

文章编号: 0253-2239(2009)01-0219-05

基于椭圆芯保偏光纤模间干涉的光学电压互感器

刘 丰 毕卫红 郭 璇

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 设计了一种基于椭圆芯保偏光纤模间干涉的光纤电压互感器, 能对温度等环境干扰信号进行自动温度补偿。用缠绕了椭圆芯保偏光纤的石英晶体作为电压传感头, 在被测高压电场的作用下, 保偏光纤的长度因石英晶体的逆压电效应形变而受到调制, 进而改变模间干涉输出两个边瓣的光强分布, 对两个干涉输出边瓣进行探测实现高电压的测量。在地面低压端用一个缠绕了保偏光纤的压电陶瓷(PZT)实现模间静态相位差的实时调整, 以补偿环境温度变化带来的静态工作点漂移。实验结果表明, 高压电压互感器在额定电压附近能获得 0.5% 的测量精度, 在被测电压超过 10 kV 时具有很好的线性度。

关键词 光学测量; 光学电压互感器; 模间干涉; 石英晶体; 逆压电效应; 温度补偿

中图分类号 TP302 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0219

Optical Voltage Transducer Based on Modular Interference in Highly Elliptical-Core Polarization-Maintaining Fiber

Liu Feng Bi Weihong Guo Xuan

(College of Information Science & Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract An optical voltage transducer (OVT) for the electric power system based on modular interference in dual-mode highly elliptical-core polarization maintenance fiber (E-core PMF) is designed, and the temperature and environmental perturbation can be compensated automatically. A quartz crystal cylinder wrapped with highly elliptical-core fiber plays the role of voltage sensor head. The two interference output lobes' intensity from the E-core PMF is modulated with the converse piezoelectric effect of quartz crystal. A PZT wrapped with E-core PMF at ground potential serves as the static modular phase difference control and temperature compensation unit. The experimental results show that the measurement precision of is 0.5% near by rated voltage, and the OVT has a good linearity when measured voltage is greater than 10 kV.

Key words optical measurement; optical voltage transducer; modular interference; quartz crystal; converse piezoelectric effect; temperature compensation

1 引 言

目前光学电压互感器大多基于电光晶体泡克耳斯(Pockels)效应原理^[1~4], 光路中的电光晶体、透镜、起偏振和检偏器等光学元件用粘胶组装在一起, 对装配工艺要求极其严格, 抗震动和温度干扰能力差, 在实用化生产和应用过程中仍有诸多困难^[5~8]。近年来一种基于模间干涉原理的光纤传感器已经被应用于应力、水声和电场测量系统中, 它利用单根保偏光纤中两个低阶模式间的干涉实现传感, 不仅对环境干

扰具有很好的抗干扰能力, 而且结构简单, 实现方便, 能够用来设计结构灵活的各种光纤传感器^[9~12]。K. Bohnert 等^[12]利用宽带光源白光干涉原理的双模间干涉仪串联方案实现高压电压互感器的设计。但该方案的结构比较复杂, 对光源和光纤的配合要求严格, 在工业批量生产中具有较大困难^[4]。

本文利用保偏光纤模间干涉和石英晶体的逆压电效应设计实现了一种新型的光纤电压互感器, 具有结构简单, 实现方便等优点。

收稿日期: 2008-04-22; **收到修改稿日期**: 2008-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(50477001)资助课题。

作者简介: 刘 丰(1976—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事光学电压互感器和光学电流互感器等方面的研究。

导师简介: 毕卫红(1960—), 女, 教授, 主要从事光纤传感及光电检测等方面的研究。E-mail: kennan@ysu.edu.cn (通信联系人)

2 椭圆芯保偏光纤中的模间干涉

基于光纤模式理论,在椭圆芯保偏光纤中,线性偏振模 LP_{11}^e (LP_{11} 的偶模) 和 LP_{11} 的奇模不像在圆芯光纤中是简并的,而是具有较大的传播常数差,使得在椭圆芯保偏光纤中可在较宽的波长范围内实现 LP_{01} 和 LP_{11}^e 模式的传输。在模间干涉的传感应用中,一般是采用 LP_{01} 和 LP_{11}^e 两个模式的干涉来实现, LP_{11}^e 及更高的模式通过选择适当的激励波长和光纤结构来使其截止。假设光纤中传播的光是高斯光束, W_x 和 W_y 分别为高斯光束在光功率变成最大值的 $1/e^2$ 时 x 和 y 方向的半径。则 LP_{01} 模和 LP_{11}^e 的电场强度可以分别表示为^[13,14]

