

doi: 10. 3788/gzxb20124103. 0316

应用于液压传感的光子晶体光纤特性

何忠蛟

(浙江工商大学 信息与电子工程学院, 杭州 310035)

摘 要:为实现结构紧凑、高灵敏度的光纤压力(液压)传感器,提出了一种应用于液压传感的边孔结构光子晶体光纤.基于全矢量有限元方法,研究了传统光子晶体光纤和边孔结构光子晶体光纤的有效折射、模式等特性以及在液压情况下的应力和应力特性.根据光弹效应给出了传统光子晶体光纤和边孔结构光子晶体光纤在液压情况下的折射率变化特性.模拟结果表明边孔结构光子晶体光纤可以获得更大的液压传感灵敏度,增大边孔半径可以提高液压传感灵敏度,因此结构优化的边孔结构光子晶体光纤可以实现高灵敏度的光纤压力(液压)压力传感器.

关键词:光子晶体光纤;有限元方法;液压传感;边孔结构

中图分类号:TN25

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)03-0316-4

0 引言

光子晶体光纤的出现引起了人们极大的研究热情^[1-7].光子晶体光纤在双折射、色散、单模单偏振等光学特性方面展示了良好性能,并在光纤传感、光纤通信、光纤激光器、非线性光学等方面获得了重要应用^[8-9].目前,已经有不少的光子晶体光纤被应用于光纤传感^[10-12].其中也包括光子晶体光纤在液压传感方面的应用.采用光纤作为液压传感已有多年的历史^[13-20].早在 1989 年,人们研究了基于高双折射光纤的液压传感器^[13].在 1991 年,人们研究了边孔结构的光纤作为液压传感器的特性^[16].近年来,已经有不少文献报道利用光子晶体光纤来实现液压传感^[18-20].光子晶体光纤的出现使得基于光纤的液压传感性能有了很大的提高,成为当前光纤(液压)压力传感研究的热点之一.

本文从研究传统光子晶体光纤的液压传感特性入手,提出一种应用于液压传感的边孔结构光子晶体光纤,利用在光纤中的两个边孔获得光纤液压传感的高灵敏度特性.采用全矢量有限元方法研究了传统光子晶体光纤和边孔结构光子晶体光纤的模式特性以及液压情况下的应力特性.本文提出的边孔结构光子晶体光纤设计对于光子晶体光纤在液压传感方面的应用具有重要意义.

1 光子晶体光纤结构及工作原理

图 1 给出了一种传统光子晶体光纤(图 1(a))

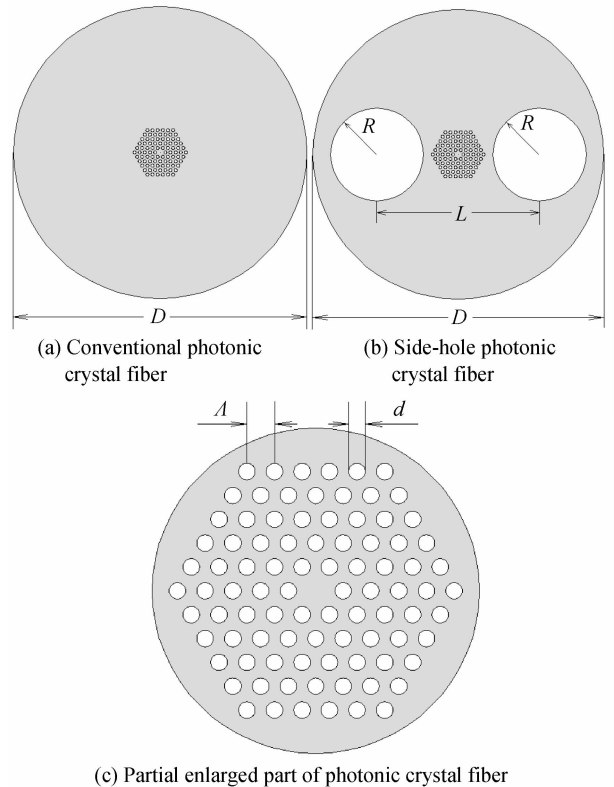


图 1 光子晶体光纤横截面结构

Fig. 1 Cross sections of photonic crystal fiber

和一种边孔结构光子晶体光纤(图 1(b))的横截面结构.两种光子晶体光纤的外径为 D , 其典型值为 $D=125 \mu\text{m}$, 和普通单模光纤的外径一样.两种光子晶体光纤纤芯附近的结构如图 1(c), 5 层三角晶格结构的空气孔组成光子晶体光纤低折射率的包层, 中间一个缺陷孔作为光纤高折射率的纤芯.光子晶

