

# 基于光纤法布里-珀罗干涉仪的高压静电传感器

张开玉 赵 洪 杨玉强 张伟超

(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)

**摘要** 静电电压表对测量交直流高压有着非常重要的作用。为了实现高电压静电电压表的精确测量,提出并制备了一种采用法布里-珀罗(FP)腔干涉原理的静电电压传感器。所设计的传感器电极与高压电极构成一组静电电压测量电极,此传感器的FP腔由光纤准直器和外侧镀铝的聚酯膜构成,当在高压电极施加载荷时,聚酯膜与高压电极之间产生均匀电场,在电场力作用下聚酯膜产生形变,从而改变FP腔的腔长,造成FP传感器的输出光谱偏移,采用相位解调法获得高压电极上施加载荷,实现电压的静电测量。实验结果表明:可实现5~16 kV直流高压和交流高压有效值的测量,5~10 kV范围测量精度为1.21%,10~16 kV的测量精度为0.61%。此传感器满足高电压的测量要求。

**关键词** 光纤光学;静电传感器;法布里-珀罗干涉仪;聚酯膜

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1106002

## High Voltage Electrostatic Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer

Zhang Kaiyu Zhao Hong Yang Yuqiang Zhang Weichao

(Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** Electrostatic voltmeter plays an important role in the measurement of alternating current (AC) and direct current (DC) high voltage. In order to achieve highly precise measurements in a wide range, an electrostatic voltage sensor using Fabry-Perot (FP) cavity interferometry principle is proposed and fabricated. The measurement electrodes consist of a sensor electrode and a high voltage electrode. FP cavity of the sensor is formed by optical collimator and polyester film aluminized outside. When the high voltage electrode is applied, uniform electric field is produced between polyester film and high voltage electrode. Under the pull of electric field, the shape of polyester film is deformed and the length of FP cavity changes, causing the output spectrum shift of the FP sensor. Phase demodulation method is used to obtain high voltage applied to electrode and realize the electrostatic voltage measurement. The experimental results show that the sensor can measure DC voltage and AC root-mean-square voltage in 5~16 kV. The measurement accuracy is 1.21% of 5 kV to 10 kV and 0.61% of 10 kV to 16 kV. The sensor satisfies the requirement of high voltage measurement.

**Key words** fiber optics; electrostatic sensor; Fabry-Perot interferometer; polyester film

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 120.2230

## 1 引 言

静电电压表在高电压的测量中起着非常重要的作用。目前高电压测量传统的使用方法有:电阻分压器的直流高压测量方法、阻容分压的交流高压测

量方法和静电电压表的交直流高压测量方法。相对于电阻分压和阻容分压的测量方法,静电电压表在测量过程中有着极大的内阻抗,不会影响高压输入端,在高电压测量中有着不可替代的作用。传统非

**收稿日期**: 2014-04-24; **收到修改稿日期**: 2014-06-29

**基金项目**: 国家973计划(2012CB723308)、南方电网重点科技项目(KZB2011014)

**作者简介**: 张开玉(1978—),男,博士研究生,副教授,主要从事光纤传感及高压绝缘测试等方面的研究。

E-mail: gotoayu@126.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)

接触式静电电压表主要有振动电容式、旋转叶片式、直接感应式等几种。但是振动电容式存在工艺复杂成本较高,旋转叶片式存在机械磨损影响测量精度,直接感应式存在读数无法直接转换成电量进入自动测试系统的问题,同时基于电信号输出的测试仪器信号传输存在着高压电场下被干扰的问题。鉴于传统静电电压表测量方法的诸多缺点,人们一直在寻求安全可靠、性能优越的新方法。