$$E_{LP_{01}}(x, y) = \left[\frac{Z_0}{n_1} \frac{2}{\pi W_x W_y} \right]^2 \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{W_x^2} + \frac{y^2}{W_y^2} \right) \right], \quad (1)$$

$$E_{LP_{11}^e}(x, y) = \left[\frac{Z_0}{n_1} \frac{4}{\pi W_x W_y} \right]^2 \frac{x}{W_x} \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{W_x^2} + \frac{y^2}{W_y^2} \right) \right], \quad (2)$$

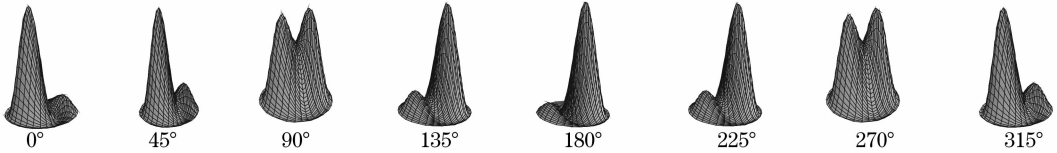


图 1 模间干涉输出光强和模间相位差之间的关系

Fig. 1 Relationship between interference output lobe intensity and modular phase difference

3 电压互感器方案设计和工作原理

3.1 电压互感器总体方案

图 2 为所设计的基于椭圆芯保偏光纤 (E-core

式中 Z_0 为真空中的平面波阻抗, n_1 为纤芯折射率, x, y 为笛卡儿坐标系参量。假设从光纤出射的两个模式具有相等的能量和相同的偏振方向, 则出射干涉光强度可表示为

$$I = |E(x, y)|^2 = |E_{LP_{01}}(x, y) + E_{LP_{11}^e}(x, y) \exp(i\Delta\varphi)|^2, \quad (3)$$

式中 I 为干涉输出光强, $\Delta\varphi = \Delta\beta \cdot \Delta L$ 为两个模式在光纤中传播后的相位差, $\Delta\beta = \beta_{LP_{01}} - \beta_{LP_{11}^e}$ 是两个模式间的传播常数差, ΔL 为光纤长度受到调制后的长度变化。图 1 为按照(1)式~(3)式进行数值计算后在不同的 $\Delta\varphi$ 情况下干涉输出光强的分布情况, 不失一般性, 计算时令 $W_x/W_y = 1.4$ 。

从图 1 中可见, 随着相位差 $\Delta\varphi$ 的变化, 干涉输出的两个边瓣之间存在着能量交换的现象, 即相位差从 0 变化 $\pi/2$ 再到 π 的过程中, 完成了一次能量从一个边瓣到另一个边瓣的交换, 相位差从 π 变化到 2π 的过程也类似。如果能对干涉输出的两个边瓣中的一个(或两个)进行探测, 就可以从探测到的光强变化得到两个模式之间的相位差, 进而实现对引起模间相位差变化的物理量的传感测量。

PMF)模间干涉原理的电压互感器系统结构原理图。高压传感头部分由四块金属电极和三段圆柱型石英晶体组成, 在每段石英晶体上等张力地缠绕一

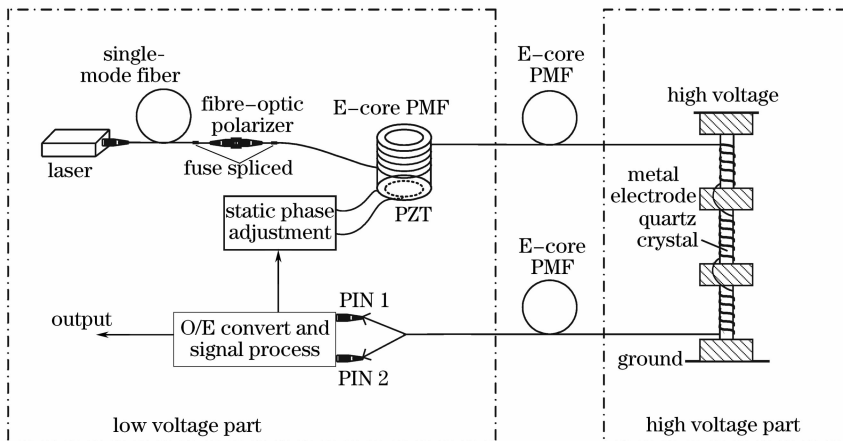


图 2 基于模间干涉的全光纤电压互感器系统结构

Fig. 2 Sketch of the optic fiber high voltage transducer based on modular interference

