

文章编号: 0258-7025(2009)08-2057-07

高压光子晶体光纤传感器系统的研究

余先伦 赵威威 程 伟

(重庆三峡学院物理与电子工程学院光电信息技术实验室, 重庆 404000)

摘要 光子晶体光纤(PCF)压力传感器可广泛用于各种环境压力监测中。采用全矢量有限元方法对双芯光子晶体光纤的双折射特性进行了分析,采用二阶微分方程理论模型模拟了光子晶体光纤高压传感器对外界压力的响应,并应用这个模型讨论了外界压力作用对敏感元件有效折射率和双折射的影响,提出了一种高压光子晶体光纤传感器方案。计算结果表明高压致双空气孔芯光子晶体光纤的双折射值可达很高,光子晶体光纤传感器系统更为简洁紧凑。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 双折射; 光子晶体光纤传感器

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.2057

Research of High-Pressure Photonic Crystal Fibers Sensors

Yu Xianlun Zhao Weiwei Cheng Wei

(*Opto-Electronic Information Science and Technology Laboratory, Department of Physics and Electronics Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China*)

Abstract Photonic crystal fibers (PCF) sensors have broad application in the pressure environmental monitoring. The birefringence of the dual-hole core photonic crystal fibers is analysed by the full-vector finite element methods, the photonic crystal fibers sensors response to pressure is simulated by the second-order differential equation theoretical model and the influence to the effective refractive index and the birefringence of the sensing element are discussed by the model, the high-pressure photonic crystal fibers sensors scheme is presented. Calculation results show that the birefringence of the dual-hole core photonic crystal fibers is very large. The system of the pressure photonic crystal fibers sensors is brevity and compaction.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; birefringence; photonic crystal fiber sensor

1 引 言

光纤传感技术可广泛用于环境压力测量,光纤压力传感器在对压力进行测量的同时必须对温度进行补偿,以降低温度对光纤传感器测量性能的影响。为了减少光纤传感器的复杂性和提高光纤传感器的测量精度,可用一种新型的光纤材料——光子晶体光纤(PCF)替代传统敏感元件,构造一种新型光子晶体光纤压力传感器。标准的 PCF 制作方法是石英管棒反复堆积拉丝而成,这种制作方法可以很容易地按要求设计出 PCF 的结构参量,空气孔位置直径有很大的选择空间,实现 PCF 独特的光学特性。在

PCF 中芯层与包层有较高的折射率对比,当压力作用在 PCF 表面时,PCF 纤芯和包层将产生各向异性的应力并出现几何畸变,在 PCF 内导致折射率分布的变化并产生很高的双折射,通过光弹性效应,压力致双折射结果可直接用来测量受到的压力^[1~6]。

光纤压力偏振传感器主要利用敏感元件的双折射特性,传统高双折射(HB)光纤的双折射值一般在 10^{-4} 量级,而制作工艺上的可塑性可使 PCF 的双折射比传统 HB 光纤高一个数量级。选择合适的结构参数可使高双折射光子晶体光纤在极宽波长范围内仅支持基模传输,模场强度图样和偏振主轴不会沿光纤长度和环境扰动而发生变化,且在很长的波长

收稿日期: 2008-08-25; 收到修改稿日期: 2008-12-24

基金项目: 重庆市教委(KJ081106)和重庆三峡学院课题及科研团队项目资助课题。

作者简介: 余先伦(1967—),男,硕士,副教授,主要从事激光器、光纤通信、光电子器件和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: yuxian896@sohu.com

区域中双折射值可达 10^{-3} 量级甚至可达到 10^{-2} 量级,高双折射光子晶体光纤对压力更敏感而对温度不敏感,采用 PCF 构造的高压力传感器系统更简洁紧凑^[7~15]。

2 PCF 结构及特性

假设光脉冲沿 PCF 径向方向传播,采用全矢量有限元方法对 PCF 光脉冲传播特性进行分析,光脉冲在 PCF 中传播的本征方程可表示为^[3]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{n_{x,y}^2} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{n_{x,y}^2} \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \left(k_0^2 - \frac{\beta^2}{n_{x,y}^2} \right) E = 0, \quad (1)$$