体光纤中空气孔的间距为 Δ , 即晶格周期, 空气孔直径为 d . 边孔结构光子晶体光纤的边孔是两个大空气孔, 其半径为 R , 两个空气孔排列在水平方向, 其间距为 L . 计算结构参量为: $\Delta = 2.2 \mu\text{m}$, $d = 1.32 \mu\text{m}$, $R = 20 \mu\text{m}$, $L = 70 \mu\text{m}$. 本文采用有限元方法来计算光子晶体光纤的光学特性和液压情况下的应力特性. 采用该方法计算了引文[18, 20]相关结果, 验证了该方法的正确性. 为简单起见, 计算中, 二氧化硅和空气的折射率分别为 1.444 和 1, 二氧化硅的杨氏模量为 $E_{\text{SiO}_2} = 73.1 \text{ GPa}$, 其泊松比为 $\nu_{\text{SiO}_2} = 0.17$.

两种光子晶体光纤的导光原理可以理解为全反射. 具有 5 层空气孔结构的包层, 因为空气孔的存在而具有低于 1.444 的有效折射率, 这样在光纤传输的光因为全反射而被约束在光纤纤芯. 边孔结构光子晶体光纤的两个大空气孔对光纤导光特性没有任何影响. 在光纤处于液压的情况下, 根据光弹效应, 在应力情况下的折射率可以表示为^[15]

$$\begin{aligned} n_x &= n_0 - C_1 \sigma_x - C_2 (\sigma_y + \sigma_z) \\ n_y &= n_0 - C_1 \sigma_y - C_2 (\sigma_x + \sigma_z) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为应力分量, $C_1 = 6.5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$ 和 $C_2 = 4.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ 为二氧化硅的弹光系数. 应力引起的折射率变化可以表示为^[15]

$$\begin{aligned} \delta n_x &= n_x - n_0 = -C_1 \sigma_x - C_2 (\sigma_y + \sigma_z) \\ \delta n_y &= n_y - n_0 = -C_1 \sigma_y - C_2 (\sigma_x + \sigma_z) \end{aligned} \quad (2)$$

2 光子晶体光纤性能分析

有效折射率和约束损耗是光子晶体光纤的重要

光学性能表征. 光子晶体光纤的有效折射率和约束损耗的计算结果见图 2. 在 1 500~1 600 nm 的光纤

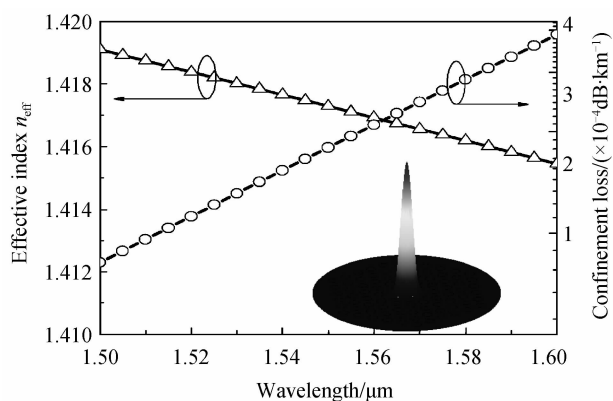


图 2 光子晶体光纤的有效折射率和约束损耗图. 插图给出了波长为 1 550 nm 时的电场模式分布

Fig. 2 Effective index and confinement loss of the photonic crystal fiber. Inset shows the mode profile of the photonic crystal fiber at the wavelength of 1 550 nm

通信波段, 两种光子晶体光纤的有效折射率从 1.419 降到 1.415 左右. 长波长方向的有效折射率较低是因为光能量在长波长的时候有更大的比例在光纤包层中. 此外光子晶体光纤的约束损耗是 10^{-4} dB/km , 远小于二氧化硅的本征损耗. 图 2 给出了波长为 1 550 nm 时的电场模式分布. 计算结果表明, 本文研究的传统光子晶体光纤和边孔结构光子晶体光纤具备在 1 550 nm 波段传感应用的基本光学条件.

