

文章编号: 1001-3806(2008)02-0187-04

压力作用对实芯光子晶体光纤特性影响分析

余先伦, 姜友嫦, 宋明成

(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: 为了能使光子晶体光纤用于光纤压力传感器等无源器件中, 采用弹光理论分析方法对压力作用下光子晶体光纤纤芯和包层中应力、横向结构和折射率分布的变化进行了理论分析和实验模拟, 获得了压力作用下对光子晶体光纤中传播光脉冲的相位和模式双折射的影响的数据, 采用相干干涉测量技术方法能测量光子晶体光纤中光脉冲相位和模式双折射的波动量值并进一步推算出作用在光子晶体光纤上的外界压力变化量。结果表明, 光子晶体光纤可用作光纤压力传感器中的敏感元件。这一结果对光子晶体光纤在光纤压力传感器中的进一步应用是有帮助的。

关键词: 光纤光学; 光子晶体光纤; 弹光理论; 应力; 相位; 模式双折射

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A

Effect of pressure on the property of the solid-core photonic crystal fibers

YU Xian-lun, JIANG You-chang, SONG Ming-cheng

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

Abstract: In order to adopt photonic crystal fibers broadly in the passive devices such as fiber press sensors, the stress of photonic crystal fiber cores and cladding, the transversal structure and the refractive index were theoretically analyzed and simulated by means of elastic-optical theory, and the effect of pressure on the pulse phase and mode birefringence in photonic crystal fibers were discussed. The pulse phase fluctuation and mode birefringence variation in photonic crystal fibers were measured by means of coherent interference technology, and the pressure in the photonic crystal fibers was calculated. It is indicated that the photonic crystal fibers might be used as sensitive elements in the fiber press sensors. It is help that the photonic crystal fibers is more application in the fiber press sensors by this result.

Key words: fiber optics; photonic crystal fiber; elasto-optical theory; stress; phase; mode birefringence

引 言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 是由纯石英材料和一组沿光纤长度方向周期排列的气孔构成, 气孔的尺度与 PCF 中导波波长在同一量级。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 的结构参量如孔距、孔径孔距比, 实现 PCF 独特的光学传输特性^[1-6], 并可以广泛用于偏振控制器、传感器、滤波器及各种有源无源光器件中^[7-11]。与传统光纤相比, PCF 芯层与包层有较高的折射率对比, 在外界压力作用下, PCF 的结构、PCF 横向折射率分布等会发生变化, 使 PCF 中传播光脉冲相位和模式双折射发生改变, 光子

晶体光纤可用作光纤压力传感器中的敏感元件^[9-10]。

1 PCF 传输模型

光脉冲在 PCF 中传播电场矢量可用 Helmholtz 方程 $\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0$ 描述, 其中 $k = \omega \sqrt{\mu_c \epsilon_c}$, ω 是电场角频率, μ_c, ϵ_c 是 PCF 的磁导率和介电常数, k 也可写成 $k = \alpha - i\beta$, α 代表电场在 PCF 中的衰减系数, β 是传播常数。如果光脉冲是横电磁波并沿 $+z$ 方向传播, 则上式电场解为 $\vec{E}(x, y, z, t) = [E_x(x, y)\vec{e}_x + E_y(x, y)\vec{e}_y] \times e^{-\alpha z} e^{i\beta z} e^{i\omega t}$ 。PCF 的横向结构由纤芯和包层两部分组成, 横向折射率分布可看作是纤芯折射率和包层等效折射率两部分叠加而成, 它们可以分别独立进行描述, 折射率分布可表述为 $n^2(x, y) = n_{\text{core}}^2(x, y) + n_{\text{clad}}^2(x, y)$ 。

2 静压力对 PCF 的影响

实芯 PCF 的横截面结构如图 1 所示。假设: (1) PCF 纤芯是实芯, 包层的空气孔为严格的圆柱形, 且空气填充率很小; (2) 石英的弹性模量和泊松系数不随空

基金项目: 重庆市教委基金资助项目 (KJ071116)

