

文章编号: 0253-2239(2006)02-0171-5

## 侧向压力对微结构光纤双折射的影响\*

张春书 开桂云 王 志 孙婷婷 王 超 刘艳格 刘剑飞 袁树忠 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要:** 采用全矢量有限元方法,理论上分析侧向压力对高双折射微结构光纤双折射特性的影响,与其他报道中采用流体静压力来研究微结构光纤的双折射变化有所不同。研究表明,在波长 600~1700 nm 范围内,沿微结构光纤慢轴和快轴的侧向压力所引起的光纤相双折射和模双折射的变化并不一致。此外,沿微结构光纤的慢轴和快轴的侧向压力对微结构光纤的相双折射压力灵敏度和模双折射压力灵敏度的影响也不同。该研究结果对于微结构光纤的设计、微结构光纤传感器尤其是多维光纤传感器具有很大的指导意义。

**关键词:** 光纤光学; 相双折射; 模双折射; 压力灵敏度; 全矢量有限元法

中图分类号: TN292.11 文献标识码: A

## Influence of Lateral Pressure on Phase and Group Modal Birefringence in Microstructure Fiber

Zhang Chunshu Kai Guiyun Wang Zhi Sun Tingting Wang Chao Liu Yange  
Liu Jianfei Yuan Shuzhong Dong Xiaoyi

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract:** The influence of lateral pressure on the birefringent characteristics of high-birefringent microstructure fiber is theoretically investigated using a full-vector finite element method, which is different from other reports applying hydrostatic pressure. In the wavelength range 600~1700 nm, the results indicate that the variation of the phase and group modal birefringence is different, when the lateral pressure is applied along the slow axis and fast axis of the microstructure fiber, respectively. Furthermore, when the lateral pressure is applied along the slow axis and fast axis, respectively, the effect of lateral pressure on the sensitivity of phase and group modal birefringence of microstructure fiber is also different. The research has great signification in microstructure fiber designing, microstructure fiber sensors especially multidimensional optical fiber sensors.

**Key words:** fiber optics; phase modal birefringence; group modal birefringence; susceptibility to lateral pressure; full-vector finite-element method

### 1 引 言

微结构光纤(Microstructure fibers, MFs)因其设计的灵活性和具有一系列独特的光学特性<sup>[1]</sup>,目前已经应用到很多领域中<sup>[2~5]</sup>。拉制传统双折射光纤在技术上比较难实现,而在微结构光纤中可以通过改变包层结构参量就很容易得到具有高双折射效应的微结构光纤<sup>[6,7]</sup>。目前很多关于微结构光纤在

传感领域应用的报道。研究表明它们的双折射对温度灵敏性不太高<sup>[6,8,9]</sup>,这是因为微结构光纤由单一的材料(石英)构成,并且沿着光纤方向具有大量的空气孔。微结构光纤的双折射的温度不敏感特性使其在其他物理参量(如流体静压、径向和轴向的压力及扭转等)的测量上具有很大的吸引力<sup>[10,11]</sup>。然而侧向压力对高双折射微结构光纤双折射特性的

\* 国家自然科学基金(60407005,60137010)、国家 973 计划(2003CB314906)、国家 863 计划(2002AA313110)和南开大学科技创新基金资助课题。

作者简介: 张春书(1978~),男,河北献县人,南开大学现代光学研究所博士研究生,主要从事光电子器件及微结构光纤的理论和实验研究。E-mail: chunshuzhang@163.com

收稿日期: 2005-03-29; 收到修改稿日期: 2005-06-10

研究还未见报道。本文采用全矢量有限元法在理论上研究了不同方向侧向压力对高双折射微结构光纤的相双折射  $B$  和模双折射  $G$  的影响。同时还研究了微结构光纤相双折射的压力灵敏度  $dB/df$  和模双折射的压力灵敏度  $dG/df$  随波长变化的规律。

