

基于光纤法布里-珀罗干涉仪和绝缘油的高电压传感器

周黎明 朱涛 欧芝香 黄维

(重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 提出了一种将光纤法布里-珀罗(F-P)干涉仪置入装有绝缘油的容器内来测量高电压的传感方法。当高电压作用到该容器内的绝缘油时,液体会产生运动从而推动光纤 F-P 干涉仪变形,通过解调因为变形带来的输出光强的变化即可反映被测高电压的变化情况。实验中分别对峰值为数十千伏,半峰全宽时间值约 1 ms 的脉冲电压以及有效值为 7 kV 的工频电压进行了测量,实验结果表明该传感器输出光强可以非常灵敏地响应电压作用下的液体扰动。在脉冲电压下,输出光强近似于脉冲的形式,而在工频电压下,输出光强具有 50 Hz 的波形。实验证明这种将光纤传感器与液体运动相结合的传感机制可应用于毫秒、微秒尺度的脉冲高电压以及工频高电压的测量。

关键词 传感器; 电压; 法布里-珀罗干涉仪; 绝缘油; 液体扰动

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.s105006

High Voltage Sensor Based on Optical Fiber Fabry-Perot Interferometer and Insulating Oil

Zhou Liming Zhu Tao Ou Zhixiang Huang Wei

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of Education of Ministry,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract A high voltage sensor based on optical fiber Fabry-Perot interferometer and insulating oil is proposed. When high voltage is applied on insulating oil in the container, liquid flow caused by high voltage changes the cavity of the Fabry-Perot interferometer in the oil. High voltage information can be demodulated by using the change of the reflected light intensity. In our experiments, pulse voltage, with the peak of dozens kilovolt in amplitude, the full width at half maximum time of 1 ms and power frequency voltage of 7 kV, are measured. Experimental results show that the output light intensity of the sensor can respond sensitively to such kind of liquid turbulence. The light waveform is nearly pulsed under a pulse voltage. Moreover, the frequency of the output waveform is 50 Hz when the power frequency voltage of 7 kV is applied to the sensor. The sensing method based on optical fiber sensor and liquid flow has a potential application in the measurement of millisecond even microsecond pulse voltage and power frequency high voltage.

Key words sensors; voltage; Fabry-Perot interferometer; insulating oil; liquid turbulence

OCIS codes 060.2370; 060.2430; 060.4080

1 引言

高电压测量在高压输电、雷击监测、操作过电压监测等领域具有重要意义。传统的电磁式分压器^[1-3]虽然具有很高的频率响应(GHz)和灵敏度(mV),但当被测高电压超过了这种测量设备的量

程时,整个测量系统都易被击穿而损坏。此外电磁式分压器采用电线进行信号传输的方式不仅限制了传输距离,且易受到外界的电磁干扰而产生较大的测量误差。由于上述原因,基于光纤的电压传感器成为了当今的研究热点,目前已有的光纤电压传感

收稿日期: 2013-06-14; 收到修改稿日期: 2013-09-09

基金项目: 中央高校自然科学重点基金项目(CDJZR12125502)、中央高校自然科学基金一般项目(106112013CDJZR120002)

作者简介: 周黎明(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: 594502052@qq.com

导师简介: 朱涛(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信与传感技术、光纤非线性等方面的研究。

E-mail: zhutao@cqu.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S042011505S)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

器主要是利用电光效应^[4-7]或压电效应^[8-9],前者主要是利用某些晶体的泡克耳斯(Pockels)效应,一般制作成马赫-曾德尔干涉光波导结构,并与光纤结合进行使用,其制作工艺要求很高,频响能达到兆赫兹量级甚至吉赫兹量级。后者利用逆压电效应,通过压电晶体或压电陶瓷在电压下发生电致伸缩来对多匝光纤进行挤压使其发生应力双折射,并用干涉等方式进行检测。这种传感器一般体积较大,且其中光纤涂覆层等软性材料的存在导致其频率响应不高,只有千赫兹量级。以上两种光纤电压传感器都是通过将电压转化为材料的双折射来进行传感,因此实际使用中需要较贵的偏振器件和保偏光纤等元件,限制了它的广泛应用。

本文提出一种基于绝缘油和光纤干涉应变传感器的电压传感方法。其材料和制作成本非常低廉,且工艺十分简单。实验表明,在半峰全宽时间约1 ms的脉冲高电压和50 Hz交流高电压下,绝缘液体均能产生足够大小的流动^[10-11]使光纤应变传感器的输出光强发生较大的变化。其中在测量脉冲电