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研究。

E-mail: yuxian896@sohu.com

收稿日期: 2006-12-28; 收到修改稿日期: 2007-03-26

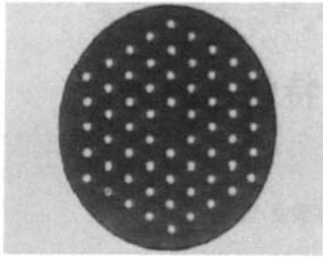


Fig 1 The photonic crystal fiber cross-section scheme

间位置坐标和方向变化;(3)在静应力作用下 PCF 的应变很小,介质因应变而产生的位移量也非常小,应力和应变之间服从胡克定律;(4)初始时 PCF 处于一种无应力的自然状态,PCF 的应力仅是由外部静压力造成。

2.1 PCF 纤芯应力与应变关系

PCF 在外部静压力作用下,PCF 内各点产生面应力,在面应力作用下各点发生应变,忽略剪应力和角应变,在直角坐标系中,正应力可表示为 $[\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3]$,其中, σ_1, σ_2 表示横向应力, σ_3 表示径向应力,正应变可表示为 $[\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3]$,其中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 表示横向应变, ε_3 表示径向应变,根据假设, σ_1, σ_2 和 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 应分别相等,且 PCF 中某点的应力与产生的应变满足关系式

$$\sigma^T = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \varepsilon^T$$

其中, C_i 是 PCF 的弹性系数

根据弹性力学理论可以证明 $C_{11} = C_{22} = C_{33}, C_{12} = C_{13} = C_{21} = C_{23} = C_{31} = C_{32}$,则在外界静压力作用下 PCF 中产生的应变与静压力在 PCF 中形成的应力之间关系为:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{C_{11}\sigma_1 - C_{12}\sigma_3}{C_{11}^2 + C_{11}C_{12} - 2C_{12}^2} \\ \varepsilon_3 = \frac{(C_{11} + C_{12})\sigma_3 - 2C_{12}\sigma_1}{C_{11}^2 + C_{11}C_{12} - 2C_{12}^2} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 PCF 包层应力与应变关系

PCF 包层由石英和周期排列的空气孔组成,根据假设相邻孔间影响可以忽略,只分析一个孔情形。当外界压力作用于 PCF 包层上时,可把静压力分解成两个互相垂直方向分别对空气孔作用,示意图如图 2 所示。

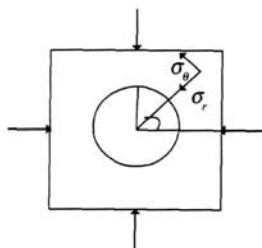


Fig 2 The unit air hole of PCF cladding

示。根据假设 (1)和假设 (4),作用在 PCF 上的压力在空气孔周边会产生应力,应力的分布对称于通过坐标

原点并垂直于 $x-O-y$ 平面的 z 轴,应力与极角 θ 无关,仅是距离 r 的函数,且只有正应力,这个应力使空气孔及周边石英介质发生应变,在极坐标情况下某点的应力描述为:

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{s}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{s}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta + \\ \quad -\frac{t}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{t}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta = -\frac{s}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{s}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + \\ \quad + \frac{t}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{t}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中, s, t 分别表示 PCF 横截面内两个垂直方向上的静压力, a 是空气孔的半径, r 是空气孔周边一点距孔中心的距离,如果 PCF 受力均匀,则上式可简化为:

$$\begin{cases} \sigma_r = s \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta = s \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

取对 PCF 的作用力为单位作用力,空气孔周边距离孔中心为 r 处的应力与应变关系曲线如图 3 所示。

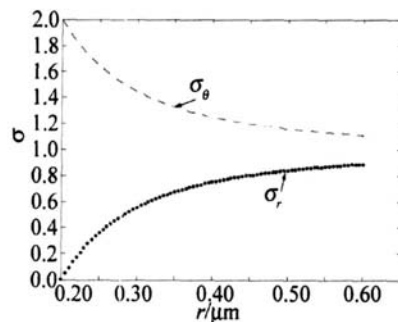


Fig 3 The relation between the stress and the distance to the hole center in the photonic crystal fiber ($d=0.4\mu\text{m}$)