## 2 基本原理

高双折射微结构光纤的横截面如图 1 所示<sup>[12]</sup>。这种光纤的纤芯的周围有 5 层空气孔,包层空气孔的间距  $\Lambda = 3.9 \mu\text{m}$ ,其双折射是由两个临近纤芯的大空气孔引起,这两个大空气孔的直径 ( $d_2 = 3.6 \mu\text{m}$ ) 远远大于包层中其他空气孔的半径 ( $d = 1.8 \mu\text{m}$ )。这样改变尺寸后的两个大空气孔就改变了纤芯附近两个横向正交方向的有效折射率差,从而得到了高双折射的微结构光纤。把光纤中两个大空气孔方向(光纤快轴)设为  $y$  轴。

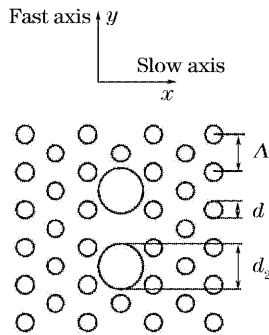


图 1 双折射微结构光纤横截面

Fig. 1 Cross section of the birefringent microstructure fiber

高双折射光纤的两个重要的参量就是相双折射  $B$  和模双折射  $G$ ,这两参量的定义如下:

$$B = \Delta n = \frac{\lambda}{2\pi}(\beta_x - \beta_y), \quad (1)$$

$$G = \Delta n - \lambda \frac{d\Delta n}{d\lambda} = B - \lambda \frac{dB}{d\lambda}, \quad (2)$$

$\Delta n$  为折射率差,  $\beta_x$  和  $\beta_y$  表示光纤中基模的两个正交极化模的传播常量,它们可以利用带有边界条件的全矢量有限元法求得<sup>[13]</sup>,在模型中采用了包含 45800 单元的网络来计算。通过计算得到一系列波长的相双折射  $B(\lambda)$ ,并拟合出一个六次多项式,根据此多项式就可求得  $dB/d\lambda$ ,然后根据(2)式就可得出模双折射  $G(\lambda)$ 。

当侧向压力作用到微结构光纤上时,微结构光纤的截面上的应力场因空气孔的存在产生不均匀分布,同时光纤也会因应力的存在产生微形变,这都将对光纤的相双折射和模双折射产生影响。侧向应力

首先使各向同性的石英具有了双折射特性,通常情况下主要的折射率为

$$n_i(x, y) = n(x, y) + \Delta n_i(x, y), \quad (3)$$

$$i = x, y, z$$

压力引起的折射率变化的修正项  $\Delta n_x(x, y)$  和  $\Delta n_y(x, y)$  为

$$\begin{cases} \Delta n_x(x, y) = C_1 \sigma_x(x, y) + \\ \quad C_2 [\sigma_y(x, y) + \sigma_z(x, y)], \\ \Delta n_y(x, y) = C_1 \sigma_y(x, y) + \\ \quad C_2 [\sigma_x(x, y) + \sigma_z(x, y)], \\ \Delta n_z(x, y) = C_1 \sigma_z(x, y) + \\ \quad C_2 [\sigma_x(x, y) + \sigma_y(x, y)], \end{cases} \quad (4)$$

其中  $C_1$  和  $C_2$  为弹光系数,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  是正应力。因为微结构光纤是由均一的石英构成的并且沿  $z$  轴保持不变,所以采用平面应变模型。

再根据(4)式就可以求得压力引起的折射率变化  $\Delta n_x(x, y)$  和  $\Delta n_y(x, y)$ 。计算中采用与石英玻璃相适应的材料常数<sup>[14,15]</sup>:弹性模量  $E = 73.1 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.17$ ,并假定弹光系数  $C_1$  和  $C_2$  与波长没有关系,  $C_1 = 6.5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $C_2 = 4.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ 。

