

双孔光子晶体光纤光学电压传感方案研究

芦 鑫 毕卫红 麻 硕 刘 丰

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 设计了一种基于双空气孔光子晶体光纤(PCF)模间干涉的光学电压传感的实验方案。用缠绕了双孔光子晶体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,双孔光子晶体光纤的长度因石英晶体的逆压电效应形变而受到调制,进而可以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对高压的测量。在低压端用一个缠绕了双孔光子晶体光纤的压电陶瓷(PZT)来调整模间初始相位差,使之处于正交状态。实验结果表明,在实验室条件下能获得 0.5% 的测量精度,具有很好的线性度。

关键词 测量;光学电压传感器;模间干涉;逆压电效应;石英晶体

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.1105003

Optical Voltage Transducer Based on Two-Hole Photonic Crystal Fiber

Lu Xin Bi Weihong Ma Shuo Liu Feng

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

Abstract An optical voltage transducer for the electric power system based on modular interference in dual-mode two-hole photonic crystal fiber (PCF) is designed. A quartz crystal cylinder wrapped with two-hole photonic crystal fiber is used as the voltage sensor head. The intensity of the two interference output lobes of the two-hole photonic crystal fiber is modulated with the converse piezoelectric effect of quartz crystal. In low voltage part, a piezoelectric ceramics (PZT) which wrapped with a piece of double core PCF is used for adjusting the static phase difference at orthogonal status. The experimental results show that the measurement precision is 0.5% by rated voltage in laboratory conditions.

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

OCIS codes 060.2270; 060.2370; 060.5295; 120.4820

1 引 言

电力工业是国家经济建设的基础工业,在国民经济建设中有举足轻重的地位。而电压互感器作为电力输配电系统中电能计量、故障保护等环节的关键设备,是电力系统中不可或缺的^[1]。目前,电力系统普遍采用的电压测量装置是传统的电磁式电压互感器。随着电力系统电压等级的提高,传统的电磁式电压互感器的缺陷如易受电磁干扰、绝缘结构复杂、造价高、存在磁饱和及铁磁谐振现象等将日益突

出^[2,3]。光纤电压传感器(OVT)具有抗电磁干扰、绝缘能力强、体积小、造价低等优点,具有传统的电磁式电压互感器无可比拟的优势。近些年来国内外对光纤电压传感器展开了广泛的研究。在对光纤电压传感器的研究中,大多是基于 Pockels 效应的 OVT,其抗振动和温度干扰能力差,在实用化生产和应用过程中有很多困难。近几年基于模间干涉原理的光纤传感器被应用于应力、水声和电压测量系统中,它利用单根保偏光纤中两个低阶模式间的干

收稿日期: 2011-05-26; **收到修改稿日期:** 2011-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(60907033)、河北省自然科学基金(E2009000373)和秦皇岛市科学技术研究与发展计划(201001A053)资助课题。

作者简介: 芦 鑫(1977—),男,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: luxin@ysu.edu.cn

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

涉实现传感,其结构简单、实现方便,具有良好的抗环境干扰能力^[4~12]。与常规的基于椭圆芯保偏光纤的OVT相比,采用双孔光子晶体光纤(PCF)的OVT具有以下优点:1)当模间相位差变化一个周期时,双孔光子晶体光纤长度变化量 $\Delta L_{2\pi}$ 比椭圆芯保偏光纤小,灵敏度高,因此OVT中需要的光纤长度比较短,大大节约了成本^[13~15];2)温度稳定性好^[16]。由于双孔光子晶体光纤模间相位差的温度灵敏度不足椭圆芯保偏光纤的50%,在OVT这种需要很长的光纤才能实现的系统中,良好的温度稳定性以及在较短长度下即可实现较高拉伸灵敏度显得尤为重要。

本文利用双孔光子晶体光纤和石英晶体的逆压电效应设计实现了一种新型的光学电压传感方案,具有结构简单、实现方便等优点。

2 双孔光子晶体光纤中模间干涉的基本原理

文中采用的光纤是由丹麦 Crystal Fiber A/S 公司生产的 PM-1550-01 型双孔光子晶体光纤,其小空气孔的直径 $d_1=2.2\ \mu\text{m}$,大空气孔的直径 $d_2=4.5\ \mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda=4.4\ \mu\text{m}$,其扫描电子显微镜(SEM)照片如图1所示。