2.3 静压力对 PCF 横向折射率分布的影响

PCF 横向折射率分布 n 可以看成两部分叠加,纤芯折射率可用 Selmeier 公式描述,包层的有效折射率可用周期函数 $n_{\text{clad}}(x, y) = \sum_{m,n}^{p-1} P_{m,n} \cos(2m\pi x/l) \times \cos(2n\pi y/l)$ 描述,其中, l 是晶体结构横截面的周期长度, $P_{m,n}$ 是展开项系数, m, n 展开项数。

先讨论 PCF 纤芯折射率的变化情况,根据 2.1 节和 2.2 节中的讨论,在外界静压力作用下,PCF 纤芯横向和径向都要产生应变,这种应变使 PCF 的折射率分布出现波动,根据弹光学理论,PCF 的折射率性质变化量 ΔT 与 PCF 中产生的应变关系为 $\Delta T = \|p\| \varepsilon$,其中, ΔT 表征 PCF 折射率性质的变化, ε 表示 PCF 的应变,二阶张量 $\|p\|$ 表示 PCF 弹光系数,根据前面假设 (2)和假设 (3),弹光系数 $p_{i,j}$ 中只有两个系数是独立

的, $p_{33} = p_{22} = p_{11}, p_{12} = p_{13} = p_{21} = p_{23} = p_{31} = p_{32}, p_{44} = p_{55} = p_{66} = (p_{11} - p_{12}) / 2$, 其它系数为 0, PCF 折射率波动量 Δn 与 ΔT 的关系为 $\Delta n_i = -\frac{1}{2} n_i^3 \Delta T_i$, 则 PCF 横向和径向折射率的波动量与应变的关系式:

$$\begin{cases} \Delta n_1 = -\frac{1}{2} n_1^3 (p_{11} \varepsilon_1 + p_{12} \varepsilon_2 + p_{13} \varepsilon_3) \\ \Delta n_2 = -\frac{1}{2} n_2^3 (p_{21} \varepsilon_1 + p_{22} \varepsilon_2 + p_{23} \varepsilon_3) \\ \Delta n_3 = -\frac{1}{2} n_3^3 (p_{31} \varepsilon_1 + p_{32} \varepsilon_2 + p_{33} \varepsilon_3) \end{cases} \quad (4)$$

$\Delta n_1, \Delta n_2$ 为横向折射率分布, Δn_3 为径向折射率分布, n_1, n_2 为石英横向折射率, n_3 为石英径向折射率, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 是 PCF 的横向应变且 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 是纵向应变, 对 (4) 式简化得:

$$\begin{cases} \Delta n_1 = \Delta n_2 = -\frac{1}{2} n_1^3 [(p_{11} + p_{12}) \varepsilon_1 + p_{12} \varepsilon_3] \\ \Delta n_3 = -\frac{1}{2} n_3^3 (2p_{12} \varepsilon_1 + p_{11} \varepsilon_3) \end{cases} \quad (5)$$

取纤芯石英材料参数 $p_{11} = 0.12, p_{12} = 0.27, n_{\text{core}} = 1.465$, 纤芯折射率的波动量与应变关系曲线如图 4 所

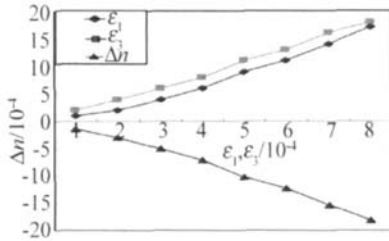


Fig 4 The relation between the core refractive index fluctuation and the strain

示。在 PCF 包层中的折射率分布可以展开为周期函数 $n_{\text{clad}}(x, y) = \sum_{m,n}^{p-1} P_{m,n} \cos(2m\pi x/l) \cos(2n\pi y/l)$, 因 PCF 横截面内各向一致性, 在静压力作用下其折射率的波动量与包层的横向应变关系可以表示为 $\Delta n_{\text{clad}} = -\sum_{m,n}^{p-1} P_{m,n} 4a\pi \sin(2m\pi x/l) \cos(2n\pi y/l) \varepsilon_1$, 化简后可得:

$$\Delta n_{\text{clad}} = -4a\pi \left[\sum_{m,n}^{p-1} P_{m,n} \cos(2n\pi y/l) - n_{\text{clad}}^2 \right]^{1/2} \varepsilon_1 \quad (6)$$