## 3 侧向压力引起的双折射计算结果分析

对图 1 所示微结构光纤中的  $x$  方向和  $y$  方向分别施加侧向压力,利用全矢量有限元法分别对这两种情形下微结构光纤的相双折射  $B$  和模双折射  $G$  随波长变化的规律进行分析,进一步研究微结构光纤的  $B$  和  $G$  的压力灵敏度( $dB/df$  和  $dG/df$ )随波长的变化而变化的规律。本文研究波段为  $600 \sim 1700 \text{ nm}$ ,并假定石英的折射率满足塞耳迈耶尔方程。众所周知,采用全矢量有限元法能够分析具有任意形状、大小和排列的空气孔的微结构光纤,并且该方法不仅能够分析光纤中电磁场的分布同时也能分析光纤所受外力的情形<sup>[12]</sup>。因而采用全矢量有限元法对微结构光纤受到侧向应力时的双折射变化进行分析。本模型中微结构光纤的结构对称性,为了减少计算量和计算时间,只对光纤的  $1/4$  部分进行分析。首先分析了无应力作用下微结构光纤的相双折射  $B(\lambda)$  和模双折射  $G(\lambda)$  随波长的变化关系,如图 2 所示,结果与文献[11,12]报道一致。在光纤的  $x, y$  方向分别施加  $100 \text{ N}$ 、 $300 \text{ N}$  和  $500 \text{ N}$  的侧向压力,采用有限元法得到在不同应力下微结构光纤所传导的基模传播常量  $\beta_x$  和  $\beta_y$ ,从而可以求得

相应微结构光纤在不同应力下的双折射  $B(\lambda)$  和

$G(\lambda)$  随波长变化的关系曲线, 如图 2 所示。

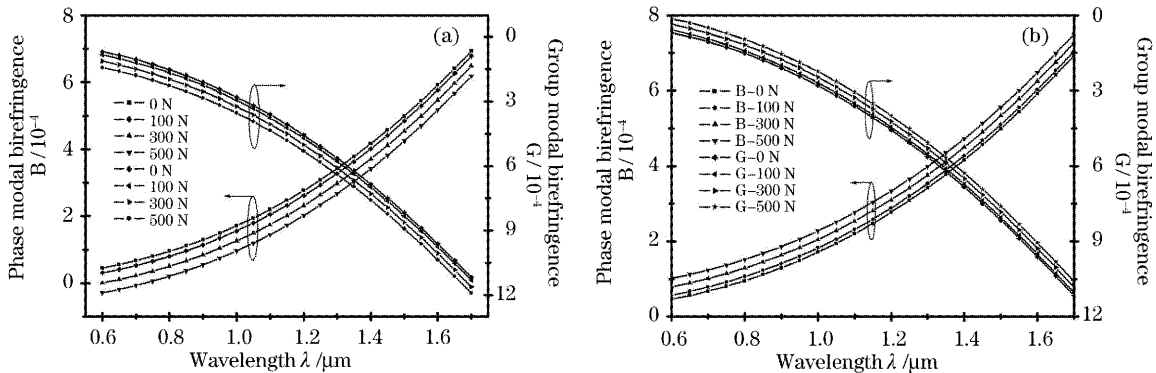


图 2  $x$  方向(a)和  $y$  方向(b)应力作用下微结构光纤的相双折射  $B(\lambda)$  和群双折射  $G(\lambda)$

Fig. 2 Spectral dependence of the phase  $B(\lambda)$  and the group modal birefringence  $G(\lambda)$  on pressure along  $x$  (a) and  $y$  axes (b)

从图 2 中可以看出, 在  $x$  和  $y$  方向施加外力对微结构光纤的双折射产生的作用是相反的。在  $x$  方向施加压力产生的应力双折射抵消了微结构光纤本身固有的几何双折射和残余应力双折射, 所以光纤的相双折射  $B$  和模双折射  $G$  随着  $x$  方向压力的增大而减小, 如图 2 所示  $B$  和  $G$  曲线随着压力的增大向小的方向移动。而在  $y$  方向施加压力对光纤双折射产生的作用恰恰相反, 随压力的增大而增大。