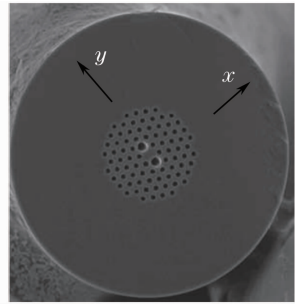


图1 双孔光子晶体光纤的扫描电子显微镜照片

Fig.1 SEM micrograph of the two-hole PCF

当光纤中只传输 LP_{01} 模和 LP_{11} 偶模时,这两个模式在输出端的干涉场是两个模式的叠加^[17]。干涉输出光强为

$$I = |E(x, y)|^2 = E_{01}(x, y)^2 + E_{11}(x, y)^2 + 2E_{01}(x, y)E_{11}(x, y)\cos\Delta\varphi, \quad (1)$$

式中 $E_{01}(x, y)$ 和 $E_{11}(x, y)$ 分别为 LP_{01} 模和 LP_{11} 偶模的模场函数, $\Delta\varphi=\Delta\beta L=(\beta_{01}-\beta_{11})L$ 为两个模式在光纤中传输后的相位差, $\Delta\beta=\beta_{01}-\beta_{11}$ 为两个模式的传输常数差, L 为光纤的长度。

在外界扰动作用下,输出的干涉光强随相位差变化而发生变化,表现为两个输出边瓣互相交换能量。模间的相位差在 $0\sim 2\pi$ 之间变化时,干涉输出光强的分布形式如图2所示。

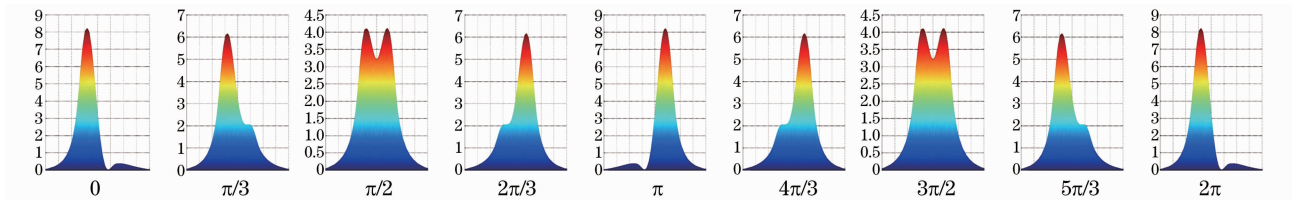


图2 相位差 $\Delta\varphi$ 在 $0\sim 2\pi$ 之间变化时,输出光强的分布形式

Fig.2 Evolution of the output lode intensity I at $\Delta\varphi$ between 0 and 2π

从图2中可以看出,当模间相位差 $\Delta\varphi=0$ 时,干涉输出的两个边瓣的光强为左强右弱;当 $\Delta\varphi=\pi/2$ 时,干涉输出的两个边瓣具有相等的强度;当 $\Delta\varphi=\pi$ 时,干涉输出呈现为左弱右强的分布特点。当相位差变化 2π 时,强度场有一个完整的正弦变化。从输出光强上来看,两个边瓣强度是互相反向的,且当 $\Delta\varphi=\pi/2$ 时能够获得最好的响应灵敏度和线性度,在双边瓣探测的传感应用中,应该通过调节静态工作点使得这两个模式之间静态相位差 $\Delta\varphi$ 为 $\pi/2$ 。

当光纤受到外部扰动作用时,光纤几何参数的变化以及扰动带来的折射率变化都会导致各阶模式的传输常数发生改变。将初始状态下的传输常数差

表示为 $\Delta\beta_0$,则 $\Delta\beta$ 和 L 的变化引起的相位差变化 $\Delta(\Delta\varphi)$ 可表示为

$$\Delta(\Delta\varphi) = \Delta\beta_0 \Delta L + \Delta(\Delta\beta)L. \quad (2)$$