式中, a 为光纤纤芯半径, $\varepsilon_1 = \Delta x/l$ 表示 PCF 包层横向应变, 它与包层中受到的应力满足胡克定律, 从 (6) 式可知, 包层折射率的波动量与包层产生的应变及包层折射率展开项数有关。

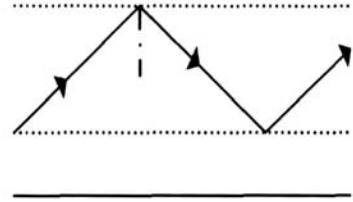
3 静压力对 PCF 中传播光脉冲的影响

根据第 2 节中的讨论, 在外界压力作用下, PCF 结

构和横向折射率分布都要发生变化, 这个变化会影响 PCF 中传播光脉冲的相位和模式结构。

3.1 PCF 中传播光脉冲相位变化

在实芯 PCF 中, 光脉冲被限制在纤芯内传播, 简化光脉冲在 PCF 中传播模型如图 5 所示。当光脉冲



在 PCF 中传播距离 L 后相位延迟量为 $\phi = 2\pi nl/\lambda$, 其中 λ 是光波在光纤中的传播波长, n 纤芯折射率分布, l 是光波在光纤中传播一个周期所经过的光路长度, $l \sin\theta = L$, 相位延迟量可表示为:

$$\phi = 2\pi nL/\lambda_g \quad (7)$$

式中, $\lambda_g = \lambda \sin\theta$ 称为光纤的波导波长, $\sin\theta = [1 - (2a/L)^2]^{1/2}$, PCF 在应力作用下, 光纤长度、光纤横截面结构及折射率分布将出现波动, 并引起相位延迟的波动, 相位延迟波动量由 3 部分组成, 表示为:

$$\Delta\phi = \frac{\partial\phi}{\partial l} \Delta L + \frac{\partial\phi}{\partial n} \Delta n + \frac{\partial\phi}{\partial a} \Delta a \quad (8)$$

式中, a 是光纤纤芯半径, 如果 PCF 中传播的脉冲是单模光脉冲, 把 (7) 式分别对 PCF 长度、折射率和横截面半径微分并代入 (8) 式得:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi nL}{\lambda_g} \varepsilon_3 + \frac{2\pi L}{\lambda_g} \Delta n + \frac{2\pi L}{\lambda} \left[\frac{\lambda}{2a} \right]^2 \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^{1/2}} \varepsilon_1 \quad (9)$$

式中, $\varepsilon_3 = \Delta L/L, \varepsilon_1 = \Delta a/a$ 。第 1 项表示在压力作用下, PCF 应变效应引起的相位波动, 第 2 项表示在压力作用下光隙效应引起 PCF 折射率分布发生变化而造成的相位波动, 第 3 项表示在压力作用下 PCF 泊松效应引起的相位波动。

把 (5) 式代入 (9) 式并忽略横向应变, 则纵向应变引起的相位波动量是:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi nL}{\lambda} \varepsilon_3 + \frac{2\pi L}{\lambda} \Delta n = \frac{\pi nL}{\lambda} (2 - n^2 p_{12}) \varepsilon_3 \quad (10)$$

如不考虑横向应变, 则径向应变泊松效应引起的相位波动量是:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi nL}{\lambda} \left\{ \frac{a}{nk_0} \left[\frac{\lambda}{2a} \right]^2 \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^{1/2}} - \frac{1}{2} n^2 (p_{11} + p_{12}) \right\} \varepsilon_1 \quad (11)$$

