.55\mu\text{m}$). 干涉条纹的峰峰值与 L 的关系, 实验测得值与理论计算值比较一致, 当腔长在 $50\mu\text{m}$ 时, 干涉最小值约为 0, 条纹对比度约为 1. 制作传感器时, 当 FP 腔长在 $43\mu\text{m}$ 时用紫外胶固定光纤陶瓷芯在玻璃管中的位置. 用 ITLA 扫描传感器的光谱如图 6 所示

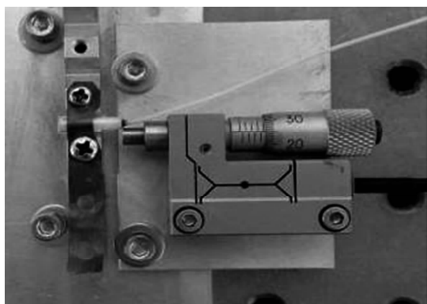


图 4 腔长调整装置

Fig. 4 Adjust mechanism for cavity length

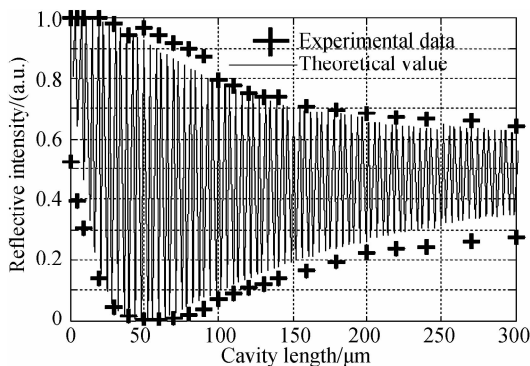


图 5 反射条纹实验结果 ($R_1=0.52, R_2>0.97$)

Fig. 5 Experimental result for Reflective fringe ($R_1=0.52, R_2>0.97$)

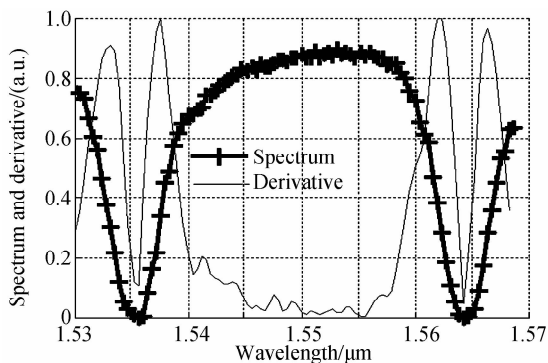


图 6 光谱和工作波长选择 ($L=43\mu\text{m}$)

Fig. 6 Spectrum and working wavelength selection ($L=43\mu\text{m}$)

(扫描间隔 50GHz, 约 0.4nm); 干涉峰值约为入射光的 90%, 光功率损耗约 10%, 条纹对比度约为 1, 与数值模拟结果较一致.

4.2 工作点的控制方法

工作点控制原理如图 1 所示, MCU 通过检测光电探测器光功率可以判断工作波长是否正确, 通过 RS232 接口向 ITLA 发送波长调节指令可以实现波长的改变. 工作点的控制分为两个阶段: (一) 起始阶段, MCU 以 0.2s 的时间间隔, 0.4nm 的波长间隔, 顺序扫描整个波长调谐范围 (1530~1565nm), 扫描的同时 MCU 记录下探测器的输出, 获得光谱曲线图 6. MCU 把 ITLA 的波长设置在光谱曲线导数最大的位置-初始位置; (二) 跟踪阶段, MCU 以设定周期查询当前光功率与初始位置光功率偏离的程度, 当二者差值超出阈值时, 在当前波长的基础上做 $\pm 0.4\text{nm}$ 的修改, 通过比较把差值小的结果保留下来作为新的当前波长, 这样通过周期性地调整可以实现工作波长随温度变化的稳定跟踪.