定圈数的椭圆芯保偏光纤(各段石英晶体上的保偏光纤是串联在一起的)。被测高电压施加在最高处的金属电极上,最低处的金属电极为地电位。这里采用四块金属电极夹三段石英晶体而不是两块金属电极夹一段石英晶体的结构,是因为高压互感器需要一定的高度来满足耐压要求,而目前我国石英晶体生产的工艺水平还难以生长较长的单晶晶体。

在地面低压部分,带 FC/APC 接口输出的激光光源发出的光经单模光纤-保偏光纤偏振器后变成线偏振光,光纤偏振器的保偏光纤输出端同一段椭圆芯保偏光纤慢轴对准熔接在一起。椭圆芯保偏光纤的一部分缠绕在一个压电陶瓷(PZT)圆筒上,在压电陶瓷圆筒上施加幅值可实时调节直流电压从而控制椭圆芯保偏光纤中两个模式之间的静态相位差,使互感器具有较好的线性度和响应灵敏度。经过压电陶瓷圆筒后的椭圆芯保偏光纤缠绕在高压传感头部分的圆柱形石英晶体外表面上,从高压传感头引出的保偏光纤到达地面低压端后,用两个探测器 PIN1, PIN2 放在干涉输出远场的特定位置探测两个干涉输出边瓣的光强,经信号处理单元进行放大、滤波等处理后输出与被测高压信号成比例的电压信号。同时,信号处理单元提取出干涉输出信号的直流分量,经电压放大后施加在压电陶瓷上作为实时调整光纤中两个模式间静态相位差的控制信号,可克服温度等缓变环境干扰对互感器测量精度的影响。

3.2 石英晶体的逆压电效应

在图 2 中,被测电压对光的作用是通过石英晶体的逆压电效应来调制保偏光纤内模间相位差实现的。圆柱型石英晶体在外电场的调制下产生周长变化,对绕制于其上的光纤长度进行调制,进而改变光纤内的模间相位差。安装晶体时使电场方向和石英晶体的电轴平行,则在高压电场的作用下引起晶体在 y 方向(机械轴)产生机械形变,实现对晶体周长的调制^[15]。

石英晶体周长变化 ΔL 和外加电压之间的关系为

$$\Delta L = -\frac{1}{2}\pi d_{11} \frac{U}{h}d, \quad (4)$$

式中 d 为晶体的直径, U 为加在石英晶体两端的电压, h 为石英晶体的高度, $d_{11} = 2.31 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 为石英晶体的压电系数。这种压电形变由缠绕在圆柱型石英晶体上的椭圆芯保偏光纤来检测。当晶体在被测电压作用下产生周长应变时,会为缠绕其上的

光纤中两个模式 LP_{01} 和 LP_{11}^c 带来额外的相位差:

$$\delta\varphi = 2\pi N\Delta L/L_{2\pi}, \quad (5)$$

式中 N 为一段石英晶体上缠绕的光纤匝数, $L_{2\pi}$ 为光纤中两个模式的模间干涉拍长。将(5)式代入(4)式中可得

$$\delta\varphi = -\frac{\pi^2 N}{L_{2\pi}}d_{11} \frac{U}{h}d. \quad (6)$$

若在理想情况下被测高压 U_P 均匀分布在三段石英晶体上(每段分得的电压为 $U = U_P/3$),每段石英晶体上缠绕的保偏光纤具有相同的匝数 N ,则总的被测高压和光纤中模间相位差的关系为

$$\delta\varphi = -\frac{\pi^2 N}{L_{2\pi}}d_{11} \frac{U_P}{h}d. \quad (7)$$

由(7)式可见,若能够测出模间相位差变化 $\delta\varphi$,就可实现对被测高压的测量,而这种相位差的变化可以通过探测模间干涉输出强度的分布来实现。

3.3 信号处理方法

两个 PIN 探测器分别探测一个干涉输出边瓣的光强后经过电流/电压转换电路变成电压信号,然后用带通滤波器和低通滤波器提取出每个探测信号的交流分量和直流分量,经过“差除以和”电路剔除光源波动的影响后,得到系统的输出电压信号和 PZT 的实时控制电压。