国外首先兴起高压静电测量的研究,从结构上突破了传统的静电电压表。较早出现的有应变计式静电电压表<sup>[1]</sup>,近年来有现场磨式直流高压静电计<sup>[2]</sup>等。此类静电电压表都有较好的测量范围和测量精度,但是应变计式电压表制备困难,而现场磨式静电计受机械旋转部件寿命和可靠性问题的影响。光学电压测量的方法具有测量灵敏度高、抗干扰能力强等优点,是非常有潜能的高压测量解决方案。现有报道中采用光学方法测量电压的方法有以下三类:1)利用马赫-曾德尔干涉仪原理设计的电场传感器<sup>[3]</sup>,此类传感器可获得较高的测量精度,但其结构中需要引入参考臂光纤,存在结构复杂问题;2)使用压电陶瓷(PZT)的电压传感器<sup>[4-5]</sup>,此类传感器存在电滞现象;3)利用晶体 BGO 的逆压电效应设计的传感器<sup>[6-8]</sup>,此类传感器加工工艺复杂,光学系统的封装困难。以上光学测量方法都是利用光电子技术和光纤传感技术来实现高电压信号的测量,但是由于制备困难、受外部条件影响造成传感器工作不稳定,在一定程度上影响了测量效果。

非本征型光纤法布里-珀罗(FP)干涉仪结构简单,环境影响因素小,常用于振动、超声等领域的测量<sup>[9-13]</sup>,取得了较好的测量效果。本文基于非本征光纤法布里-珀罗干涉仪原理,结合弹性力学理论提出并制备了用于高电压测量的 FP 静电电压传感器。传感器的 FP 腔由光纤准直器和外侧镀铝的聚酯膜构成,当在高压电极施加电压时,聚酯膜与高压电极之间产生均匀电场,在电场力作用下聚酯膜产生微形变,从而改变 FP 腔的腔长,使得输出光谱波长发生偏移,通过相位解调法获得高压电极上的电压信号,实现电压静电测量。

## 2 法布里-珀罗传感器结构和原理

### 2.1 法布里-珀罗传感器结构

考虑传感器的制备、安装和成本等因素,FP 传感器电极主体材料为铝,FP 传感器电极如图 1 所示,光纤准直器端面与聚酯膜绝对平行,在光纤准直

器端面和聚酯膜之间形成了 FP 腔。图 1 中, $a$  为聚酯膜的有效半径, $l$  为 FP 腔的腔长, $d$  为高压电极与 FP 传感器电极的间距,同时,设聚酯膜的厚度为  $h$ 。设计过程中所选用的聚酯膜厚度为  $40\ \mu\text{m}$ ,直径为  $110\ \text{mm}$ ,聚酯膜的内侧粘有直径为  $10\ \text{mm}$ 、厚度为  $60\ \mu\text{m}$  的石英薄片,薄片表面有反射率为  $50\%$  的半反射膜;聚酯膜的外侧全部镀铝,准直器端面镀有反射率为  $50\%$  的反射膜。在制备 FP 传感器时,聚酯膜使用环氧树脂与底层的材料铝相粘,待固化后,再对传感器电极进行外表面加工和电镀。

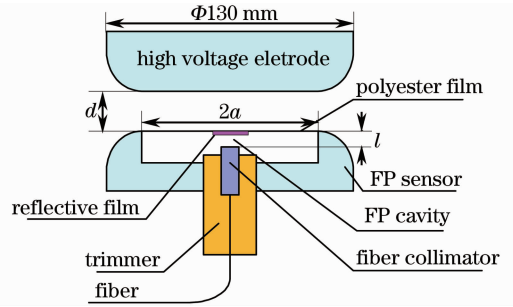


图 1 FP 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic of FP sensor

### 2.2 法布里-珀罗传感器高压静电测量原理

根据多光束干涉理论,FP 传感器的反射光输出功率为<sup>[14]</sup>

$$I(\lambda, l) = I_0(\lambda) \cdot \frac{2R \left[ 1 - \cos\left(\frac{4\pi n_0 l}{\lambda}\right) \right]}{1 + R^2 - 2R \cos\left(\frac{4\pi n_0 l}{\lambda}\right)}, \quad (1)$$