压时,液体扰动对本文使用的光纤法布里-珀罗(F-P)应变传感器的扰动也是脉冲形式的,因此这种应变传感器只发生弹性形变并能够很快恢复到原始状态,重复性较高,而测量交流电压时,证实了液体流动确实能够跟随这种50 Hz的变化。因此,这种新型传感机制能够应用于脉冲电压或工频交流电压的测量,具有重要的应用价值。

2 传感器制作及原理

实验中所用到的光纤F-P干涉仪是将处理后的单模光纤(SMF)插入毛细管然后再粘接制成的。首先将两段光纤切割为只留下约1 mm裸包层端头的形式,然后将其从两端插入到长度约1 cm、内径约250 μm的石英毛细管中,最后用耐油胶和蜡将毛细管两头与光纤粘接密封。光纤F-P干涉仪制作完成以后将其插入一个内尺寸为58 mm×47 mm×27 mm的透明塑料长方盒,如图1所示,然后在光纤和塑料盒接口处用蜡和耐油胶密封,等蜡和胶干后将容器注满绝缘油。

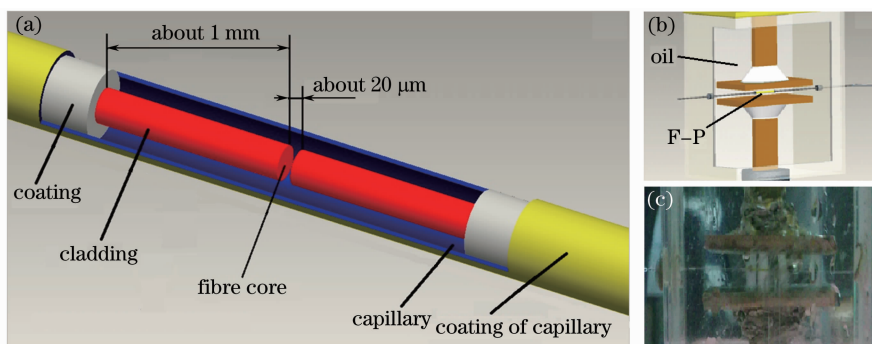


图1 (a) 光纤F-P干涉仪内部结构; (b) 三维容器图; (c) 容器照片

Fig. 1 (a) Inner structure of optical fiber F-P interferometer; (b) 3D image of the container; (c) photo of the container

如图2所示,在受到液体施加的作用力时,整个光纤干涉仪将会产生形变。由于石英和毛细管玻璃的弹性模量大大高于光纤涂覆层而且光纤和毛细管之间是弹性连接,所以光纤石英部分的应变可忽略,认为其主要发生几何形变,形变导致干涉仪两端的光纤相对于毛细管滑动并使F-P腔长发生微小变化。根据图2中的几何关系可以得出传感器腔长的变化

量 ΔL 与干涉仪中心点偏移距离 h 的近似关系为:

$$\Delta L \approx \frac{2h^2}{(L_f - L_m)}, \quad (1)$$

式中 L_f 是容器内光纤的总长度, L_m 是毛细管的长度。当选择光源的波长位于干涉仪反射谱[图3(b)]的线性变化区时,结合(1)式可以得到光强变化 ΔI 与 h 的关系为:

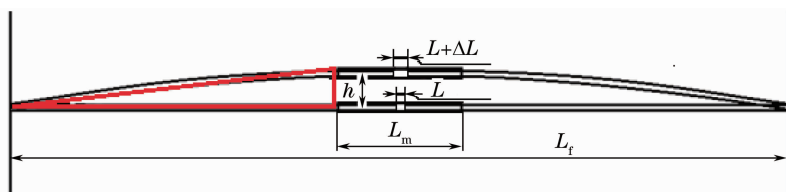


图2 光纤F-P干涉仪形变几何关系

Fig. 2 Geometrical relationship between original and deformed optical fiber F-P interferometers

$$\Delta I = \frac{2h^2 k \lambda}{L(L_f - L_m)}, \quad (2)$$

式中 k 为线性变化光谱曲线段的斜率, λ 为光源波长, L 为 F-P 腔原始腔长。

图 3(a) 是通过光谱仪测得的光谱曲线, 图 3(b) 是在测得图 3(a) 中某波长(一般为损耗最低的波长)对应的光强值后由图 3(a) 换算出的, 图中 1, 2, 3, 4, 5