采用有限元方法可进一步研究在 1 mPa 液压下光子晶体光纤的相关特性. 图 3 给出了两种光子

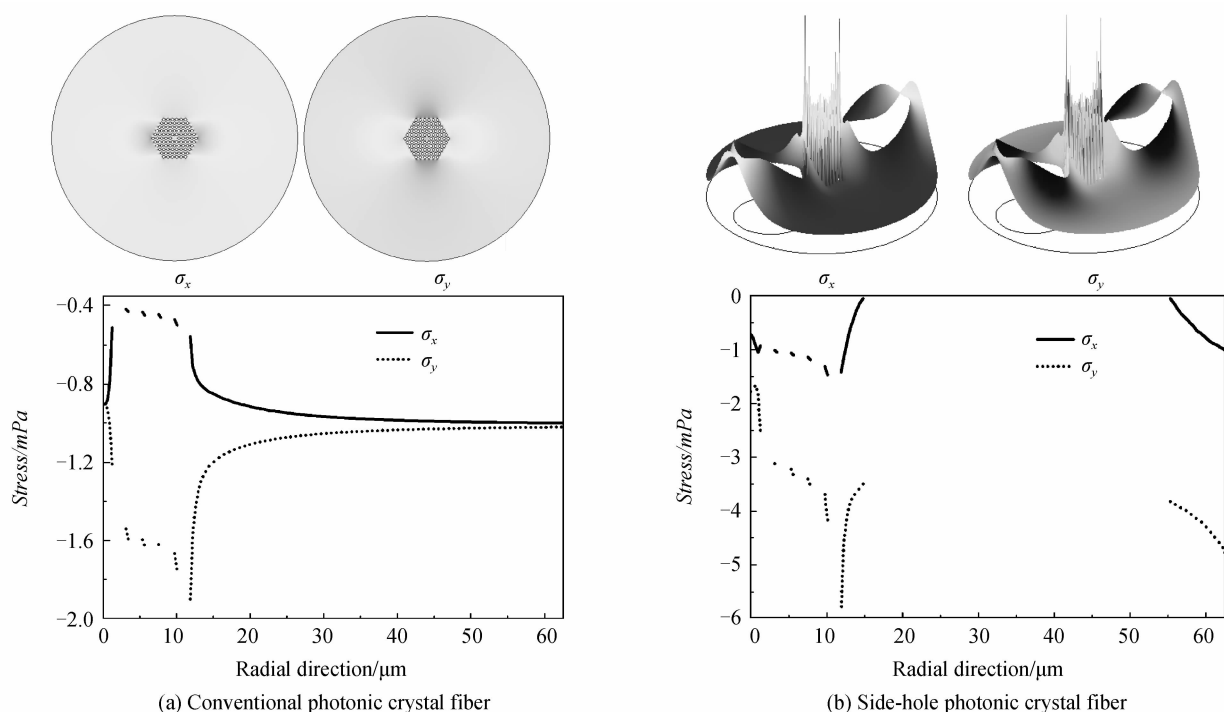


图 3 光子晶体光纤在 1 mPa 液压情况下的应力分布

Fig. 3 Stress distribution of the photonic crystal fiber under the hydraulic pressure of 1 mPa

晶体光纤在 1 mPa 液压情况下的应力分布. 图 3(a) 给出了应力 σ_x 、 σ_y 在传统光子晶体光纤横截面上的平面分布及从光纤纤芯沿水平半径方向的分布. 图 3(b) 给出了应力 σ_x 、 σ_y 在边孔结构光子晶体光纤横截面上的平面分布及从光纤纤芯沿水平半径方向的分布.

由于应力引起的折射率变化会影响到光子晶体光纤的光学特性, 其中最为重要的是光纤纤芯部分的应力情况. 对于传统光子晶体光纤, 在 1 mPa 液压情况下, 其纤芯应力 σ_x 、 σ_y 的绝对值均为 0.9 mPa 左右, 两个分量没有明显差别. 而对于边孔结构光子晶体光纤, 其纤芯应力 σ_x 、 σ_y 的绝对值分别为 0.8 mPa 和 1.7 mPa, 两个分量具有明显的差别. 根据式(1), 光纤纤芯折射率变化取决于纤芯应力的绝对值, 显然在同一液压情况下, 边孔结构光子晶体光纤将具有更大的折射率变化值.