式中  $I_0(\lambda)$  为传感器的输入光功率, $R$  为腔体端面的反射率, $\lambda$  为入射光波长, $n_0$  为腔内介质的折射率,介质为空气时  $n_0 = 1$ 。

当采用相位法解调时,反射光亮条纹条件为

$$\lambda_m = \frac{4}{2m+1}l, \quad (2)$$

式中  $\lambda_m$  表示腔长为  $l$  时第  $m$  个亮条纹对应的波长,同时,由(2)式可得:

$$\Delta\lambda_m = \frac{4}{2m+1}\Delta l, \quad (3)$$

式中  $\Delta\lambda_m$  表示腔长变化  $\Delta l$  时第  $m$  个亮条纹对应波长的变化量。图 2 为腔长变化与对应波长变化量关系的示意图。

在图 1 所示的高压电极与 FP 传感器电极结构中,高压电极施加电压,FP 传感器电极接地。在给定电压不变的情况下,电极间形成了一个稳定的电场,即高压电极给 FP 传感器电极施加了一个均匀载荷。可得到 FP 传感器所受的匀强电场力为<sup>[15]</sup>

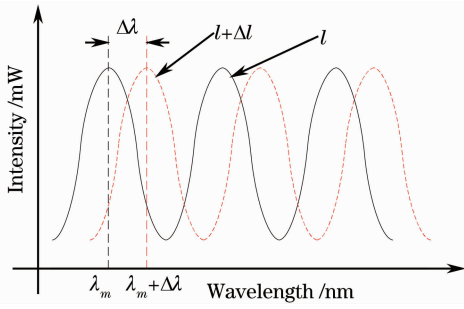


图2 腔长与波长变化示意图

Fig. 2 Schematic cavity length changes with wavelength

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r S \left( \frac{u}{d} \right)^2, \quad (4)$$

式中  $\epsilon_0$  为空气的介电常数,  $\epsilon_r$  为电极间介质的相对介电常数, 电极间介质为空气, 有  $\epsilon_r = 1$ ,  $S$  为 FP 传感器电极的面积,  $u$  为高压电极施加的电压,  $d$  为两电极间的距离。所受的均匀载荷为

$$q = \frac{dF}{dS} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left( \frac{u}{d} \right)^2. \quad (5)$$

在均匀载荷作用下, FP 传感器的聚酯膜受力拉伸产生变形, 从弹性力学理论可知薄膜的中心处有最大扰度<sup>[16]</sup>

$$w_{\max} = \frac{a^4}{64D} q, \quad (6)$$

式中  $w$  为薄膜的扰度,  $a$  为聚酯膜的有效半径,  $q$  为施加的载荷,  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$  为抗弯刚度,  $E$  为杨氏弹性模量,  $h$  为膜厚度,  $\nu$  为泊松比。

将(5)式代入(6)式有

$$u^2 = \frac{128Dd^2}{\epsilon_0 a^4} w_{\max}, \quad (7)$$

在 FP 传感器薄膜因电场力产生弹性微形变的过程中, 本质是在均匀载荷  $q$  的作用下, FP 传感器的腔长产生变化, 故薄膜的最大扰度  $w_{\max}$  即传感器 FP 腔的腔长变化量  $\Delta l$ , 将(3)式代入(7)式可得:

$$\Delta \lambda_m = \frac{\epsilon_0 a^4}{32Dd^2(2m+1)} u^2, \quad (8)$$

通过(8)式, 可计算出外施电压。

对于交流电压, 由于聚酯膜尺寸大, 一般情况下

一阶固有频率远低于 50 Hz, 但此系统可测得其有效值。

### 3 仿真分析

为了验证高压电极和 FP 传感器电极间的电场分布情况, 利用电磁场仿真软件 CST 对两电极进行静电场仿真分析, 如图 3 所示。电极边缘设计成圆角, 半径为 10 mm, 使边缘曲率半径不至于过小产生电场集中, 导致局部放电。设高压电极给定电压为 10 kV, FP 传感器电极接地, 电极间距为 10 mm。仿真结果表明: 两电极间电场分布均匀, 电极边缘为非均匀分布; 在设计的圆角半径尺寸下, 边缘处最大场强不大于电极中央的平均场强, 其中间电场强度为  $1.092 \times 10^6$  V/m, 与理论计算基本一致。远小于常温常压湿度条件下气体的击穿场强  $3 \times 10^6$  V/m。