其中 E 为光脉冲电场分量, $n_{x,y}$ 为光子晶体光纤横向折射率分布, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 表示自由空间波矢, λ 为自由空间波长, β 为传播常数。PCF 可以在一个极宽的波长范围内支持单模运转,基模在 PCF 中传播时有效折射率可定义为

$$n_{\text{eff}} = \text{Re}(\beta/k_0). \quad (2)$$

在(1)式中,采用各向异性完全匹配层作为吸收边界条件,并用混合边缘节点方法划分光子晶体光纤横截面成无数的曲线混合元,则(1)式的矩阵方程为^[3]

$$\mathbf{kE} = k_0^2 n_{\text{eff}}^2 \mathbf{ME}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{k} , \mathbf{M} 为描述 PCF 电磁特性的有限元矩阵,由 PCF 材料特性决定,具有稀疏特性, \mathbf{E} 为 PCF 中传播的光脉冲离散电场矢量。解本征方程(3)可得描述基模模场分布的传播常数 $\beta_{x,y}$, 表达式为

$$\beta_{x,y} = \beta_0 + \frac{k_0 \int_A (n_{x,y} - n_0) E_{x,y}^2 dx dy}{\int_A E_{x,y}^2 dx dy}, \quad (4)$$

其中 β_0 为非扰动传播常数, n_0 为纤芯材料固有折射率, A 为光纤横截面积, $E_{x,y}$ 为电场 PCF 横向分布。根据(4)式能够很方便地分析各种 PCF 中光脉冲的传播特性。

PCF 相双折射定义为 $B = \frac{2\pi}{\lambda} (\beta_x - \beta_y)$, 群双折

射定义为 $G = B - \lambda \frac{dB}{d\lambda}$, 构造特定结构的 PCF 可使

PCF 双折射取得很大的值并在极宽波长范围内保持单模传播特性, PCF 的横截面结构如图 1 所示。PCF 包层由六角排列的空气孔组成, 纤芯为一个椭圆芯并引入两个相邻缺陷形成两个大的空气孔, 纤

芯双孔的位置和直径的选择可以有很大的范围, 根据光波导理论, PCF 相模式双折射的表达式为

$$B = \frac{e^2 (2\Delta n)^{2/3}}{a} \frac{4}{V^3} \frac{(\ln V)^3}{1 + \ln V}, \quad (5)$$

其中 $V = k_0 a (n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2)^{1/2}$ 表示归一化频率, $n_{\text{co}}, n_{\text{cl}}$ 为纤芯和包层折射率, a 表示 PCF 平均纤芯半径, $e = (1 - \mu^2)^{1/2}$ 为 PCF 纤芯的偏心率, $\mu = a_y/a_x$, a_x, a_y 表示 PCF 两个正交方向的纤芯半径, 而 $\Delta n = (n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2)/2n_{\text{co}}^2$ 表示 PCF 相对折射率差。