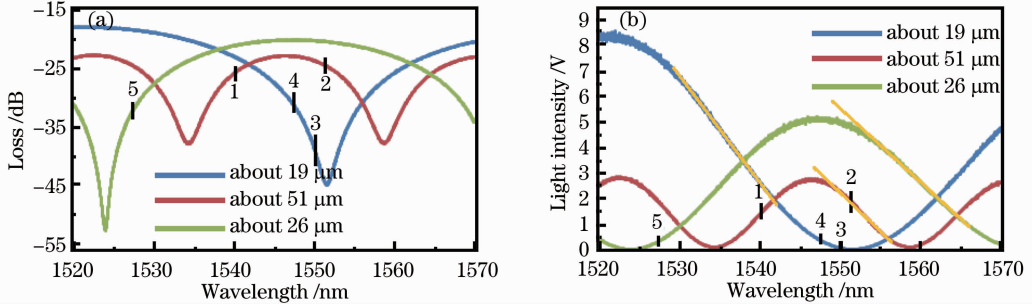


图 3 实验制作的不同腔长(about 51 μm 、about 19 μm 、about 26 μm) F-P 干涉仪反射光谱。(a) 对数光谱; (b) 线性光谱

Fig. 3 Reflection spectra of F-P interferometers made in this experiment with different cavity lengths (about 51 μm , about 19 μm , about 26 μm). (a) Logarithmic spectrum; (b) linear spectrum

传感器测试装置如图 4 所示, 首先设置可调谐激光器输出光功率为 4 mW, 将输出光波长设为一个固定工作波长。光通过耦合器以及数米长的单模光纤后到达置于容器中的 F-P 干涉腔处。将高电压施加到容器中的液体上时, 由于液体会受到电压扰动, 进而导致 F-P 腔长产生微小变化从而使得干涉

所示波长 λ 分别为 1540.5, 1551.5, 1550.0, 1548.0, 1527.5 nm。由图 3(b) 可知, 虽然干涉仪腔长不同, 但这三条光谱曲线的线性段(图中黄色线段部分)是近乎平行的(19 μm 曲线的斜率略大于另外两者)。结合(2)式可以看出, 只有改变 F-P 腔长 L , 才能有效地改变传感器的光强变化量(即光强灵敏度)。

条纹发生移动, 导致反射光强发生改变。变化的反射光通过耦合器后由光电探测器(PD)接收, 转换为电信号并输入到示波器上进行显示和记录。在整个实验过程中, 还使用了光谱仪辅助观察 F-P 干涉仪的反射光谱。

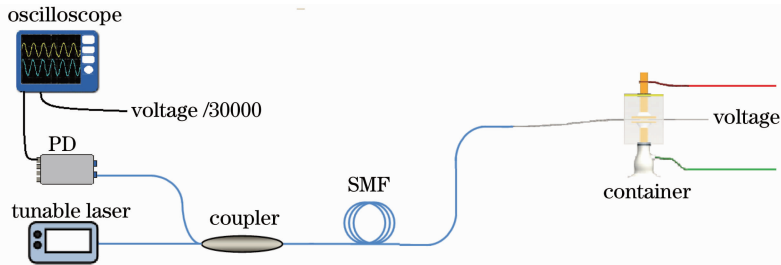


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sensor

3 实验结果与讨论

为了探究传感器的灵敏度是否足以使光强发生变化以及 F-P 腔长大小对测量灵敏度的影响是否如(2)式所示, 将制作好的约 19 μm 和 51 μm 两种腔长的 F-P 干涉仪置于液体容器中距离上下电极板约为 2 mm 处。将峰值电压为 35 kV, 半峰全宽时间约为 1 ms 的脉冲电压施加到传感器上, 所得实验结果如图 5 所示。

图 5(a)、(b)、(c)、(d) 分别为选择图 3 中 1、2、3、4 波长的测量结果(选用不同波长得到不同的光强变化方向以及信噪比)。其中图 5(a) 和 (b) 分别

是使用 51 μm 腔长干涉仪的多次实验中的光强变化最大结果(200 mV) 和最小变化结果(100 mV), 总的来说, 51 μm 干涉仪在选择线性段波长下光强变化平均约为 150 mV, 波动 ± 50 mV。图 5(c)、(d) 为使用 19 μm 腔长干涉仪并分别选择图 3 中 3、4 所示波长的测量结果[图 5(c)、(d) 的光电探测器放大档位是图 5(a)、(b) 的 10 倍]。图 5(c) 中光强约从 0.8 V 变化到 4 V, 实际对应于图 5(a)、(b) 档位中光强变化 320 mV。图 5(d) 是由于光强超过探测器量程而被削顶的情况, 根据多次实验得出此腔长下光强平均变化约为 310 mV, 波动 ± 30 mV。根据以上结果, 可以证