4.3 灵敏度测试实验

灵敏度实验装置如图 7 所示. 把制作的光纤 FP 传感器与美国 PAC 公司用于局放测试的压电传感器(型号 R15UG, 并配置 PAC 公司 40 dB 的放大器)置于油介质中同一个位置, 测试油隙击穿放电声波. 针尖间隙约 0.5 mm, 用绝缘套管包裹, 以衰减声信号, 施加脉冲电源约 50 kV. 测试结果如图 8 所示, PAC 的测试幅值为 300~400 mV, PAC 系统的灵敏度约 20~28 mV/Pa

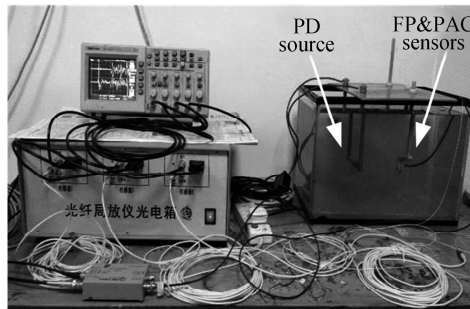


图 7 传感器灵敏度实验照片

Fig. 7 The photo of sensor sensitivity experiment

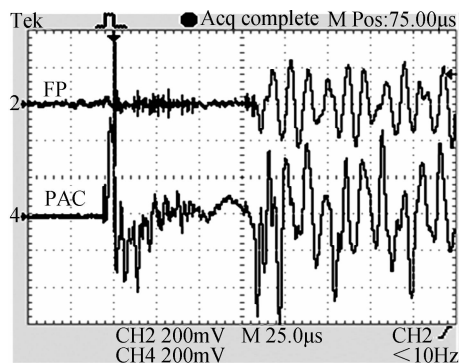


图 8 传感器灵敏度实验结果

Fig. 8 The result of sensor sensitivity experiment

(100 k~150 kHz),所以被测声压约为10~20 Pa. FP的测试幅值约为200 mV,可知其灵敏度为10~20 mV/Pa,FP测试系统的本底噪声10~20 mV,可知FP系统的最小可测试声压约为1 Pa.

5 结论

本文采用可调谐激光器(ITLA)解决了局放测量中FP传感器工作点漂移、灵敏度降低的问题.从稳定和提高传感器灵敏度的角度提出了FP传感器参数的优化方法;以高斯光束理论和多光束干涉理论为基础,给出了可调谐波长范围、腔长、反射率的最优关系;并成功地研制出了可用于局放测量的高灵敏度超声传感器.

实验测试证明:经参数优化的传感器,条纹对比度高于文献[8,10-11], R_1 , R_2 同为10%或者同为50%^[11]的结果;声压测试灵敏度高于文献[8-9]的10Pa^[8]和2.8Pa^[9];该传感器可稳定工作于温度变化环境.