研究表明,当波长确定时,光纤各阶模式的传输常数变化量 $\Delta\beta$ 与应变 ϵ 是线性关系,所以传输常数差的变化量 $\Delta(\Delta\beta)$ 与应变 ϵ 是线性关系,可表示为

$$\Delta(\Delta\beta) = K\epsilon, \quad (3)$$

式中 $K=\delta(\Delta\beta)$ 为单位应变作用下传输常数差 $\Delta\beta$ 的变化量。

因此在单位应变作用下,(2)式可以化简为

$$\Delta(\Delta\varphi) = \Delta\beta_0 \Delta L + K\epsilon L = \Delta\beta_0 \cdot \Delta L + \delta(\Delta\beta)\epsilon L = [\Delta\beta_0 + \delta(\Delta\beta)]\Delta L. \quad (4)$$

3 光学电压传感的实验方案

实验方案采用全光纤方案,以石英晶体的逆压电效应和双孔光子晶体光纤中 LP_{01} 模和 LP_{11} 偶模

之间的模间干涉原理来实现高电压的测量,图3为系统的实验原理图。

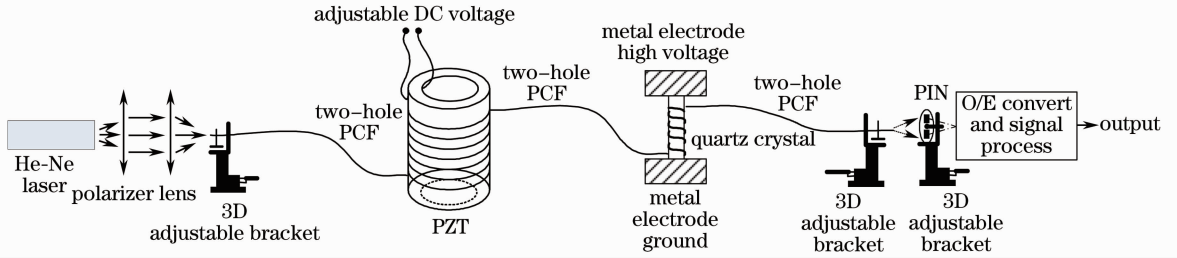


图3 基于石英晶体的电压传感器实验原理图

Fig. 3 Experimental scheme of the optic fiber high voltage transducer based on quartz crystal

高压部分由两块金属电极和一段圆柱型石英晶体组成。在石英晶体上等张力地缠绕着一定圈数双孔光子晶体光纤,并在石英晶体的上下两端分别放置两块金属电极。被测电压施加在高处的金属电极上,低处的金属电极为地电位,石英晶体和金属电极共同构成电压传感器的高压部分。低压部分由光源、调整静态相位的压电陶瓷(PZT)以及最后的信号处理部分构成。作用在金属电极上的高电压通过石英晶体的逆压电效应对双孔光子晶体光纤的模间相位差进行调制,整个实验光路采用全光纤结构,具有结构简单、安全稳定等特点。

He-Ne激光器发出的光透过偏振片后经棱镜耦合直接进入光纤,调制偏振片的角度,使光纤中只传输 x 偏振模。在PZT上加直流电压信号,利用PZT的逆压电效应,使缠绕在PZT上的光纤长度受到调制,作用是调整模间初始相位差,使之处于正交状态。用光电探测器探测输出光强变化,经信号处理电路后由示波器观察输出信号和被测调制信号的变化情况。为了消除光源波动带来的影响,可以用两个探测器对两个输出边瓣的光强变化同时探测,经过电流/电压的转化电路变成电压信号,然后采用差除以和电路来消去光源的影响。

在图3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双孔光子晶体光纤内模间相位差实现的。石英晶体的轴线方向为电轴 x ,与 x 轴垂直的两个正交方向一个为机械轴 y 轴,一个为光轴 z 轴。当沿 x 轴方向施加电场时,将带来 y 方向的形变,即将圆形截面沿 y 方向拉长,石英晶体截面周长的变化将会引起缠绕于上面的双孔光子晶体光纤长度的变化,并将最终引起光纤中相位差的改变^[10,18]。石英晶体的晶轴方向以及电场的施加方向如图4所示。