如果 PCF 横向和径向应变都存在, 则相位波动量是

(10)式和(11)式之和, PCF长度取单位长度,包层空气孔 $a=0.2\mu\text{m}$,入射光脉冲波长取 $1.55\mu\text{m}$,则相位波动量与应变关系曲线如图6所示。

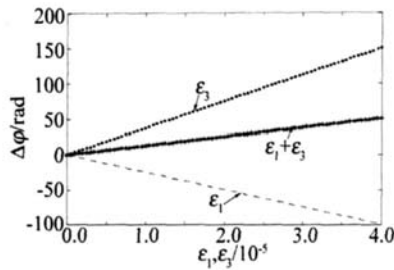


Fig 6 The relation between the phase fluctuation and in the strain in unit length

在采用干涉测量法测量相位波动时,每移动1条条纹相位变化是 2π ,因此,可通过条纹相机观测干涉条纹移动的条数从而测量相位波动值,并据此计算出PCF的应变和所受到的压力,从图6可知PCF相位波动量对应变也即外界压力作用的敏感性是比较强的,因此PCF可代替传统的单模光纤用于光纤压力传感器中。

3.2 压力对PCF中光脉冲模式双折射影响

PCF形状的微小偏离、材料的各向异性及微小起伏,都会破坏PCF中的模式简并,导致两个偏振态的混合,即模式常数 β 对于 x, y 两个方向的偏振模存在差别。PCF中衡量模式双折射的程度包含两方面,相双折射和群双折射。相双折射指基模两个偏振成分相指数的差,表示为 $B = n_x - n_y$, n_x, n_y 是两个正交偏振态的有效折射率,它表示两种偏振模式在PCF内传输时功率周期性交换,相双折射波动量定义为:

$$\Delta B(\lambda) = \frac{\lambda}{2\pi} (\beta_x - \beta_y) \quad (12)$$

β_x, β_y 表示两个偏振模的模式常数。当入射脉冲在PCF中激发起两种偏振成分,由于群速度色散,这两种成分以不同的速率在PCF中传输,由于PCF相双折射的变化是随机的,因此群速度也随机变化,即PCF群双折射效应,PCF群双折射是指各偏振模群指数的差,可表示为 $G = n_x - n_y = B - \lambda \frac{dB}{d\lambda}$,群双折射波动量定义为:

$$\Delta G(\lambda) = \Delta B(\lambda) - \lambda \frac{d\Delta B(\lambda)}{d\lambda} \quad (13)$$

PCF在压力作用下结构和横向折射率分布发生变化,在PCF中产生双折射效应,从(12)式和(13)式可知,PCF中产生的双折射效应通常强烈地依赖波长,PCF中双折射效应对波长的依赖性如图7所示。

在外界压力作用下,在PCF中引起的传播光脉冲两个正交模的相位漂移变化量是 $\Delta\phi(p) = \phi_x - \phi_y$,为了测量和计算PCF的双折射效应对压力的敏感度,可以采用相干干涉技术方法来确定相位漂移量,通过对

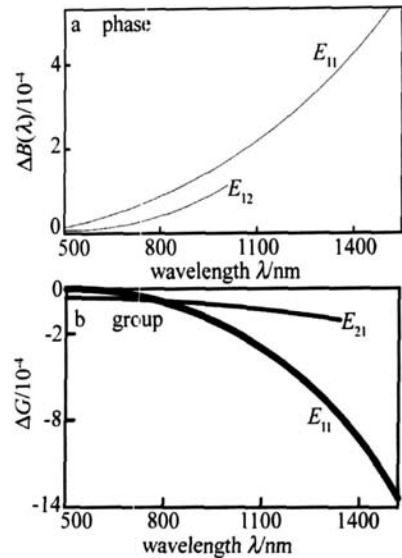


Fig 7 The relation between the mode birefringence and the wavelength
干涉点移动的干涉条纹条数计数就可以确定 $\Delta\phi(p)$, 每移动1条条纹相位变化 $\pm 2\pi$, 则 $(d\phi/d\lambda)\Delta\lambda = \pm 2\pi$, $-\frac{2\pi L}{\lambda^2} \Delta B - \lambda \frac{d\Delta B}{d\lambda} \Delta\lambda = \pm 2\pi$, 则外界压力变化 Δp 与干涉条纹移动数目 ΔM 关系为:

$$\frac{d\Delta B}{dp} = \frac{\lambda}{L} \frac{\Delta M}{\Delta p} \quad (14)$$