应变分布完全不同。

压力作用下的微结构光纤的双折射性质主要由光纤的基模模场能量分布和两个正交的偏振方向上折射率差  $\Delta n$  分布的交互作用决定。图 3 为采用有限元法计算出的微结构光纤传导的波长为 1700 nm 的光的基模模场等高线图, 由图可知模场主要集中在光纤的纤芯和第一层空气孔的区域, 且随着波长的增加模场会向外扩展。通过全矢量有限元法, 对不同方向应力作用下的微结构光纤的应变进行分析。图 4 为沿  $x$ 、 $y$  方向分别对图 1 所示的光纤施加 300 N 压力时光纤纤芯附近区域应变的灰度分布图。由图 4 可以看出由于空气孔的存在使得微结构光纤受力时产生的应变分布非常复杂, 在第一层空气孔边缘附近区域产生的应变较大。同时研究还发现在沿  $x$  轴和  $y$  轴方向的应力作用下光纤产生的

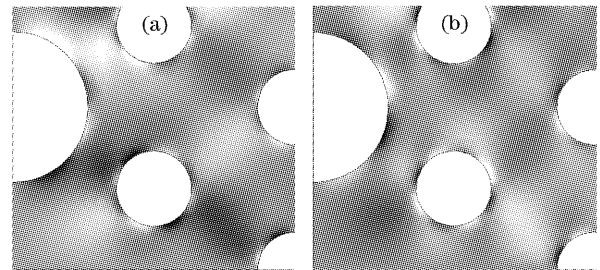


图 4 在  $x$  方向(a)、 $y$  方向(b)压力下微结构光纤横截面上石英玻璃的应变

Fig. 4 Map of strain under pressure along  $x$ -axis (a), and  $y$ -axis (b) in the cross section of the microstructure fiber

应力致使微结构光纤的应变分布不均匀, 导致应力作用下光纤的不同部位的折射率变化 ( $\Delta n$ ) 分布同样复杂, 且与所受应力的大小、方向有密切关系。图 5 表示  $x$ 、 $y$  方向分别施加 300 N 压力时光纤横截面上  $\Delta n$  的变化情况。与图 4 相比较可知应力作用下光纤横截面上某点折射率变化量与该点应

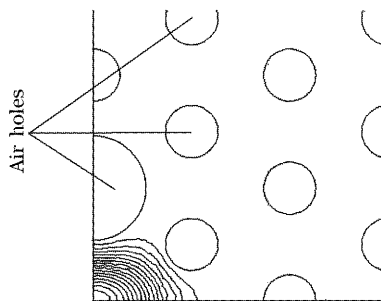


图 3 微结构光纤中波长为 1700 nm 的模场

Fig. 3 Modal field the microstructure fiber at 1700 nm

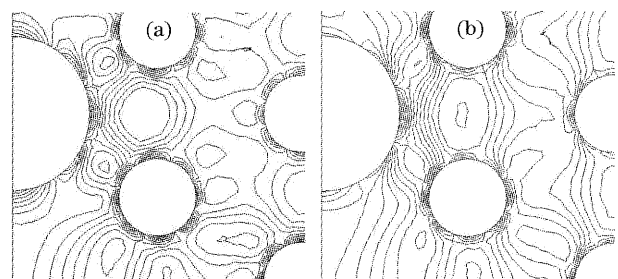


图 5 在  $x$  方向(a)和  $y$  方向(b)压力下微结构光纤横截面上折射率变化 ( $\Delta n$ ) 图

Fig. 5 Map of refractivity variation  $\Delta n$  under pressure along  $x$ -axis (a), and  $y$ -axis (b) in the cross section of the microstructure fiber

力导致的应变有直接关系,应变越大则导致的折射率变化也越大。图 5 还表明在纤芯到第一层空气孔的区域内应力导致纤芯的  $\Delta n$  的变化较小,距纤芯越远  $\Delta n$  的变化就越大,且在第一层空气孔附近区域因存在应力集中使得  $\Delta n$  的变化也很大。同时,还可以发现不同方向的压力给光纤横截面造成折射率变化分布不同。