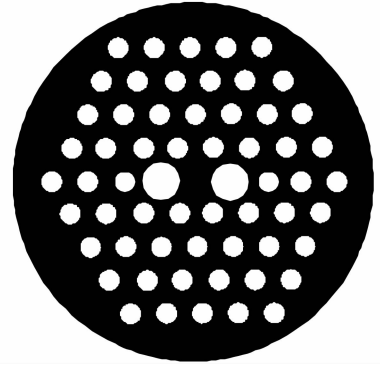


图 1 双芯 PCF 横截面结构图

Fig. 1 Cross-section structure of dual-core of PCF

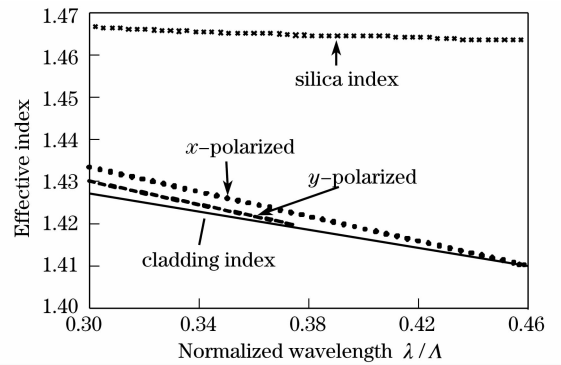


图 2 PCF 有效折射率曲线

Fig. 2 Effective index of PCF

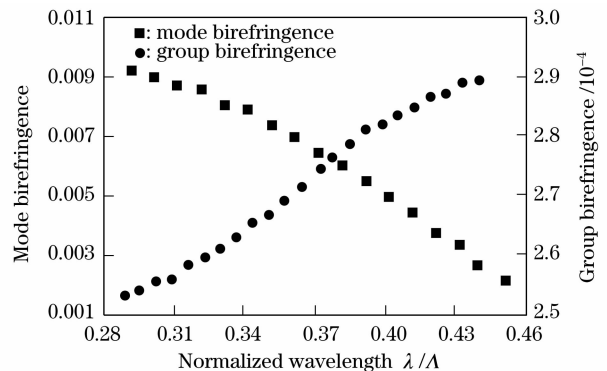


图 3 PCF 双折射对波长的依赖性

Fig. 3 Birefringence of PCF as a function of wavelength

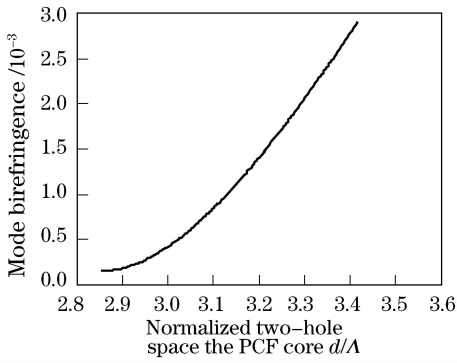


图 4 PCF 双折射与光子晶体光纤纤芯双孔归一化间距的关系

Fig. 4 Birefringence of PCF as a function of normalized spacing of the core dual-holes

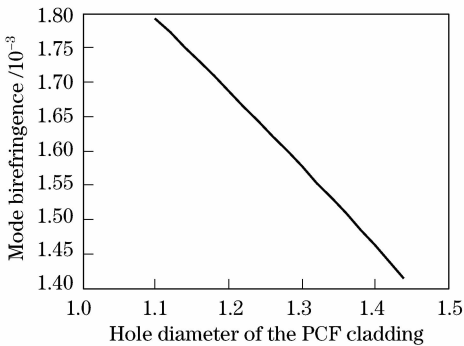


图 5 PCF 双折射与光子晶体光纤包层空气孔直径的关系
Fig. 5 Birefringence of PCF as a function of cladding air-hole diameter

根据(2)式和(4)式 PCF 传播光脉冲基模的两个模式 x -偏振和 y -偏振的有效折射率都是光脉冲波长的函数,其依赖关系如图 2 所示。(5)式表明 PCF 的双折射与波长相关,与纤芯双孔位置结构和大小相关,与包层空气孔的排列和孔间距相关,图 3 表示的是在 PCF 结构参数确定情况下双折射与波长的关系曲线(计算中孔间距 $\Lambda=3.5 \mu\text{m}$,小孔直径 $d=1.3 \mu\text{m}$,大孔直径 $D=2.3 \mu\text{m}$,假设两个大孔沿中心对称),图 4 表示的是在一定波长和包层空气孔大小确定情况下双折射与纤芯双孔位置关系曲线($\Lambda=3.5 \mu\text{m}$, $d=1.3 \mu\text{m}$, $\lambda=1.3 \mu\text{m}$),图 5 表示纤芯双孔对称确定情况下双折射与包层空气孔排列的关系($D=2.3 \mu\text{m}$)。

3 双芯 PCF 压力响应模型

PCF 高压传感器的敏感元件是 PCF,传感器对外界高压力的响应本质上就是 PCF 对外界高压力的响应。在外界高压力作用下 PCF 的结构、PCF

径向和切向折射率分布将发生变化,假设:1) 敏感光纤 PCF 光学长度与实际长度一致,不作区分;2) 在整个光学长度范围内 PCF 的横截面是均匀一致的;3) 外界作用力径向均匀作用在整个 PCF 内,外界作用力变化是时间的函数,在 PCF 内产生的形变属于弹性形变。根据假设,采用一个二阶微分方程模型对敏感元件双芯 PCF 的高压力响应进行转换模拟,可表示为

$$\sigma(t) = m \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2} + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + k\varepsilon(t), \quad (6)$$

其中 m 是 PCF 等效常质量, η 是 PCF 粘滞系数, k 是 PCF 刚度系数, $\sigma(t)$ 是外界作用在 PCF 产生的应力, $\varepsilon(t)$ 是在外力作用下 PCF 传感器的响应。 $\sigma(t)$ 和 $\varepsilon(t)$ 都是时间的函数,对(6)式进行变换可得

$$\frac{\sigma(t)}{m} = \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_c \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \omega_c^2 \varepsilon(t), \quad (7)$$