通过一些数学运算可以得到,两个探测器探测到的光强 I_1 和 I_2 经过“差除以和”处理后同模间相位差 $\delta\varphi$ 的关系为

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = K \sin(\delta\varphi), \quad (8)$$

式中 K 为一个同光电探测器光谱响应度有关的一个常数。当 $\delta\varphi$ 很小时, $\sin(\delta\varphi) \approx \delta\varphi$,这样

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \approx K\delta\varphi, \quad (9)$$

则系统输出电压 U_s 和被测高压 U_P 之间的关系为:

$$U_s = A \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \approx AK \frac{\pi^2 N}{L_{2\pi}}d_{11} \frac{U_P}{h}d = K_P U_P, \quad (10)$$

式中 A 为同模拟电路放大器滤波器等环节放大倍数有关的一个比例系数, $K_P = AK \frac{\pi^2 N}{L_{2\pi}}d_{11} \frac{1}{h}d$ 为系统最后输出电压 U_s 和被测电压 U_P 之间的比例系数——即电压互感器的变比。

3.4 保偏光纤模传输特性的仿真和光源波长的选择

为了实现在保偏光纤中只传输 LP_{01} 和 LP_{11}^c 模,需根据光纤的物理参数计算光纤中几个低阶模式的模传输特性,由此确定光源的中心波长。在所设计的电压测量系统中,采用美国 IVG 公司的一种椭圆

芯保偏光纤,其纤芯长轴半径为 $3\ \mu\text{m}$,短轴半径为 $1\ \mu\text{m}$,纤芯折射率为 1.470,包层折射率为 1.456,用等容原理^[16]和等效折射率法对该光纤中几个低阶模式的传输特性进行仿真计算,结果如图 3 所示。在图 3 可见,LP₀₁之后的几个低阶线性偏振模式按照归一化截止频率 ν 的不同其先后截止次序为 LP₁₁^e,LP₂₁^e和 LP₁₁^o,而不是按照二阶模的阶次顺序截止的,与参考文献[17]的结论是一致的。

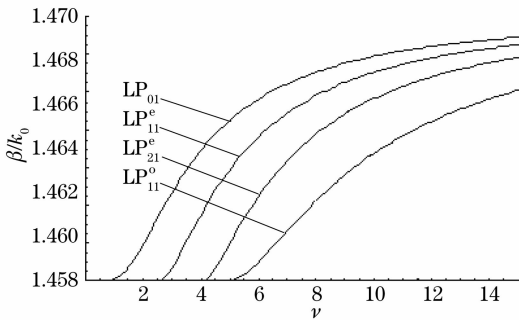


图 3 椭圆芯保偏光纤中几个低阶模式的传输特性

Fig. 3 Propagation characteristics of several low-order modes in E-core PMF

从图 3 还可见,随着归一化频率 ν 的增加(波长变短),光纤中能够传输的模式会增加,为了实现光纤中只传输 LP₀₁和 LP₁₁^e模,应该选择工作波长使归一化截止频率大约介于 2.6~4.2 之间。在本设计

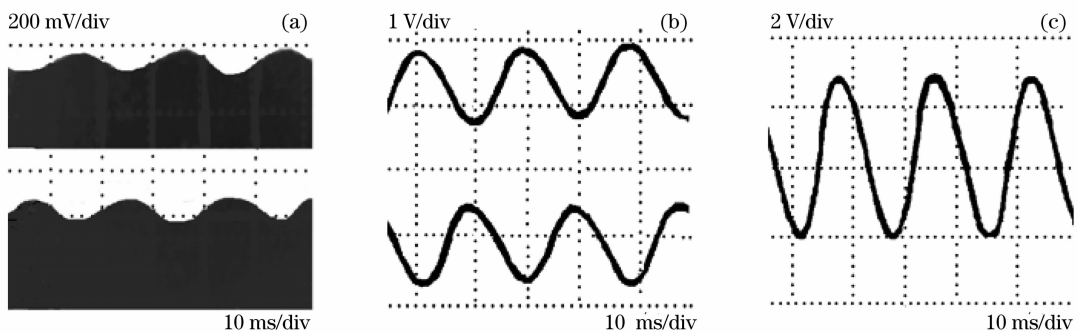


图 4 被测电压为 20 kV 时电压互感器的试验输出波形。(a) 电流/电压转换后的输出信号,(b) 经过带通滤波器和放大后的信号,(c) 输出电压信号

Fig. 4 Experimental results of high-voltage transducer when the applied voltage is 20 kV. (a) Signals from current/voltage converter, (b) signals after BPF and amplifier, (c) signal of output voltage