微结构光纤的相双折射的压力灵敏度随波长的变化可以根据下式求得:

$$\frac{dB}{df} = \frac{B_f - B_{f=0}}{f}, \quad (5)$$

$f$  为压力。由图 3 得到的数据并结合(5)式可计算出所研究的微结构光纤的相双折射压力灵敏度  $dB/df$ ,图 6 表示了在  $x$  和  $y$  方向施加压力时相双折射的压力灵敏度随波长的变化。图 3 已表明沿  $x$  方向的压力灵敏度  $dB/df_x$  为负值,而沿  $y$  方向的压力灵敏度  $dB/df_y$  则为正值,图 6 中就体现了这种规律。微结构光纤自身结构的特点就决定了它的相双折射的压力灵敏度必然由光纤中石英玻璃和空气孔的双重作用所决定。结合(1)式可知,图 5 也直接反应了了应力作用下微结构光纤的相双折射分布情况。随着波长的增加微结构光纤中传导光的基模模场逐渐向外扩展,压力沿着  $x$  轴方向时随着波长的增加模场就逐渐扩展到  $\Delta n$  变化率大的区域,从而导致压力作用下相双折射的变化率  $dB/df_x$  逐渐变大。然而基模模场随着波长的增大向外扩展的同时,也会有更多的能量进入纤芯周围空气孔,由于空气孔中不存在双折射,这将抵消光纤中一部分双折射效应,也就减缓了  $dB/df_x$  增大的趋势。随着波长的增加进入空气孔区域的模场逐渐增大,空气孔减缓  $dB/df_x$  增大的作用逐渐增大,当波长增大到一定值时,光纤中的空气孔对相双折射的减缓作用占了主

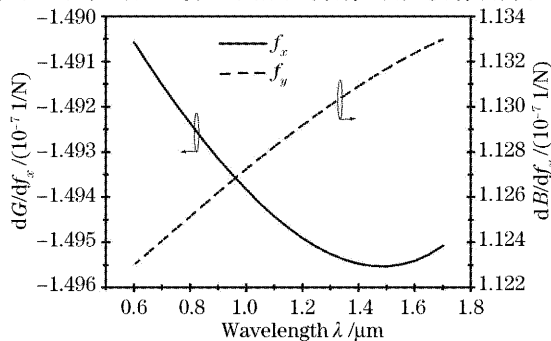


图 6  $x$  和  $y$  方向应力下微结构光纤的相双折射率压力灵敏度  $dB/df$

Fig. 6 Susceptibility of the phase modal birefringence  $dB/df$  to pressure along  $x$  and  $y$  axes

导地位,于是总的相双折射压力灵敏度开始减小。图 6 反应了  $x$  方向压力下  $dB/df_x$  随波长变化规律,当波长在  $1.48 \mu\text{m}$  时  $dB/df_x$  达到极值。同理,压力沿  $y$  方向时,随着波长的增加相双折射的变化率也会变大,空气孔对双折射效应的抵消同样存在,而此时空气孔对相双折射的减缓没有占到主导地位,因而  $dB/df_y$  随着波长的增加单调递增,只是增大趋势逐渐减小而已。

采用类似的方式求得微结构光纤模双折射的压力灵敏度  $dG/df$ ,如图 7 所示。从图中可知在所研究的波段, $dG/df$  随波长的变化规律,根据  $G$  的定义并结合  $B$  和  $dB/df$  变化规律可阐释  $dG/df$  的变化规律。