其中 $\omega_c = \sqrt{k/m}$, $\xi = \frac{\eta}{2m\omega_c}$ 。(7)式的解可表示为

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t \sigma(\tau) e^{-\xi(t-\tau)} \cos \omega_d(t-\tau) d\tau + e^{-\xi\omega_c t} \left[\frac{\varepsilon_0}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_d t - \psi) + \frac{v_0}{\omega_d} \cos \omega_d t \right], \quad (8)$$

其中 $\psi = \arctan \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$, $\omega_d = \omega_c \sqrt{1-\xi^2}$, 而 $\varepsilon_0 = \varepsilon(0)$, $v_0 = d\varepsilon(0)/dt$ 代表 PCF 的初始条件。(8)式中第一项表征敏感元件 PCF 响应与外部作用力的关系,第二项表征 PCF 响应与初始条件的关系,根据三条假设外界初始压力和 PCF 传感器初始响应都从零状态开始,则(8)式可化简为

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t \sigma(\tau) e^{-\xi(t-\tau)} \cos \omega_d(t-\tau) d\tau. \quad (9)$$

一般而言,外界作用力从 0 到稳定状态的持续时间很短,即瞬间完成的,则外界作用应力 $\sigma(\tau)$ 是一个冲击响应函数,即 $\sigma(t-\tau) = \begin{cases} 0, & \tau \neq t \\ \sigma, & \tau = t \end{cases}$, 则(9)式解可表示为

$$\varepsilon(t) = k_1 \sigma_r(t) + k_2 \sigma_\varphi(t), \quad (10)$$

其中 σ_r, σ_φ 表示 PCF 径向和切向应力, k_1, k_2 是与 PCF 材料弹性系数相关的常数。(10)式表明在外界高压力作用下,双芯敏感元件 PCF 的响应与产生的应力呈线性关系。根据弹性理论,在外界高压力作用下双芯 PCF 纤芯某处产生的应力极坐标形式表示为^[10]

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{F_r}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{F_r}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right) \cos 2\varphi + \frac{F_\varphi}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{F_\varphi}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right) \cos 2\varphi, \\ \sigma_\varphi = \frac{F_r}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{F_r}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\varphi + \frac{F_\varphi}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{F_\varphi}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\varphi, \end{cases} \quad (11)$$

其中 F_r, F_φ 分别表示 PCF 横截面内径向和切向压力, $a=D/2$ 是 PCF 纤芯大空气孔的半径, r 是某点距纤芯中心的距离, φ 表示 r 与双孔中心间连线夹角, 其值可以反映纤芯两个空气孔的位置和大小, 如

图 6(a)中插图所示。而图 6 中(a),(b),(c),(d)分别表示了纤芯某点产生的应力与空气孔大小的敏感性。图 7 表示在纤芯中某点产生的应力与空气孔距纤芯中心距离的关系。