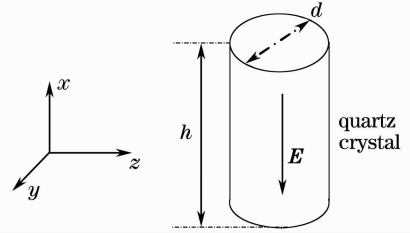


图4 用于电压传感器中的石英晶体晶轴方向

Fig. 4 Axis of quartz crystal in voltage transducer

石英晶体周长变化 ΔL 和外加电压之间的关系为

$$\Delta L = -\frac{1}{2}d_{11} \frac{U}{h} l = -\frac{1}{2}d_{11} \frac{U}{h} \pi D, \quad (5)$$

式中 U 为加在石英晶体两端的电压, $d_{11} = 2.31 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 是石英晶体的压电系数, h 为石英晶体的高度, D 为晶体的直径。

所以,缠绕在石英晶体上面的双孔光子晶体光纤的长度变化量为

$$\Delta L = -\frac{1}{2}d_{11} \frac{U}{h} \pi DN, \quad (6)$$

式中 N 为光纤缠绕的圈数。

将(6)式代入到(4)式中,可以得到石英晶体的控制电压与模间相位差的变化量 $\Delta(\Delta\varphi)$ 之间的关系为

$$\Delta(\Delta\varphi) = -\frac{1}{2}[\Delta\beta_0 + \delta(\Delta\beta)]d_{11} \frac{U}{h} \pi DN. \quad (7)$$

令

$$K_U = -\frac{1}{2}[\Delta\beta_0 + \delta(\Delta\beta)] \frac{d_{11}}{h} \pi DN, \quad (8)$$

则相位差的变化量可以表示为

$$\Delta(\Delta\varphi) = K_U U. \quad (9)$$

由此可以看出,若能够测出模间相位差的变化量 $\Delta(\Delta\varphi)$,就可以实现对被测电压的测量。由(6)式可以看出, K_U 是一个与光源波长有关的函数,当光源波长确定时, $\Delta(\Delta\varphi)$ 与被测电压 U 呈线性关

系,而 $\Delta(\Delta\varphi)$ 又与干涉光强有关,所以可以通过对光强的探测而实现电压信号的测量。

4 双孔光子晶体光纤模传输特性仿真

为了实现在双孔光子晶体光纤只传输 LP_{01} 和 LP_{11} 偶模,应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来确定光源中的中心波长。对于 LP_{11} 偶模来说,两个偏振模的有效折射率与基空间填充模的有效折射率的值非常接近,很难直观地看出它们之间的大小关系,因此,在这里引入相对有效折射率 N_{eff} 的概念,其表达式为

$$N_{\text{eff}} = \frac{n_{\text{eff}}}{n_{\text{FSM}}}. \quad (10)$$

从(10)式可以看出,若 $N_{\text{eff}} > 1$,也就说明模式的有效折射率 n_{eff} 大于基空间填充模的有效折射率 n_{FSM} ,此时对应的模式可以在光纤中传输。图 5 表示的是 LP_{01} 模和 LP_{11} 偶模的 N_{eff} 与波长的关系。

从图 5 可以看出,根据基空间填充模法计算得到的 LP_{11} 偶模的两个正交偏振模的截止波长分别为 $0.66 \mu\text{m}$ 和 $0.79 \mu\text{m}$,与采用模场半径突变方法计算得到的模式截止波长相近。