根据式(2), 本文计算了两种光子晶体光纤纤芯的折射率变化值. 图 4 给出了传统光子晶体光纤对于不同 d/D 参量情况下的纤芯折射率变化情况. 首先, 可以发现传统光子晶体光纤在有液压情况下, 引入的纤芯折射率变化在 x 、 y 方向具有一致性. 其次, 在空气孔直径 d 变大的时候, 液压引入的折射率变化变小. 这说明空气孔的存在不利于液压传导到光纤纤芯. 当 $d/D=0.6$ 的时候, 纤芯折射率变化为 4.4×10^{-6} .

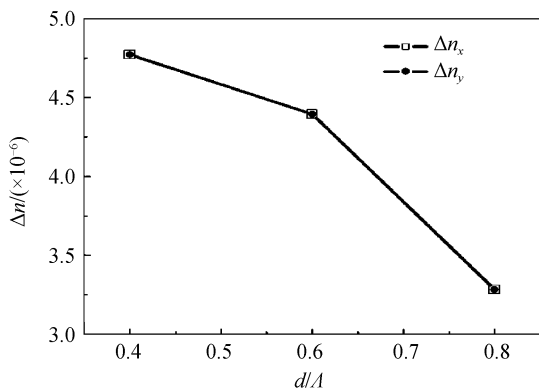


图 4 1 mPa 液压引起传统光子晶体光纤的折射率变化

Fig. 4 1 mPa hydraulic pressure induced refractive index changes of conventional photonic crystal fiber

图 5 给出了不同边孔半径情况下 1 mPa 液压引起边孔结构光子晶体光纤的折射率变化. 首先, 在液压情况下边孔结构光子晶体光纤在 x 、 y 方向纤芯折射率变化具有不同的数值, 其中 y 方向纤芯折射率较大, 这和上面分析的 y 方向应力较大相符合. 其次, 随边孔直径增大, 纤芯折射率的变化较大. 当 $R=20 \mu\text{m}$ 的时候, 边孔结构光子晶体光纤在 1 mPa 液压情况下的纤芯折射率变化分别为 7.7×10^{-6} 和 4.5×10^{-6} , 比传统光子晶体光纤的变化要大的多.

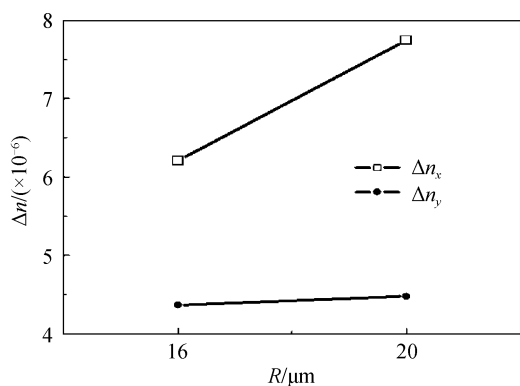


图 5 不同边孔半径情况下 1 mPa 液压引起边孔结构光子晶体光纤的折射率变化

Fig. 5 1 mPa hydraulic pressure induced refractive index changes for side-hole photonic crystal fiber of side-hole photonic crystal fiber with different side-hole radius

3 结论

本文研究了两种光子晶体光纤在液压传感方面的特性. 采用全矢量有限元方法分别计算了传统光子晶体光纤和边孔结构光子晶体光纤的有效折射率、约束损耗、电场模式分布等特性. 研究表明边孔结构光子晶体光纤的两个大空气孔对光纤光学特性没有影响. 传统光子晶体光纤和边孔结构光子晶体光纤在液压情况下的应力分布特性以及液压引入时纤芯折射率变化特性表明, 传统光子晶体光纤表现出在 x 、 y 两个方向的一致响应特性; 而边孔结构光子晶体光纤表现出在 x 、 y 两个方向的差异响应特性. 模拟结果表明边孔结构光子晶体光纤可以获得更大的液压传感灵敏度, 增大边孔半径可以提高液压传感灵敏度.

参考文献

- [1] LI Chun-lei, SHENG Qiu-qing. The relation between the nonlinear coefficient of PCF and its geometry parameters and the optical wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 734-737.
李春雷, 盛秋琴. 光子晶体光纤非线性系数与其结构参量及波长的关系[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 734-737.
- [2] WU Wei-qing, CHEN Xiong-wen, ZHOU Hui, et al. Investigation of the ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers with hybrid cores[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 109-113.
吴维庆, 陈雄文, 周辉, 等. 混合纤芯光子晶体光纤超平坦色散的研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 109-113.
- [3] YU Yong-qing, RUAN Shuan-chen, ZENG Jian-chun, et al. Supercontinuum generation in photonic crystal fibers depends on pump wavelengths[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1293-1296.
于永芹, 阮双琛, 曾剑春, 等. 泵浦波长对光子晶体光纤产生超连续谱的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1293-1296.
- [4] YANG Guang-qiang, ZHANG Xia, LIN Jian-fei, et al. The measurement of polarization mode dispersion in highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1133-1136.
杨广强, 张霞, 林健飞, 等. 高双折射光子晶体光纤偏振模色散