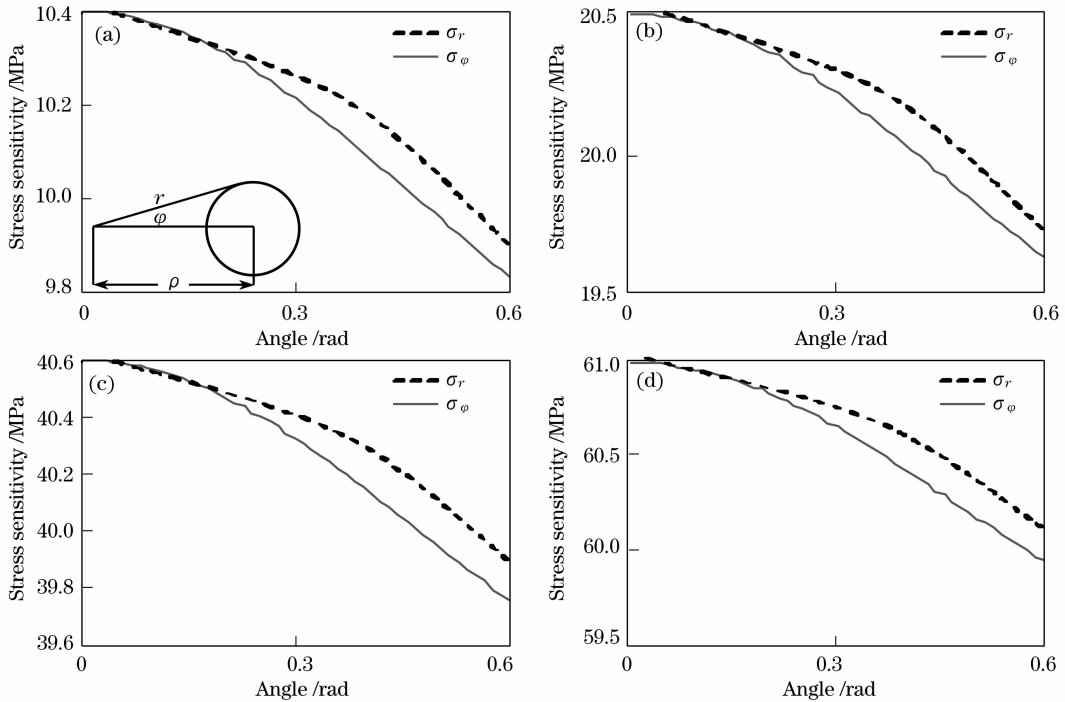


图 6 在高压作用下 PCF 产生的应力与极角 φ 的关系 [(a),(b),(c),(d)压力参考值分别为 10,20,40,60 MPa]

Fig. 6 Relationship between the stress of PCF and the polar angle in high pressure [(a),(b),(c),(d) pressure reference is 10,20,40 and 60 MPa]

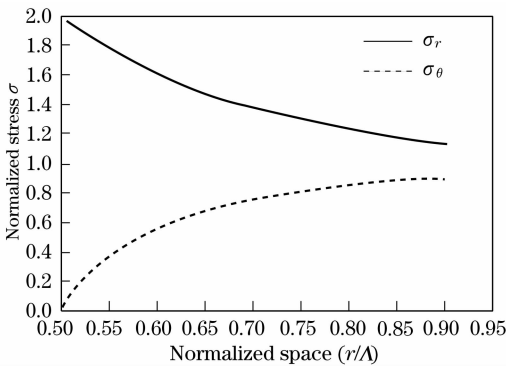


图 7 在高压作用下 PCF 产生的应力与边孔位置的关系 (参考压力 20 MPa)

Fig. 7 Relationship between the stress of PCF and the position of side-hole in high pressure (pressure reference is 20 MPa)

图 6 和图 7 表明在外界高压作用下, 双芯 PCF 在纤芯所产生的应力与纤芯空气孔的大小和

位置相关, 随着空气孔的增大, 双孔相距距离的增加, 同样压力所产生的应力减少。对于包层的应力计算可以采用同样方法计算得到。

(11)式表明高压作用会在 PCF 内各点产生不同的应力, 根据(10)式 PCF 内产生的应力使 PCF 各处发生不同的应变, PCF 横截面内各点应变将使 PCF 折射率分布发生波动, 最终导致 PCF 中传播的光脉冲有效折射率发生波动。根据弹光理论, PCF 中有效折射率的波动量表达式为

$$\begin{cases} \Delta n_{\text{eff}x} = -\frac{1}{2} n_x^3 [p_{11} \epsilon_x + p_{12} (\epsilon_y + \epsilon_z)], \\ \Delta n_{\text{eff}y} = -\frac{1}{2} n_y^3 [p_{12} (\epsilon_x + \epsilon_z) + p_{11} \epsilon_y], \\ \Delta n_{\text{eff}z} = -\frac{1}{2} n_z^3 [p_{12} (\epsilon_x + \epsilon_y) + p_{11} \epsilon_z], \end{cases} \quad (12)$$

其中 n_x, n_y, n_z 表示 PCF 横向和径向折射率, p_{11}, p_{12} 表示 PCF 弹光 Pockels 系数, $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 表示在高压作用下 PCF 的横向和径向产生的应变, PCF 纤芯硅应变光学系数取值 $p_{11} = 0.121, p_{12} = 0.27$, 而硅折射率取 $n_o = 1.465$, 则在外界高压作用下, PCF 有效折射率波动关系曲线如图 8 所示。

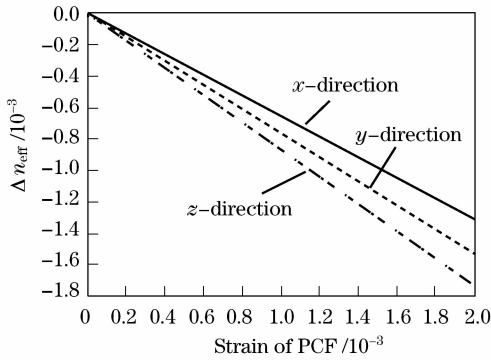


图 8 有效折射率波动量与 PCF 应变的关系曲线
Fig. 8 Effective index fluctuation as a function of strain for the PCF