图 5 为被测高压和输出电压的关系曲线,纵轴为从系统低压端信号处理单元输出的低压交流信号有效值 U_0 。从图 5 中可见,当被测信号幅值超过 10 kV 时,系统具有较好的线性度,而被测信号较小时,测量精度和线性度都不理想。造成这一现象的一种可能原因是目前手工将光纤缠绕在石英晶体上的张力控制不精确,在石英晶体受到电场调制时响应不一致,导致光纤的长度变化和光弹效应引起的

中,选择工作波长为 980 nm 的台式抽运激光器(单模谱宽为 0.5 nm),按照归一化频率的定义算得 ν 约为 3.45,此时能够保证该椭圆芯保偏光纤中只有 LP₀₁和 LP₁₁^e模式能够传输。

4 实验结果

在确定了系统中一些关键器件参数后,本文按图 2 的系统方案设计了互感器样机,并进行了实验。压电陶瓷管外直径为 40 mm,内直径为 33.6 mm,压电系数为 200×10^{-12} m/V,缠绕 60 圈保偏光纤;石英晶体高度为 100 mm,直径 27 mm,每段石英晶体上缠绕 120 圈保偏光纤;变压器的型号为 TQSB-1.5/50,其输出交流调整范围为 0~50 kV;光源为中心波长为 980 nm 的抽运激光光源;探测器采用的型号为 BPW34 的 PIN,其中心响应波长为 850 nm,在 980 nm 处其响应度约为 850 nm 时的 80%。

图 4 为将高压变压器的输出电压调整到 20 kV 时从示波器观察得到的一些波形,图 6(a)为从两个光探测器的电流输出经电流/电压变换放大器后的输出波形,图 6(b)为对图 6(a)的信号进行带通滤波器(BPF)和放大后的输出波形,图 6(c)为对图 6(b)的信号进行“差除以和”处理后的输出电压波形。

模间干涉效果不明显;另外一种可能原因是目前的实验样机在干涉输出边瓣探测方法上采用的是直接在空间的固定位置放置两个 PIN 探测器,这一方面会因为空间位置的不精确带来测量误差,另一方面会因为探测器的暗电流和背景光干扰造成较小的信号变化无法被正确探测。

图 6 为各个被测高压点和实际的测量误差的关系曲线,没有给出被测电压低于 10 kV 时的几个测

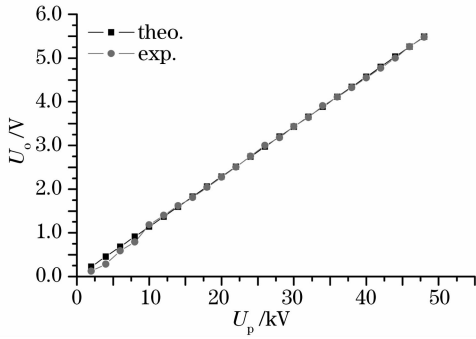


图 5 被测高压电压和输出电压之间的关系

Fig. 5 Relationship of output voltage and measured high voltage

量点,是因为当被测电压小于 10 kV 时,系统误差比较大,会造成其他测量点的误差观察的不方便。从图 6 中可见,整个测量系统在额定 35 kV 电压附近具有较好的测量精度,误差约为 0.5% 左右,且系统对大的被测信号具有更好的测量精度,说明通过进一步增加缠绕在石英晶体上的光纤匝数会改进小被测信号时的测量效果。