明传感器的灵敏度确实足以使光强改变,而对于腔长与光强变化量的关系而言,理论上在均采用光谱线性段波长的情况下,19 μm 腔长干涉仪光强变化量应该略大于 51 μm 干涉仪的 2.7 倍,但在 19 μm 腔长干涉仪实验中使用的波长略微偏离了线性段而其光谱斜率略小于线性段斜率,所以实际测得 19 μm 腔长干涉仪光强变化量大约为 51 μm 干涉仪的 2.1 倍,再考虑到传感器制作上的差异后,可以认为(2)式是合理的。此外图 5(a)和(b)的信噪比明显低于图 5(c)和(d),所以说虽然图 5(c)和(d)的初始光强较低,但是光强是按绝对值变化的,初始光强低反而使得光强变化率提升了,这也就提高了信噪比并使得多次实验结果的重复性更高。

最后从图 5(c)和(d)中可以看出,光强是先降低后升高的,这与图 5(a)和(b)的结果不同,这是由于液体的流动本就是较为复杂的,图 5(a)和(b)图中的光强信噪比低,所以过滤了那些较小的波动信号,而图 5(c)和(d)图中的信噪比高,能测得那些较小的波动信号。另一个原因是在将长腔长 F-P 干涉仪安装到容器的过程中,为了保持其易变的腔长不被大幅拉长,所以使用的预应力较小,最后整个光纤干涉仪可能处于微弯的状态从而导致干涉仪受到液体扰动时需要先回到平衡位置(腔长缩小)然后再弯曲(腔长增大),因此光强接连出现两个不同方向的变化。

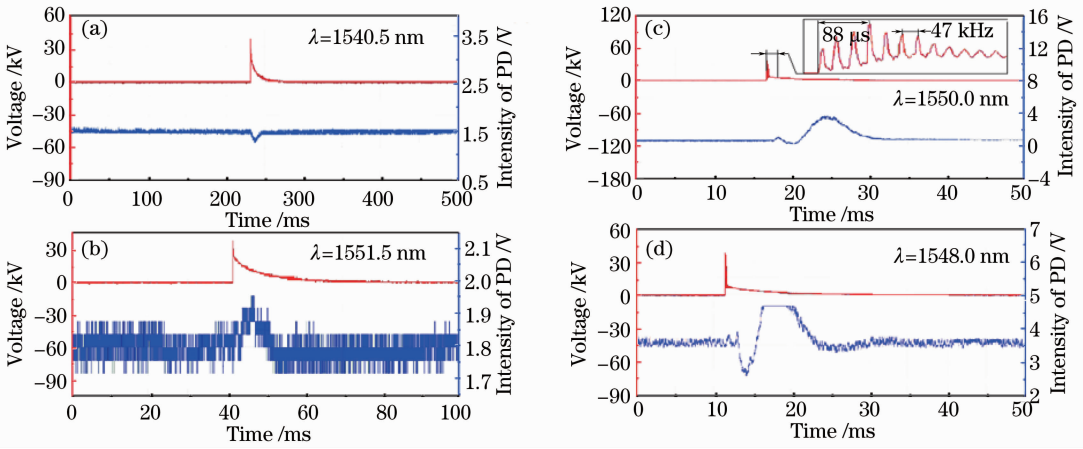


图 5 (a)和(b)是 F-P 腔长 51 μm 的 F-P 干涉仪实验波形; (c)和(d)是 F-P 腔长 19 μm 的 F-P 干涉仪实验波形
Fig. 5 (a) and (b) are experimental waveforms of the interferometer with 51 μm cavity length; (c) and (d) are experimental waveforms of the interferometer with 19 μm cavity length

为了得出干涉仪输出光强与所测电压的关系,实验选定同一 F-P 传感器,由于前文实验已证明选择短腔长干涉仪并选择尽量靠近干涉条纹波谷的波长能够得到较高的灵敏度和信噪比,本次实验传感器选择腔长为 26 μm 的 F-P 干涉仪(其反射光谱如图 3 所示),所加电压为 6 个峰值从 20~75 kV 等间