在外界高压作用下 PCF 中产生双折射的主要因素有 PCF 几何畸变使光纤出现应变产生双折射, PCF 折射率分布变化即光弹性效应产生双折射, 因此 PCF 在压力作用下双折射改变量可表示为

$$\Delta B = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\beta + C \cdot F \cdot 2\pi/\lambda, \quad (13)$$

其中 $\Delta\beta$ 为光脉冲在 x 方向和 y 方向传播常数之差, C 为常数, F 为外界压力。(13) 式中第一项表示光弹性效应产生的双折射, 可联合 (12) 式, (2) 式和 (4) 式计算得到。第二项表示 PCF 几何畸变所产生的附加双折射。常数 C 表示为 $C = n^3 (p_{11} - p_{12}) (1 + \gamma) / (2E)^{[8]}$, 其中 E 为 PCF 纤芯杨氏模量, γ 为泊松比。分别取 $E = 70.8 \text{ GPa}, \gamma = 0.165^{[9]}$, 则图 9 表示 PCF 在外界高压作用下引起的双折射波动变化量与外界压力关系, 而在很高的外界压力作用下 PCF 双折射的波动量与入射光脉冲波长的关系曲线如图 10 所示。

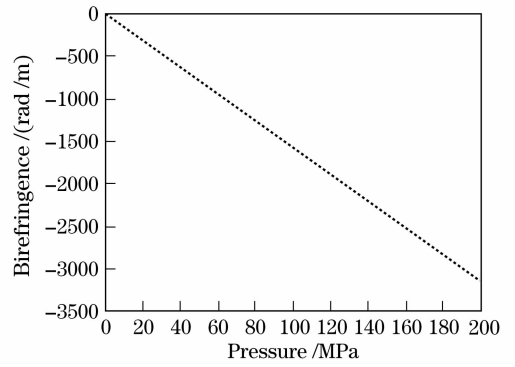


图 9 PCF 高压力致双折射图

Fig. 9 Birefringence of PCF by the high pressure

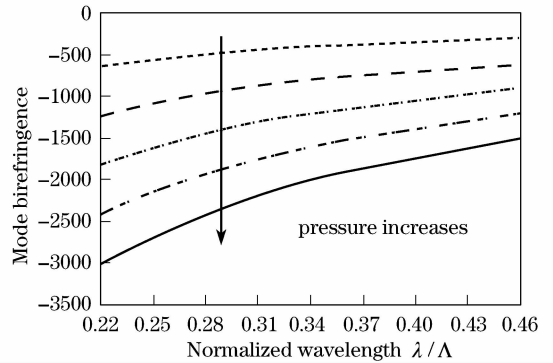


图 10 高压力作用下 PCF 模式双折射与波长的关系曲线
Fig. 10 Relationship between the mode birefringence and the wavelength in the high pressure

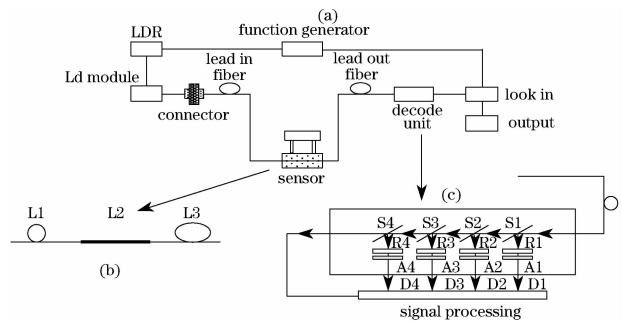


图 11 PCF 高压力传感器装置图。(a) 传感器系统;
(b) 敏感元件; (c) 解码系统

Fig. 11 Device system of high pressure PCF sensor
(a) sensor; (b) sensitive element; (c) decode unit

4 PCF 高压力传感器系统

PCF 高压力传感器的设计方案如图 11(a) 所示, 激光光源发出的光脉冲经偏振器转变为线偏振光通过一个耦合器进入 PCF 传感器系统, PCF 传感器的敏感光纤由三部分组成, 如图 11(b) 所示, L1 是导入单模光纤, L2 是压力敏感单元 PCF, L3 是导出单模光纤, 三部分按 45° 连续轴旋转拼接在一起, 最后待测量调制的信号从导出光纤进入解码系统如图 11(c) 所示。