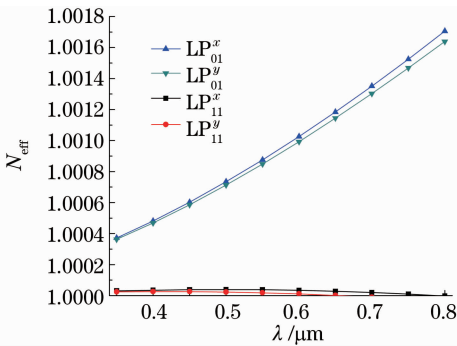


图 5 双孔光子晶体光纤 LP_{01} 模和 LP_{11} 偶模相对有效折射率与波长的关系

Fig. 5 Relationship between the N_{eff} of guided modes and wavelength

由此可以看出,随着波长 λ 的增加,光纤中能够传输的模式会减少。当工作波长小于 $0.66 \mu\text{m}$ 时,双孔光子晶体光纤中就只能传输 LP_{01} 模和 LP_{11} 偶模。在实验中,选择工作波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器,此时能够保证双孔光子晶体光纤只有 LP_{01} 模和 LP_{11} 偶模的模式能够传输。

5 实验结果

在确定了本实验系统中的一些关键器件参数

后,按照图 3 所示的实验系统进行了实验。石英晶体的直径和高度都为 8 cm ,缠绕 50 圈双孔光子晶体光纤,如图 6 所示;压电陶瓷圆筒外径 11 cm ,圆筒内径 10.7 cm ,缠绕 30 圈双孔光子晶体光纤,如图 7 所示;光源为波长 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器;变压器采用的是轻型交直流多用型高压试验变压器,型号为 TQSB-1.5/50,其输出交流调整范围是 $0 \sim 50 \text{ kV}$ 。

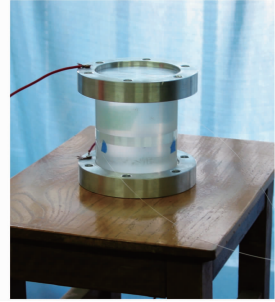


图 6 实验中使用的石英晶体
Fig. 6 Quartz crystal in experiment

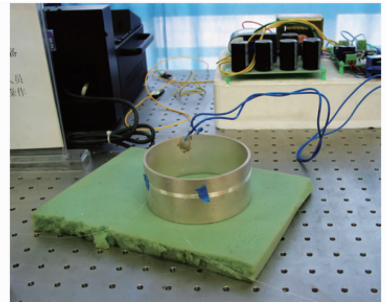


图 7 实验中使用的压电陶瓷
Fig. 7 PZT in experiment

实验时,为了避免背景光的干扰,将输出端光纤和光电探测器放置在暗箱中,将低压端的处理电路放到一个金属盒中,做好电磁屏蔽,避免高压端的干扰。

调整信号处理电路中放大器的放大倍数,使被测高压为 35 kV 时,对应输出电压为 4.5 V ,被测高压和输出电压均用有效值表示。被测高压与输出电压之间的关系如图 8 所示。

为了初步验证系统的工作稳定性,调整信号处理电路中放大器的倍数,使被测电压为 35 kV 时的输出电压为 4.5 V ,并保持系统不变,每隔 1 h 记录一次输出电压,被测电压为 35 kV 时系统稳定性实验曲线如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,高压传感器实验系统在实验室环境中具有良好的稳定性。