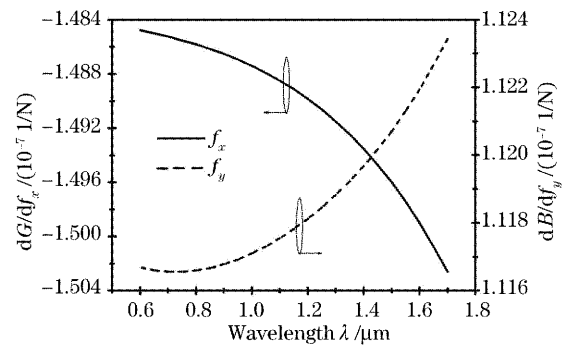


图 7  $x$  和  $y$  方向应力下微结构光纤的群双折射压力灵敏度  $dG/df$

Fig. 7 Susceptibility of the group modal birefringence  $dG/df$  to pressure along  $x$  and  $y$  axes

## 4 结 论

采用全矢量有限元法理论分析了在高双折射微结构光纤的慢轴( $x$ 轴)和快轴( $y$ 轴)方向施加压力时光纤的相双折射和模双折射随波长的变化规律。研究表明在  $600 \sim 1700 \text{ nm}$  波段内,光纤受到不同方向的压力时所引起的光纤双折射变化不同。微结构光纤的相双折射和模双折射随着沿  $x$  方向的压力的增加而减小,而随  $y$  方向的力的增加而增大。此外研究还发现微结构光纤相双折射和模双折射的压力灵敏度  $dB/df$  和  $dG/df$  随波长的变化与光纤所受力的方向关系密切。当在  $x$  方向施加压力时  $dB/df$  和  $dG/df$  都是负值,并且  $dG/df$  随着波长的增大单调递减,而  $dB/df$  则先减小后增加;然而在  $y$  方向施加压力时  $dB/df$  和  $dG/df$  则都是正,且随波长的增大  $dB/df$  单调递增, $dG/df$  则先减小后增加。本文研究对于微结构光纤的设计及在传感等领域尤其是多维传感的应用具有很大的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt *et al.*. White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(17): 1356~1358
- 3 J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte *et al.*. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser [J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(7): 818~823
- 4 J. C. Knight, J. Arriaga, T. A. Birks *et al.*. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber[J]. *Photon. Technol. Lett.*, *IEEE*, 2000, **12**(7): 807~809
- 5 Chun-liu Zhao, Xiufeng Yang, Chao Lu *et al.*. Temperature-insensitive interferometer using a highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror[J]. *Photon. Technol. Lett.*, *IEEE*, 2004, **16**(11): 2535~2537
- 6 Kazunori Suzuki, Hirokazu Kubota, Satoki Kawanishi *et al.*. Optical properties of a low-loss polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. *Opt. Exp.*, 2001, **9**(13): 676~680
- 7 A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth *et al.*. Highly birefringent photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18): 1325~1327
- 8 A. Ortigosa-Blanch, A. Diez, M. Delgado-Pinar *et al.*. Temperature independence of birefringence and group velocity dispersion in photonic crystal fibres[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(21): 1327~1329
- 9 T. Ritari, H. Ludvigsen, M. Wegmuller *et al.*. Experimental study of polarization properties of highly birefringent photonic crystal fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(24): 5931~5939
- 10 Zhaoming Zhu, Thomas G. Brwn. Stress-induced birefringence in microstructured optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(23): 2306~2308
- 11 Gabriela Statkiewicz, Tadeusz Martynkien, Waclaw 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
- 12 Marcin Szpulak, Tadeusz Martynkien, Waclaw Urbanczyk. Effects of hydrostatic pressure on phase and group modal birefringence in microstructured holey fibers[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(24): 4739~4744
- 13 M. Koshiha M, K. Saitoh. Numerical verification of degeneracy in hexagonal photonic crystal fibers[J]. *Photon. Technol. Lett.*, *IEEE*, 2001, **13**(12): 1313~1315
- 14 Waclaw Urbanczyk, Tadeusz Martynkien, Wojtek J. Bock. Dispersion effects in elliptical-core highly birefringent fibers[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(12): 1911~1920
- 15 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Stress sensitivity enhanced in fiber Bragg grating pressure sensor[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 473~476 (in Chinese)  
傅海威, 乔学光, 贾振安等. 应力增敏的光纤布拉格光栅压强传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 473~476