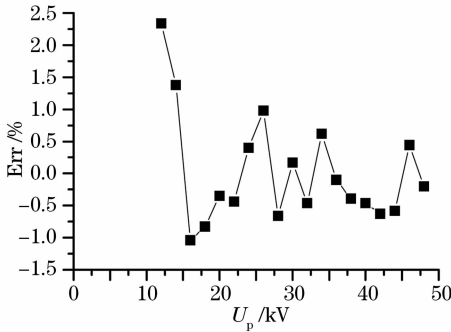


图 6 电压互感器样机的测量误差

Fig. 6 Measurement error of the high voltage transducer prototype

5 结 论

设计了一台基于石英晶体的逆压电效应和椭圆芯保偏的模间干涉原理的 35 kV 电压互感器样机,具有结构简单、实现和调试方便等优点。实验结果表明,互感器样机在额定电压附近能够获得 0.5% 的测量精度,在被测电压超过 10 kV 时系统具有良好的线性度。采用单根保偏光纤、模间干涉原理设计的高压互感器可以简单的方式实现全光纤结构,克服基于 Pockels 原理的电压互感器中存在的诸多问题,推进了光纤电压互感器的实用化。

参 考 文 献

- 1 Shi Degang, Liu Ye, Zhang Liping *et al.*. Overview of high voltage potential transformer[J]. *Transformer*, 2003, **40**(6): 11~14
时德钢,刘 晔,张丽平等. 高电压等级电压互感器综述[J]. *变压器*, 2003, **40**(6): 11~14
- 2 Li Changsheng, Cui Xiang, Li Baoshu *et al.*. A review of optical potential transducers [J]. *High Voltage Engineering*, 2000, **26**(2): 40~43
李长胜,崔 翔,李宝树等. 光纤电压传感器研究综述[J]. *高电压技术*, 2000, **26**(2): 40~43
- 3 Farnoosh Rahmatian, Patrick P. Chavez, Nicolas A. F. Jaeger. 230 kV optical voltage transducer using multiple electric field sensors[J]. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2002, **17**(2): 417~422
- 4 K. Bohnert, P. Gabus, J. Kostovic *et al.*. Optical fiber sensors for the electric power industry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(3): 511~526
- 5 Sang-Shin Lee, Min-Cheol Oh, Sang-Yung Shin *et al.*. Integrated optical high-voltage sensor using a Z-cut LiNbO₃ cutoff modulator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(9): 996~999
- 6 Changsheng Li, Toshihiko Yoshino. Optical voltage sensor based on electro optic crystal multiplier[J]. *J. Lightwave Technology*, 2002, **20**(5): 843~849
- 7 J. C. Santos, M. C. Taplamacioglu, K. Hidaka. Pockels high voltage measurement system [J]. *IEEE High Voltage Engineering Symposium*, 1999, (8): 53~57
- 8 Zhang Mingming, Li Hongbin, Liu Yanbing. Optical voltage transformer based on longitudinal Pockels effects [J]. *High Voltage Engineering*, 2005, **24**(6): 58~59, 64
张明明,李红斌,刘延冰. 基于纵向 Pockels 效应的光学电压互感器[J]. *传感技术*, 2005, **24**(6): 58~59, 64
- 9 Tomasz R. Wolinski, Wojtek J. Bock. Simultaneous twist and pressure effects in highly birefringent single-mode Bow-tie fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(3): 389~394
- 10 Shang-Yuan Huang, James N. Blake, Byoung Yoon Kim. Perturbation effects on mode propagation in highly elliptical core two-mode fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(1): 23~33
- 11 A. B. Wang, K. A. Murphy, A. M. Vengsarkar. Demodulation techniques for two-mode elliptical-core fiber sensors[J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(8): 1454~1456
- 12 K. Bohnert, G. C. de Wit, J. Nehring. Coherence-tuned interrogation of a remote elliptical-core, dual-mode fiber strain sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(1): 94~103
- 13 Helin Wang, Weihong Bi, Aijun Yang *et al.*. Modular interference characteristics of two-mode fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 621~624
- 14 Helin Wang, Weihong Bi, Aijun Yang *et al.*. Application of two-mode fiber in voltage sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 631~634
- 15 Liu Feng, Wang Haiming, Guo Xuan *et al.*. Simulation of voltage transducer using interference between modes[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, **33**(6): 89~92
刘 丰,王海明,郭 璇等. 利用模间干涉原理的电压互感器仿真[J]. *高电压技术*, 2007, **33**(6): 89~92
- 16 A. Kumar, K. Thyagarajan, A. K. Ghatak. Analysis of rectangular-core dielectric waveguides; an accurate perturbation approach[J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(1): 63~70
- 17 Arun Kumar, R. K. Varshney. Propagation characteristics of dual-mode elliptical-core optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 817~819