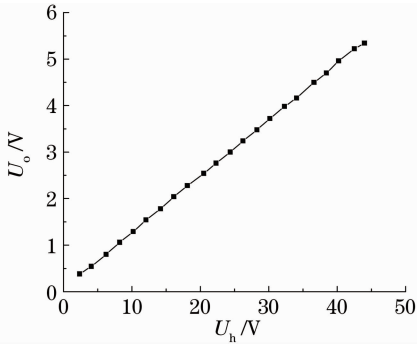


图 8 被测高压和输出电压之间的关系

Fig. 8 Relationship of output voltage and measured high voltage

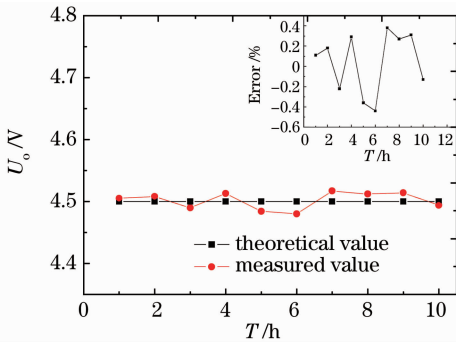


图 9 被测电压为 35 kV 时系统稳定性实验曲线

Fig. 9 Relationship of output voltage and measured high voltage

6 结 论

采用石英晶体的逆压电效应和双孔光子晶体光纤模间干涉原理实现的光学电压传感方案具有结构简单、实验和调试方便等优点。在实验室条件下，系统具有较好的工作稳定性和较高的测量精度，误差约为 0.5%。采用单根光子晶体光纤，利用模间干涉原理设计的光学电压传感方案可以用简单的方式实现全光纤结构，克服基于 Pockels 原理的电压传感器中存在的诸多问题，推进了光纤电压传感器的实用化。

参 考 文 献

- 1 Wang Junmei, Wu Chunfeng, Wang Xiaoqi *et al.*. The developing and present application manner of the instrument transformers for power system in our Country[J]. *Electrical Equipment*, 2007, **8**(1): 5~10
王均梅, 吴春风, 王晓琪等. 我国电力互感器的发展概况及应用现状[J]. *电力设备*, 2007, **8**(1): 5~10
- 2 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

- 3 Luo Chengmu, Zhang Guixin, Wang Peng *et al.*. Electronic type instrument transformer and its present technical development manner[J]. *Electrical Equipment*, 2007, **8**(1): 20~24
罗承沐, 张贵新, 王 鹏等. 电子式互感器及其技术发展现状[J]. *电力设备*, 2007, **8**(1): 20~24
- 4 C. E. Covington, J. Blake. Two-mode fiber-optic bending sensor with temperature and strain compensation[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(9): 676~678
- 5 J. N. Blake, B. Y. Kim, H. E. Engan. Analysis of intermodal coupling in a two-mode fiber with periodic microbends[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4): 281~283
- 6 Helin Wang, Weihong Bi, Aijun Yang *et al.*. Application of two-mode fiber in voltage sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 631~632
- 7 Helin Wang, Aijun Yang. Central distance of intermodal mode patterns of elliptical core two-mode fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9): 640~643
- 8 Sachin N. Dekate, Barry Grossman. Rotationally insensitive circular-core two-mode fiber-optic strain sensor[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(11): 2183~2189
- 9 Ahmad Safaai-Jazi, John C. Mckeeman. Synthesis of intensity patterns in few-mode optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(9): 1047~1052
- 10 Liu Feng, Bi Weihong, Guo Xuan. Optical voltage transducer based on modular interference in highly elliptical-core polarization-maintaining fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **29**(1): 219~223
刘 丰, 毕卫红, 郭 璇. 基于椭圆芯保偏光纤模间干涉的光学电压互感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 219~223
- 11 Tinko A. Eftimov, Wojtek J. Bock. Polarization analysis of LP₀₁ and LP₁₁ intermodal interference in highly birefringent bow-tie optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(12): 1925~1936
- 12 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
- 13 R. Kotynski, K. Panajotov, M. Antkowiak *et al.*. Interplay of form and material birefringence in photonic crystal fibers: application for sensing [C]. *Proceeds of the 3rd European Symposium on Photonic Crystals*, 2004. 95~98
- 14 Marcin Szpulak, Tadeusz Martynkien, Wacław Urbanczyk. Effects of hydrostatic pressure on phase and group modal birefringence in microstructured holey fibers[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(24): 4739~4744
- 15 Gabriela Statkiewicz, Tadeusz Martynkien, Wacław Urbanczyk. Measurements of modal birefringence and polarimetric sensitivity of the birefringent holey fiber to hydrostatic pressure and strain [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **241**(4-6): 339~348
- 16 Jian Ju, Zhi Wang, M. S. Demokan. Temperature sensitivity of a two-mode photonic crystal fiber interferometric sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(20): 2168~2171
- 17 B. Y. Kim, J. N. Blake, S. Y. Huang *et al.*. Use of highly elliptical core fibers for two-mode fiber devices[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(9): 729~731
- 18 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