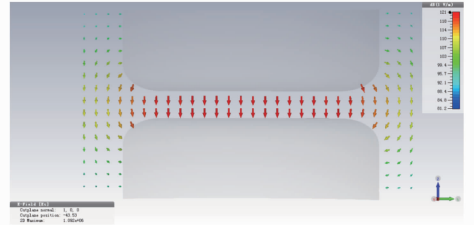


图3 电场仿真

Fig. 3 Electric field simulation

为进一步验证 FP 传感器聚酯膜在一定载荷电压下的受力产生形变情况, 利用有限元软件 ANSYS 对聚酯膜进行仿真分析, 聚酯膜的相关参数如表 1 所示。首先, 设施加在高压电极上的电压分别为 5、10、15 kV, 由(4)式可以计算得到均匀电场力大小分别为  $5.25 \times 10^{-3}$ 、 $2.101 \times 10^{-2}$ 、 $4.727 \times 10^{-2}$  N。其次, 将计算所得的电场力作为有限元软件模拟施加的均匀载荷, 通过给定边界条件等一系列处理计算可以得到不同载荷时的聚酯膜形变情况。仿真分析如图 4 所示, 从图中可以看出, 当聚酯膜周边固定时, 薄膜中心的变形量最大, 对应膜的最大变形量分别为  $9.12 \times 10^{-7}$ 、 $3.65 \times 10^{-6}$ 、 $8.22 \times 10^{-6}$  m, 与薄膜理论分析聚酯膜的受力变形基本一致。

表1 聚酯膜相关参数

Table 1 Parameters of polyester film

Radius /mm	Thickness / $\mu\text{m}$	Young's modulus /Pa	Poisson's ratio
55	40	$4.0 \times 10^9$	0.335

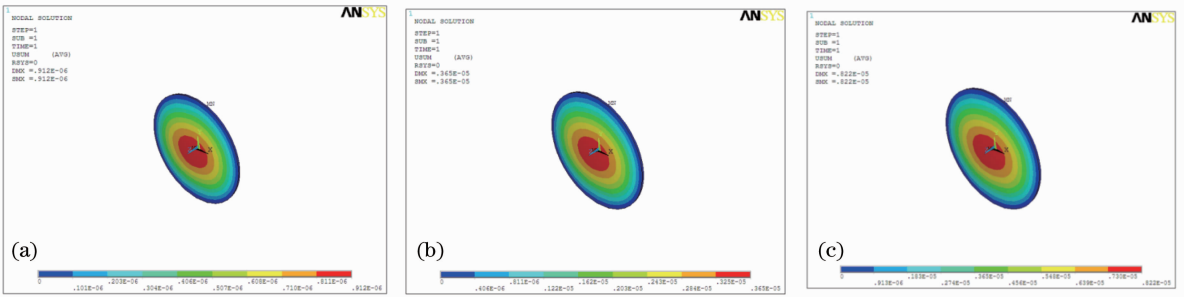


图 4 电压为(a) 5 kV、(b) 10 kV、(c) 15 kV 时聚酯膜的形变

Fig. 4 Deformation of the polyester film with (a) 5 kV, (b) 10 kV, (c) 15 kV load voltage

## 4 静电电压测量系统实验与标定

### 4.1 实验系统组成

为了实现电压的静电精确测量,建立 FP 传感器的静电电压测量系统,图 5 为测量系统示意图。系统由三部分组成:高压单元、FP 传感测量单元和信号处理单元。其中高压单元由调压器、直流(DC)