根据假设, 当线偏振光沿高双折射 PCF 的主偏振轴成 45° 入射时将激发出平行光纤 x 轴和 y 轴的两个本征模, 两个本征模在 PCF 中传播时具有两个不同的介质折射率 n_x, n_y , 两个本征模传播通过 PCF 时将产生不同的相位漂移量, 在导出光纤输出端两种光波的相位延迟可表示为 $\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_x - n_y)$, 其中 L 表示 PCF 的长度, 因外界高压作用对敏感元件 PCF 的双折射和长度都将发生影响, 则输出端

两种光波相位延迟波动量可表示为这两部分的叠加,即 $\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} \Delta(n_x - n_y) + \frac{\pi(n_x - n_y)}{\lambda} \Delta L$, 则在外界高压作用下敏感元件 PCF 的相位延迟波动量随压力的变化可表示为

$$\frac{\partial \Delta\phi}{\partial F} = \frac{2\pi L}{\lambda} \left[\frac{dB}{dF} - (n_x - n_y) \frac{d\epsilon}{dF} \right]. \quad (14)$$

(14)式中第一项表征压力致 PCF 双折射引起的相位波动增量,可通过(13)式计算获得,第二项表征因压力作用造成 PCF 几何应变引起的相位波动增量,可通过(10)式计算得到。(14)式是图 11(c)解码系统探测 PCF 传感器输出端输出信号的基础,两个本征模相位波动造成输出信号干涉条纹发生移动或输出信号强度周期性变化,解码系统探测出这种改变并探测出外界压力的作用。

在 PCF 高压传感器中,外界环境温度的变化将引起传感器敏感元件 PCF 应变和双折射的改变,根据假设可认为 PCF 中热扩散是均匀的,热导致的应力可以忽略,整个温度敏感性来源于热光效应,比伸长效应和横截面扩展效应高得多,则 PCF 双折射随温度的变化量可表示为^[6]

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dT} &= \frac{\partial B}{\partial L} \frac{\partial L}{\partial T} + \frac{\partial B}{\partial n_s} \frac{\partial n_s}{\partial T} + \frac{\partial B}{\partial n_a} \frac{\partial n_a}{\partial T} = \\ &= \frac{\partial B}{\partial L} L \alpha_s + \frac{\partial B}{\partial n_s} \beta_s + \frac{\partial B}{\partial n_a} \beta_a, \end{aligned} \quad (15)$$

式中 dT 表示温度增量, $\partial n_s, \partial n_a$ 表示硅和空气折射率增量,而 $\alpha_s = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T}$ 表示硅热扩展系数,其值是

$5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, $\beta_s = \frac{\partial n_s}{\partial T}$ 表示硅的热系数,其值为

$1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $\beta_a = \frac{\partial n_a}{\partial T}$ 表示空气的热系数,其值是

$-0.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ^[6]。(15)式中第一项表示敏感元件 PCF 热扩展性能,第二、三项表示硅和孔填充物折射率的变化,3 个系数的取值主要依据 Sellmeier 方程,则 PCF 模双折射的热敏感性与传播光脉冲波长的关系曲线如图 12 所示。

经过计算表明,PCF 的温度敏感度远低于标准的 HB 光纤,其值远低于 PCF 的压力敏感度。因此用 PCF 作为传感器的敏感元件可以不用温度补偿,这也即图 11(b)中传感部分只有 3 段光纤,而不同于普通的光纤传感器需要 5 段光纤,这可使传感器结构简洁紧凑,且不影响传感器的性能和测量精度。

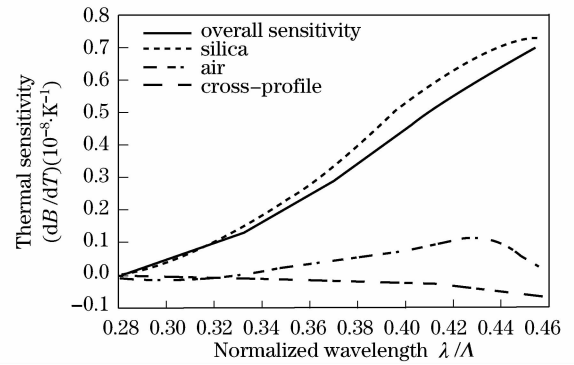


图 12 PCF 高压传感器敏感元件模双折射的热敏感与传播脉冲波长的关系曲线

Fig. 12 Relationship between the mode birefringence and the wavelength in the sensitive element of the high pressure PCF sensor