隔分布的脉冲电压,其波形图分别为 V1, V2, V3, V4, V5, V6,如图 6(b)所示。传感器放置在距离上(正)极板 2.5 mm、距下(负)极板 7.5 mm 的位置。对所得到的实验结果进行处理,得到 F-P 腔长变化峰值与所加脉冲电压的关系如图 6(a)所示。F-P 腔长最大改变量大约从 0.8 nm 增大到 9.5 nm。这种

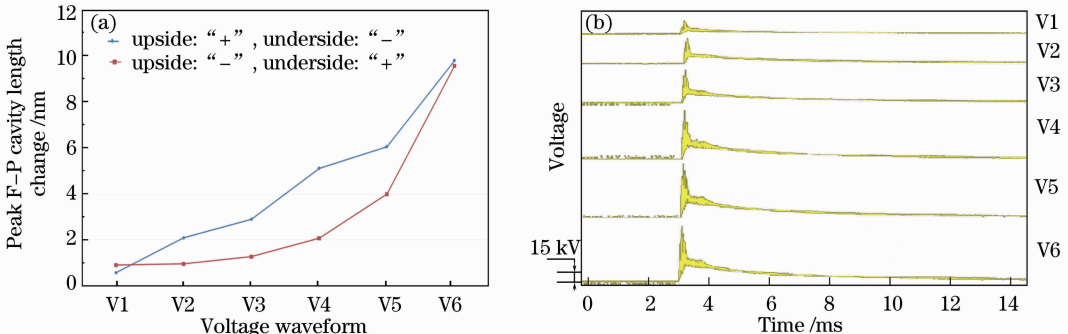


图 6 (a) F-P 腔长变化峰值与不同脉冲电压的关系; (b) 6 种不同幅值电压的波形

Fig. 6 (a) Peak F-P cavity length change versus voltage waveform; (b) waveforms of 6 different amplitudes voltages

解调成腔长变化量的方式可以消除光谱及光源波长的微小漂移造成的初始光强值不等以及所选波长偏离线性段等原因造成的测量误差,多次实验结果按这种方式解调后的重复性较高(测量误差在 $\pm 5\%$)。当交换上下电极板时,结果有所不同,这是由于带正负电粒子的尺寸、质量、碰撞情况不同造成的。

为了探究该传感器能否对工频电压进行测量,首先探测液体对工频电压的频率能否响应,故对传感器施加 50 Hz 的交流高电压。施加的电压有效值为 7 kV,传感器距离上下电极板均约为 5 mm,仍然使用约 $26\ \mu\text{m}$ 腔长的 F-P 干涉仪,波长选择图 3 中标记 5 处的值($\lambda = 1527.5\ \text{nm}$)。实验得出的光强变化结果如图 7 所示,图中显示光强变化频率为 50 Hz,与电压变化频率一致。经计算,光强最小值与最大值相差约 60 mV[本实验光电探测器档位也是图 5(a)和(b)的 10 倍],对应于腔长变化约 5 nm。实验表明,液体在电场作用下的流动频率完全能跟上所加低频电压的频率,且能对传感器产生直接作用,证明了该传感器能对工频电压进行测量。

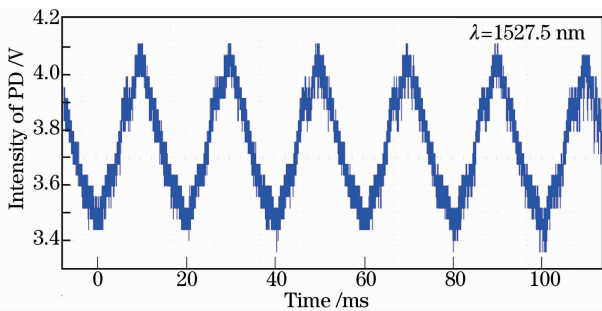


图 7 交流电压实验

Fig. 7 Experiment of alternating voltage

然而在实际测量中,传感器系统中存在胶等软性物质且毛细管处受力面积较大,这导致粘接处会因液体的长时间(毫秒数量级)冲击而松动。此外实验使用的容器壁较薄,不能很好地将外部光纤受到的扰动与传感器内部隔离开,这会导致在没有施加电压时,传感器的干涉谱也会发生缓慢抖动。以上原因都会引起测量误差,故探究更稳定而且灵敏度高的传感器结构以及误差补偿方法是未来要进行研究的方向。