- 测量[J]. 光子学报, 2005, **34**(8): 1133-1136.
- [5] RUAN Shuang-chen, YANG Bing, ZHU Chun-yan, *et al.* Yb³⁺-doped double cladding photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 15-16.
- 阮双琛, 杨冰, 朱春艳, 等. 2.2W 掺 Yb³⁺ 双包层光子晶体光纤激光器[J]. 光子学报, 2004, **33**(1): 15-16.
- [6] KUBOTA H, KAWANISHI S, KOYANAGI S, *et al.* Absolutely single polarization photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, **16**(1): 182-184.
- [7] JU J, JIN W, DEMOKAN M S. Design of single-polarization single mode photonics crystal fibers at 1.30 and 1.55 μm [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, **24**(2): 825-830.
- [8] SANG X Z, CHU P L, YU C X. Applications of nonlinear effects in highly nonlinear photonic crystal fiber to optical communications[J]. *Opt Quantum Electron*, 2005, **37**(4): 965-994.
- [9] CHEN D R, QIN S, SHEN L F. An all-fiber multi-wavelength Raman Laser based on a PCF Sagnac loop filter [J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2006, **48**(12): 2416-2418.
- [10] KIM D H, KANG J U. Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(19): 4490-4495.
- [11] DOBB H, KALLI K, WEBB D J. Temperature-insensitive long period grating sensors in photonic crystal fibre [J]. *Electron Lett*, 2004, **40**(11): 657-658.
- [12] DOMG X, TAM H Y. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based on Sagnac interferometer[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**(1): 151-153.
- [13] BOCK W J, DOMANSKI A W. High hydrostatic pressure effects in highly birefringent optical fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 1989, **8**(7): 1279-1283.
- [14] CHIANG K S. Pressure-induced birefringence in a coated highly birefringent optical fiber[J]. *J Lightwave Technol*, 1990, **8**(12): 1850-1855.
- [15] WOLINSKI T R, BOCK W J. Birefringence measurement under hydrostatic pressure in twisted highly birefringent fibers[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1995, **44**(3): 708-711.
- [16] CHARASSE M N, TURPIN M, PESANT J P L. Dynamic pressure sensing with a side-hole birefringent optical fiber [J]. *Opt Lett*, 1991, **16**(13): 1043-1045.
- [17] ZHAO Y, ANSARI F. Intrinsic single-mode fiber-optic pressure sensor[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, **13**(11): 1212-1214.
- [18] FU H Y, TAM H Y, SHAO L Y, *et al.* Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(15): 2835-2839.
- [19] MACPHERSON W N, RIGG E J, JONES J D C, *et al.* Finite-element analysis and experimental results for a microstructured fiber with enhance hydrostatic pressure sensitivity[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, **23**(3): 1227-1231.
- [20] WU C, GUAN B O, WANG Z, *et al.* Characterization of pressure response of Bragg gratings in grapefruit microstructured fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 2010, **28**(9): 1392-1397.

Characteristics of Photonic Crystal Fiber for Hydraulic Pressure Sensing

HE Zhong-jiao

(College of Information & Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035, China)

Abstract: A side-hole photonic crystal fiber for (hydrostatic) pressure sensing was proposed to achieve compact and high sensitivity fiber based pressure sensor. The effective index, mode profile and the stress property of a conventional photonic crystal fiber and the side-hole photonic crystal fiber were investigated based on a full-vector finite-element method. Due to the photoelastic effect, the hydrostatic pressure induced index changes of the conventional photonic crystal fiber and the side-hole photonic crystal fiber were presented. Simulation results show that the side-hole photonic crystal fiber can achieve higher pressure sensitivity, and the pressure sensitivity increases together with the radius of big air holes of the side-hole photonic crystal fiber. Thus, the structure-optimized side-hole photonic crystal fiber can be used as a high sensitivity (hydrostatic) pressure sensor.

Key words: Photonic crystal fiber; Finite-element method; Hydrostatic pressure sensing; Side-hole