5 结 论

具有双空气孔芯 PCF 具有很高的双折射并对压力作用非常敏感,而环境温度变化的影响对 PCF 的性能影响却不是很大,因此在光纤压力传感器中敏感元件采用 PCF 具有巨大的优越性。在 PCF 高压传感器中存在新的传感机理,而这是标准单模光纤传感器所不具备的,PCF 由纤芯和包层空气孔组成,空气孔折射率随温度的变化比硅要小一个数量级且符号相反,PCF 传感器的热效应是由横截面折射率不均匀变化引起的结果,因此温度影响要比普通单模光纤小得多。同时 PCF 包层空气孔大小、形状和纤芯结构的选择可使 PCF 横截面内纤芯和包层有很大的折射率对比,折射率截面很容易实现,这个对比在高压作用下可使 PCF 横截面内几何形变非常明显,使 PCF 模双折射的值增加很高,且模双折射的优化可通过控制空气孔的大小和形状来实现,所以采用 PCF 作为高压传感器的敏感元件可以不进行温度补偿,系统可以更为简洁紧凑。

参 考 文 献

- 1 A. Peyrilloux, T. Chartier, A. Hideur *et al.*. Theoretical and experimental study of the birefringence of a photonic crystal fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(2):536~539
- 2 J. Ju, W. Jin, M. S. Demokan. Properties of a highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10):1375~1377
- 3 Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba. Single-polarization single-mode photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10):1384~1386
- 4 Yuan Jinhui, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Investigation of a step-structure photonic crystal fiber with flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1167~1171
苑金辉, 侯蓝田, 周桂耀 等. 一种阶梯结构的色散平坦光子晶体

- 光纤的研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(6):1167~1171
- 5 Carlos Palavicini, Yves Jaouen, Guy Debarge. Phase-sensitive optical low-coherence reflectometry technique applied to the characterization of photonic crystal fiber properties [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4):361~363
- 6 Nikolaos J. Florous, Ahailendra K. Varshney, Kunimasa Saitoh. Thermo-optical sensitivity analysis of highly birefringent polarimetric sensing photonic crystal fibers with elliptically elongated veins [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(15):1663~1665
- 7 M. Delgado-Pinar, A. Diez, J. L. Cruz *et al.*. High extinction-ratio polarizing endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(8):562~564
- 8 Mario Martinelli, D. S. Oliviero, Pier Giorgio Sona. Distributed fiber-optic interferometric sensor for the detection of pressure fluctuations in reservoirs [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(9):1435~1439
- 9 Wojtek J. Bock, Jiahua Chen, Tinko Eftimov *et al.*. A photonic crystal fiber sensor for pressure measurements [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2006, **55**(4):1119~1123
- 10 Yu Xianlun, Jiang Youchang, Song Mingcheng. Effect of pressure on the property of the solid-core photonic crystal fibers [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(2):187~190
- 余先伦, 姜友嫦, 宋明成. 压力作用对实芯光子晶体光纤特性影响分析 [J]. 激光技术, 2008, **32**(2):187~190
- 11 Zhang Xiaojuan, Zhao Jianlin, Cui Li. Analysis of mode properties of photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7):1379~1383
- 张晓娟, 赵建林, 崔莉. 一种高双折射光子晶体光纤的模式特性分析 [J]. 光学学报, 2008, **28**(7):1379~1183
- 12 Gong Taorong, Yan Fengping, Wang Lin *et al.*. Analysis of properties of high birefringence photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):559~562
- 龚桃荣, 延凤平, 王琳等. 高双折射光子晶体光纤特性分析 [J]. 中国激光, 2008, **35**(4):559~562
- 13 F. Couny, F. Benabid, P. S. Light. Reduction of Fresnel back-reflection at splice interface between hollow core PCF and single-mode fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(13):1020~1022
- 14 A. Kudlinski, G. Bouwmans, Y. Quiquempois *et al.*. Experimental demonstration of multiwatt continuous-wave supercontinuum tailoring in photonic crystal fibers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**:141103
- 15 A. V. Husakou, J. Herrmann. Frequency comb generation by four-wave mixing in a multicore photonic crystal fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(19):3867~3869