高压电源、保护电阻、高压探头和示波器等构成,FP 传感测量单元由高压电极、FP 传感器电极、光纤准直器和辅助调节装置等构成,信号处理单元由放大自发辐射(ASE)宽带光源、信号隔离器、耦合器和光谱仪(OSA)等构成。

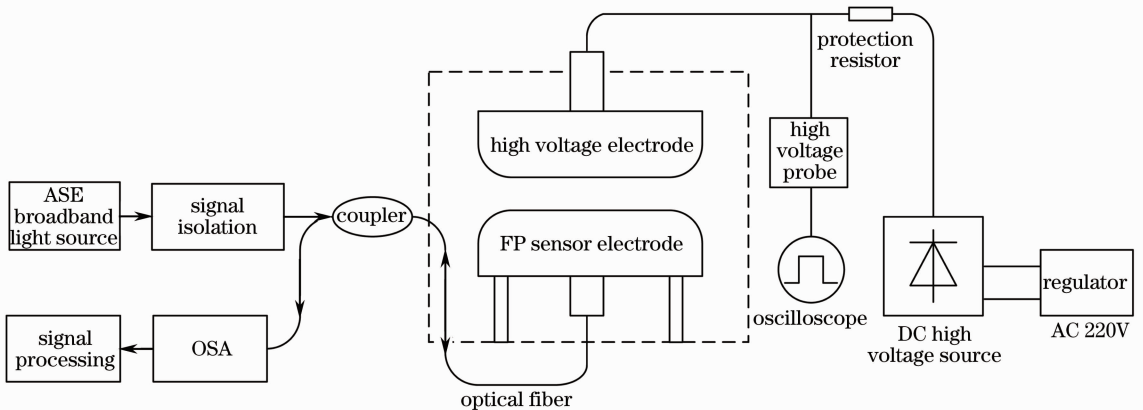


图 5 FP 传感器静电电压测量原理图

Fig. 5 Diagram of electrostatic voltage measurement system with FP sensor

实验前,将高压电极和 FP 传感器电极固定在绝缘装置上,其中高压电极的高度可调,将两电极间距离调至 10 mm。输入电压为交流(AC)220 V,频率为 50 Hz,通过调压器调节直流高压电源,调压器的调节范围是 0~250,直流高压电源输出范围是 0~60 kV,经保护电阻后接至高压电极。同时,选用泰克的高压探头 P6015A 作为直流高压的监测探头,利用泰克示波器实时监测施加在高压电极的电压。

### 4.2 法布里-珀罗传感器实验

在实验过程中,放大自发辐射宽带光源的中心波长为 1550 nm,其发出的宽带光通过信号隔离器后经耦合器进入光纤和准直器,进入到 FP 腔内来回反射,形成干涉,再经同一光纤输出,通过光谱仪得到反射输出的光谱。从 0 开始调节调压器的输

出,同时利用高压探头和示波器实时测量施加在高压电极上的电压,实验过程中,当输入的直流电压增加至 16.2 kV 时,电极间开始出现局部放电现象,由此确立了传感器的测量范围。

图 6 是 FP 传感器电极在不同直流高压输入下的输出光谱图,图中输入直流电压分别为 0、3、6、9 kV,随着电压的增加,FP 传感器输出光谱的偏移量也随之增大,与理论分析相一致。

### 4.3 法布里-珀罗传感器的标定与分析

虽然(8)式给出了反射光谱的中心波长变化量与外施电压的关系,但实际应用中计算复杂。因此需要对传感器系统进行标定,得出波长变化量与外施电压的简单解析关系式。标定过程中利用泰克示波器和高压探头 P6015A 作为标准器具,其测量范围为 DC 0~20 kV,测量精度优于 0.5%。标定过