综上所述,绝缘液体内部在高电压下会发生流动,且流动频率能与所加电压频率保持一致。文中所提出的传感器结构能在频率和幅值上响应液体流动,导致传感器干涉腔长发生变化,进而对电压进行测量。加脉冲电压时,腔长最大变化量与电压幅值具有一定的对应关系;加交流电压时,光强能随着电

压的频率波动变化,且该变化量易于探测。此外,实际使用时,使用较短腔长的干涉仪和选择靠近干涉光谱波谷附近的波长能够分别提高灵敏度以及信噪比。

4 结 论

提出了一种基于光纤 F-P 干涉仪和绝缘油的高电压传感器,而且通过改变 F-P 干涉仪的应变灵敏度可以使其应用于不同电压测量范围的场合。实验表明,在半峰全宽值为 1 ms 的脉冲高电压下,输出光强也是脉冲形式的;在 50 Hz 工频高电压下,液体的流动和传感器的频率响应均足够高,因此使得光强波形也能呈现 50 Hz 的变化。此外传感器的灵敏度和电压测量范围很容易进行设置和优化。这种传感方法在电压测量、雷击检测等领域具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- Ma Lianying, Zeng Zhengzhong, An Xiaoxia, *et al.*. A resistance divider for measurement of high voltage pulse with fast rise time [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2010, 29(1): 58-61.
马连英, 曾正中, 安小霞, 等. 一种用于测量快前沿高压脉冲的电阻分压器[J]. *电工电能新技术*, 2010, 29(1): 58-61.
- Xiong Hailin, Chen Xiangping. Improvement of measuring of high voltage single pulse with resistance voltage divider [J]. *Aviation Metrology & Measurement Technology*, 1995, 15(5): 23-25.
熊海林, 陈香萍. 电阻分压器测量高压单脉冲方法的改进[J]. *航空计测技术*, 1995, 15(5): 23-25.
- Wu Changfeng. Design of resistance divider used for high voltage fast-response pulse measurement [J]. *High Voltage Apparatus*, 2006, 42(5): 362-364.
邬昌峰. 一种测量高压快脉冲用电阻分压器的设计[J]. *高压电器*, 2006, 42(5): 362-364.
- Li Changsheng, Cui Xiang, Li Baoshu. A review of optical potential transducers [J]. *High Voltage Engineering*, 2000, 26(2): 40-43.
李长胜, 崔翔, 李宝树. 光纤电压传感器研究综述[J]. *高电压技术*, 2000, 26(2): 40-43.
- Li Kaicheng. Electro-optic crystals used in optical fiber voltage transducers and the transducer design [J]. *Laser Technology*, 2001, 25(4): 293-296.
李开成. 光纤电压传感器的电光晶体与传感器设计[J]. *激光技术*, 2001, 25(4): 293-296.
- Wang Xiaodong, Ye Meiyang. Temperature tracking compensation of fiber optic voltage sensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(7): 600-604.
汪晓东, 叶美盈. 光纤电压传感器的温度跟踪补偿[J]. *中国激光*, 2002, 29(7): 600-604.
- D Tulli, D Janner, M Garcia-Granda, *et al.*. Electrode-free optical sensor for high voltage using a domain-inverted LiNbO₃ waveguide near cut-off [J]. *Appl Phys B*, 2011, 103(2): 399-403.
- Tian Yujiang, Liao Yanbiao, Jian Shuisheng. Fiber optical Fabry-Perot interferometer voltage sensor using a piezoelectric

- ceramic cylinder as the sensing head[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 1992, 5(2): 7-10.
- 田玉江, 廖延彪, 简水生. PZT 作传感头的光纤 Fabry-Perot 干涉型电压传感器[J]. 传感技术学报, 1992, 5(2): 7-10.
- 9 Lou Fengwei, Zheng Shengxuan, Xi Zhenghong. Transducer probe design of optical fiber voltage transducers[J]. Instrument Technique and Sensor, 2004, 41(12): 3-5.
- 娄凤伟, 郑绳植, 席政宏. 光纤电压传感器传感头的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2004, 41(12): 3-5.
- 10 N G Green, A Ramos, A González, *et al.*. Fluid flow induced by nonuniform AC electric fields in electrolytes on microelectrodes [J]. Journal of Physical Review E, 2000, 61(4): 4011-4018.
- 11 M Talaat. A simulation model of fluid flow and streamlines induced by non-uniform electric field[C]. Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference, Cairo University, Cairo, Egypt, December 19-21, 2010, 371-375.

栏目编辑: 王晓玻