参考文献

- [1] XIN Xiao-hu, LI Ji-sheng, JI Hai-ying, *et al.* Study of cross-shaped ultrasonic array sensor applied to partial discharge location in transformers[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2013, **33**(21): 154-162+205.
辛晓虎, 李继胜, 纪海英, 等. 用于变压器中局部放电定位的十字形超声阵列传感器研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, **33**(21): 154-162+205.
- [2] ZHU Jia-li, WANG Ming, CAI Dong-yuan, *et al.* A fiber Fabry-Perot micro pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(04): 274-277.
朱佳利, 王鸣, 蔡东艳, 等. 光纤法布里-珀罗微压传感器[J]. *光学学报*, 2014, **34**(04): 274-277.
- [3] JIANG Xiao-feng, LIN Chun, XIE Hai-he, *et al.* Optic fiber MEMS pressure sensor based on white light interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1006003(1)-1006003(5).
江小峰, 林春, 谢海鹤, 等. 白光干涉解调光纤MEMS压力传感器[J]. *光子学报*, 2014, **43**(10): 1006003(1)-1006003(5).
- [4] KE Tao, ZHU Tao, RAO Yun-jiang, *et al.* Accelerometer based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(1): 171-175.
柯涛, 朱涛, 饶云江, 等. 基于空芯光子晶体光纤的全光纤法布里-珀罗干涉式加速度传感器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 171-175.
- [5] WANG Wen-yuan, WEN Jian-xiang, PANG Fu-fei, *et al.* All single-mode fiber fabry-perot interferometric high temperature sensor fabricated with femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(10): 85-89.
王文轵, 文建湘, 庞拂飞, 等. 飞秒激光制备的全单模光纤法布里-珀罗干涉高温传感器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 85-89.
- [6] JO W, AKKAYA O C, SOLGAARD O, *et al.* Miniature fiber acoustic sensors using a photonic-crystal membrane [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(6B): 785-792.
- [7] SONG L J, COOPER K L, WANG Z, *et al.* Position location of partial discharges in power transformers using fiber acoustic sensor arrays [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(11): 114401(1)-114401(6).
- [8] YU B, KIM D W, DENG J D, *et al.* Fiber Fabry - Perot sensors for detection of partial discharges in power transformer [J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(16): 3241-3250.
- [9] WANG X D, LI B Q, XIAO Z X, *et al.* An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, **15**(3): 521-527.
- [10] XIAO Deng-ming, YAN Jing-lin, XU Xin, *et al.* One on-line partial discharge fiber sensor for power transformer [J]. *Electrical Equipment*, 2004, **5**(03): 16-18.
肖登明, 杨荆林, 徐欣, 等. 一种用于电力变压器局部放电在线监测的光纤传感器[J]. *电力设备*, 2004, **5**(03): 16-18.
- [11] ZHAO Hong, LI Min, WANG Ping-ping, *et al.* Extrinsic fiber Fabry-Perot sensors for PD-induced acoustic emission detection in liquid dielectrics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, **28**(22): 59-63.
赵洪, 李敏, 王萍萍, 等. 用于液体介质中局放声测的非本征光纤法珀传感器[J]. *中国电机工程学报*, 2008, **28**(22): 59-63.
- [12] ZHAO Jiang-hai, SHI Yi-kai, SHAN Ning, *et al.* Optimum double wavelength stabilization method for optical fiber[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2008, **30**(2): 150-152.
赵江海, 史仪凯, 单宁, 等. 光纤法珀声发射传感器的双波长优化稳定方法[J]. *压电与声光*, 2008, **30**(2): 150-152.
- [13] WANG Qiao-yun, MA Zhen-he. Feedback-stabilized interrogation technique for optical Fabry - Perot acoustic sensor using a tunable fiber laser [J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, **51**: 43-46.
- [14] CHEN Jian-yong, CHEN, Di-jun, GENG Jian-xin, *et al.* Stabilization of optical Fabry - Perot sensor by active feedback control of diode laser[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, **148**(2): 376-380.
- [15] CHEN Jian-yong, LI Wan-cai, JANG Hong, *et al.* Stabilization of a fiber Fabry - Perot interferometric acoustic wave sensor[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(4): 339-342.
- [16] MYNBAEV D K, SCHEIMER L L. Fiber-optic communications technology[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 250-251.
- [17] GUO Zhen-wu, LI Wei-xiang, GUO Zhuan-yun, *et al.* Analysis of loss and development of Fabry-Perot optical fiber sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2007, (5): 11-14.
郭振武, 李维祥, 郭转运, 等. F-P光纤传感器的损耗特性分析及其研制[J]. *仪表技术与传感器*, 2007, (5): 11-14.
- [18] KIM S H, LEE J J, LEE D C, *et al.* A study on the development of transmission-type extrinsic Fabry - Perot interferometric optical fiber sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(10): 1869-1874.
- [19] JIANG Shao-ji, ZENG Bin, WANG He-zhou, *et al.* A study on the theoretical model of white-light interfered EFPI optical fiber strain sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, **18**(1): 165-170.
江绍基, 曾斌, 汪河洲, 等. 白光干涉型EFPI光纤应变传感器理论模型的研究[J]. *传感技术学报*, 2005, **18**(1): 165-170.
- [20] ZHU Yong, ZHANG Jie, CHEN Wei-Min, *et al.* A method to improve the quality of F-P strain sensor output signal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 544-548.
朱永, 张洁, 陈伟民, 等. 提高光纤F-P应变传感器输出信号质量的方法研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 544-548.