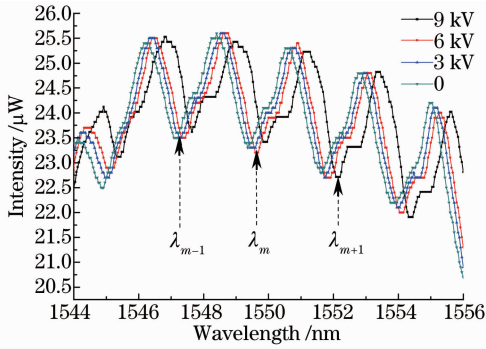


图 6 不同载荷时的光谱图

Fig. 6 Spectra with different loads

程步骤为：1) 以 600 V 的等间距对全量程 0~16 kV 进行划分；2) 根据传感器量程分点情况，由小到大逐渐增加外施电压，同时记录对应反射输出光谱的中心波长数据和外施电压值；3) 将外施电压由大到小逐渐减下来，同时记录对应中心波长数据和外施电压值。对传感器进行多次正、反行程往复循环测试。

由(8)式和实验数据均可以看出这两者间是非线性关系，因此采用了二次多项式非线性拟合，取标定过程中的一组测量数据进行拟合，拟合结果如图 7 所示。拟合方程为  $\Delta\lambda_m = 0.0075u^2 + 0.0002u + 0.0031$ ，其拟合度为 0.99987。精度计算过程中采用分段法进行精度计算，0~5 kV 范围内由于精度很低，故舍去此范围；5~10 kV 和 10~16 kV 范围分别用该段起始电压值处的精度代替此段范围的精度。通过上述实验结果表明：可实现 5~16 kV 直流高压和交流高压有效值的测量，5~10 kV 范围测量精度为 1.21%，10~16 kV 的测量精度为 0.61%。

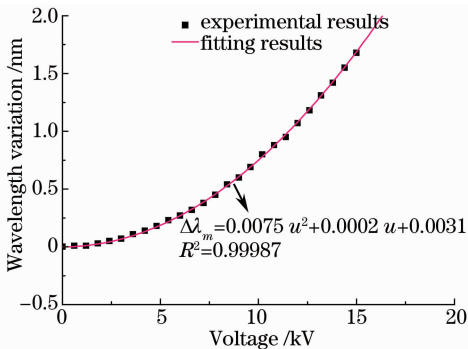


图 7 波长变化量与电压关系图

Fig. 7 Wavelength variation versus voltage

电压测量的系统误差主要来源于施加给高压电极的直流高压电源，同时环境温度的变化也会给测量造成误差。为了进一步提高系统的测量精度，可采取的措施有：1) 采用更高精度的精密直流电压源；