从(14)式可知PCF相双折射对压力的敏感性是光脉冲波长的函数,它们之间关系曲线如图8a所示。因

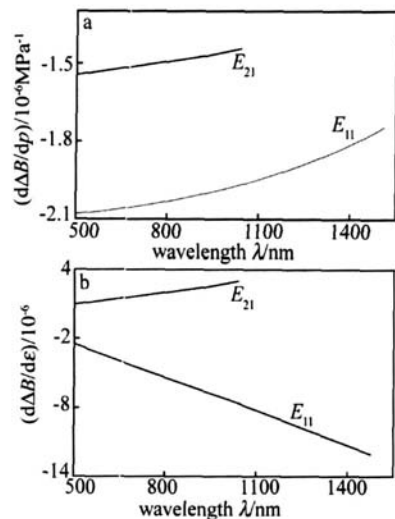


Fig 8 a—the sensitive curve between between the phase mode birefringence and the press b—the sensitive curve between between the phase mode birefringence and the strain

PCF中应力与应变之间满足广义胡克定律,故PCF相模式双折射对应变的敏感性与干涉条纹移动数目关系为:

$$\frac{d\Delta B}{\varepsilon} = \frac{\lambda}{L} \frac{\Delta M}{\varepsilon} - \Delta B \quad (15)$$

(下转第193页)

控制。在进行激光熔凝参数选择时,可以通过动态检测装置记录及分析的图像数据,给出其熔化时间、尺寸及温度等信息,选择出最佳工艺参数。

3 结 论

建立了激光熔池动态检测系统,实时拍摄了激光熔凝熔池冷却时各个不同时刻状态下的热辐射图像,并给出其温度场分布。实验结果表明,激光熔凝熔池图像可以被实时检测记录及分析,其温度场分布、尺寸及非稳态变化过程信息为激光熔凝的工艺参数选择及基础理论分析提供了实验依据。进一步发展,可用于激光加工在线监测及自动闭环反馈控制。

参 考 文 献

- [1] GUAN Zh Zh Laser process technology manual [M]. Beijing: Chinese Measurement Press, 1998: 133 (in Chinese).
- [2] HUANG K J, XIE Ch Sh, XU D Sh State of the arts of CO₂ laser remelting and CO₂ laser phase transformation [J]. Laser Journal, 2002, 23(5): 9-13 (in Chinese).
- [3] HUANG K J, XIE Ch Sh, XU D Sh State of the arts of pulsed laser remelting and pulsed laser phase transformation [J]. Laser Technology, 2003, 27(2): 130-133 (in Chinese).
- [4] LIU Zh X, HUANG W D. Modeling and simulating on laser remelting considering diffusion/convection and phase change process in the substrate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(4): 491-494 (in Chinese).
- [5] YAO G F, CHEN G N. Numerical simulation of transient thermal field in laser melting process [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(8): 863-868 (in Chinese).