2) 改进传感器的设计，从结构上对传感器进行温度补偿；3) 改善拟合模型，采用分段拟合、增加数据拟合点数等方法。

图 8 为整体 FP 传感器静电电压测量系统实物图。

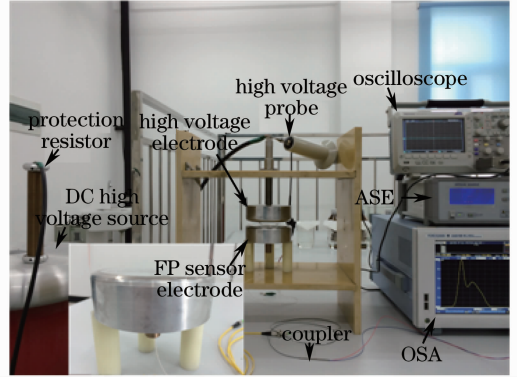


图 8 系统实物图

Fig. 8 Photograph of system

## 5 结 论

根据电场力原理、弹性力学理论和非本征光纤 FP 干涉仪原理，设计和制备了光纤 FP 电压传感器，可用于高压测量。FP 光纤干涉仪一个反射面的聚酯膜在电场力作用下产生微位移改变 FP 腔的腔长，实现电压测量。根据电场仿真分析设计了电极系统；根据电场力、弹性力平衡微分方程解获得 FP 腔长变化与电压的关系并由力学仿真验证了此关系。高压测量实验验证了理论结果，实验结果表明 FP 传感器可实现 5~16 kV 直流高压和交流高压有效值的测量，5~10 kV 范围测量精度为 1.21%，10~16 kV 的测量精度为 0.61%，能够满足高压静电测量的要求，同时，传感器体积小，结构简单，无电滞现象，具有较好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Koin Kawamura, Saburo Sakamoto, Fumitoshi Noto. Design and development of new electrostatic voltmeter using strain gauge [J]. IEEE Tran Industry Applications, 1989, 25(3): 563-568.
- 2 Peter Tant, Bruno Bolsens, Tom Sels, et al.. Design and application of a field mill as a high-voltage DC meter [J]. IEEE Trans Instrumentation and Measurement, 2007, 56(4): 1459-1464.
- 3 Tao Zhu, Zhixiang Ou, Meng Han, et al.. Propylene carbonate based compact fiber Mach-Zehnder interferometric electric field sensor [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(10): 1566-1572.
- 4 M Mozafari, Z Sanjabi, N Granpayeh. Design and fabrication of piezo-optical Fabry-Perot voltage sensor [C]. Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference, 2008. 39-40.
- 5 Regina Célia da Silva Barros Allil, Marcelo Martins Werneck. Optical high-voltage sensor based on fiber Bragg grating and PZT

- piezoelectric ceramics [J]. IEEE Trans Instrumentation and Measurement, 2011, 60(6): 2118–2125.
- 6 M Sedlar, I Paulicka, M Sager. Optical fiber magnetic field sensors with ceramic magnetostrictive jackets [J]. Appl Opt, 1996, 35(27): 532–541.
- 7 Akiko Kumada, Kunihiko Hidaka. Directly high-voltage measuring system based on Pockels effect [J]. IEEE Trans Power Delivery, 2013, 28(3): 1306–1313.
- 8 Hui Li, Liyang Cui, Zhili Lin, *et al.*. Signal detection for optical AC and DC voltage sensors based on Pockels effect [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(6): 2245–2252.
- 9 Meng Xiang'e, Jiang Junfeng, Liu Tiegeng, *et al.*. Mathematical model of illumination of CCD in the space scanning optical fiber Fabry-Perot sensor demodulation system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1128006.  
孟祥娥, 江俊峰, 刘铁根, 等. 空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调系统中 CCD 的光照度数学模型研究[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1128006.
- 10 Zhang Jianfei, Zhuang Xuye, Wang Weimin, *et al.*. Structure design and analysis of a new type MEMS Fabry-Perot filter [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0822005.  
张建飞, 庄须叶, 汪为民, 等. 一种新型微机电系统法布里-珀罗滤波器的设计与分析[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0822005.
- 11 Zhang Weichao, Zhao Hong, Liu Tong, *et al.*. Acoustic detection technology based on fiber Bragg grating Fabry-Perot interferometer in liquid medium [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906001.  
张伟超, 赵洪, 刘通, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的液体介质声波检测技术研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906001.
- 12 You Jingjing, Wang Ming, Rong Hua, *et al.*. Fiber Fabry-Perot accelerometer based on SU-8 photoresist [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0806002.  
尤晶晶, 王鸣, 戎华, 等. 基于 SU-8 光刻胶光纤法布里-珀罗加速度传感器[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0806002.
- 13 Qu Li, Meng Yu, Zhuo Zhongchang, *et al.*. Study on delay and dispersion characteristics of the fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0806001.  
屈丽, 孟瑜, 卓仲畅, 等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗延时腔和色散特性的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0806001.
- 14 Fan Shaoqing, Guo Fuchang. Physical Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990.  
范少卿, 郭富昌. 物理光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- 15 Zhang Renyu, Chen Changyu, Wang Changchang. High-Voltage Testing Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.  
张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- 16 Yang Guitong. Introduction to Elasticity and Plasticity [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.  
杨桂通. 弹塑性力学引论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.

栏目编辑: 王晓琰