- [6] ZHAO Y Zh, LIU J P, SHI Y W. Study on the property of laser remelting high-carbon-high-alloy steel [J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 205-207 (in Chinese).
- [7] WANG D Ch Controlling laser surface strengthening process based on artificial neural network [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 317-320 (in Chinese).
- [8] GRUM J, STURM R. Calculation of temperature cycles, heating and quenching rates during laser melt hardening of cast iron [C] // Proceedings of the 1996 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe Hamburg: CLEO, 1996: 195.
- [9] COLACO R, V LAR R. Effect of laser surface melting on the tempering behaviour of D N X42Cr13 stainless tool steel [J]. Scripta Materialia, 1997, 38(1): 107-113.
- [10] KOMANDUR I R, HOU Z B. Thermal analysis of laser surface transformation hardening-optimization of process parameters [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(9): 991-1008.
- [11] CHANG K A, CHEN Y Ch Laser surface hardening of H13 steel in the melt case [J]. Materials Letters, 2005, 59(14/15): 1919-1923.
- [12] ZHONG M L, YANG L, LIU J H, et al Laser direct manufacturing W/Ti telescope collimator component [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(4): 482-486 (in Chinese).
- [13] LI Y M, LIU Zh X, YANG H O, et al Measurement and simulation of temperature field during multi-layer laser cladding [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(5): 521-525 (in Chinese).
- [14] MÜLLER BORHAN AN J, DENNGER C, DAUSNGER C, et al Camera based monitoring during laser beam welding influences of the detection wave length [C] // Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing Munich: German Scientific Laser Society, 2005: 137-141.
- [15] PAN J L. Control of modern arc welding [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 2000: 308 (in Chinese).

(上接第 190 页)

式中, ϵ 是 PCF 中静压力变化 Δp 时在 PCF 中某点引起的应变, PCF 相模式双折射对应变的敏感性与波长之间函数曲线如图 8b 所示。群模式双折射对应力应变的敏感性可通过 (12) 式、(14) 式和 (15) 式求出。

4 结 论

作者分析了在外部压力作用下, PCF 的纤芯和包层产生的应变及与应力的对应关系, 计算了外界静压力作用对 PCF 折射率分布造成的波动值, 因为 PCF 结构发生的应变和折射率分布的波动使得 PCF 中传播的光脉冲的相位和模式双折射改变, 相位波动量和双折射对应力的敏感性可采用相干干涉测量技术进行分析和计算, 结果表明, PCF 传播光脉冲的相位和双折射对压力具有较强的敏感性和依赖性, 因此能广泛用于光纤压力传感器中。

参 考 文 献

- [1] PEYR LLOUX A, CHARTIER T, H DEUR A, et al Theoretical and experimental study of the birefringence of a photonic crystal fiber [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(2): 536-539.
- [2] JU J, JIN W, DEMOKAN M S Properties of a highly birefringent photonic crystal fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(10): 1375-1377.

- [3] SA PPOH K, KOSH BA M. Numerical modeling of photonic crystal fibers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(11): 3580-3590.
- [4] HOO Y L, JIN W, JU J, et al Design of photonic crystal fibers with ultra-low, ultra-flattened chromatic dispersion [J]. Opt Commun, 2004, 242: 327-332.
- [5] CHENG Ch F, WANG X F, FANG Z B, et al Enhanced dispersive wave generation by using chirped pulses in a microstructured fiber [J]. Opt Commun, 2005, 244: 219-225.
- [6] PAN Y Zh, ZHANG J, HU G J, et al Photonic crystal fiber and laser [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 48-51 (in Chinese).
- [7] PALAVIC N I C, JAOUEN Y, DEBARGE G Phase-sensitive optical low-coherence reflectometry technique applied to the characterization of photonic crystal fiber properties [J]. Opt Lett, 2005, 30(4): 361-363.
- [8] VINCEN T D, PETER J R, JESPER G Programmable complex field coupling to high-order guided modes of micro-structured fibers [J]. Opt Commun, 2004, 232: 229-237.
- [9] FLOROUS N J, VARSHENEY A K, SA PPOH K Thermo-optical sensitivity analysis of highly birefringent polarimetric sensing photonic crystal fibers with elliptically elongated veins [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(15): 1663-1665.
- [10] ZSIGRIB, PEUCHERET C, NIELSEN M D, et al Demonstration of broadcast, transmission, and wavelength conversion functionalities using photonic crystal fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(21): 2290-2292.
- [11] HUANG J J, LI G, CHEN M, et al Simulation dispersion properties of photonic crystal fiber [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 432-435 (in Chinese).