

文章编号: 0253-2239(2006)09-1325-4

高双折射光子晶体光纤中均匀布拉格光栅的特性*

王 智 李欣蓓 王晶晶

(北京交通大学理学院光信息科学技术研究所, 北京 100044)

摘要: 研究了具有高双折射的光子晶体光纤(HB PCF)中均匀布拉格光栅(FBG)的光谱特性。利用紧凑的超格子模型,对光子晶体光纤的传输特性进行分析,研究正向传输和反向传输的模式之间的耦合规律,从而研究写入光子晶体光纤中的均匀布拉格光栅的特性。首先给出具有 C_{6v} 对称性的零双折射光子晶体光纤中光纤布拉格光栅的布拉格波长 λ_B 随光纤结构参量的变化规律;然后分析一种高双折射光子晶体光纤中的光纤布拉格光栅的光谱特性,高双折射使两个不同偏振态的反射峰分开较大;最后分析了一种常用的双模双折射光子晶体光纤中光纤布拉格光栅的光谱特性, LP_{01} 模和 LP_{11} 模的两个偏振态对应的反射谱都由于高双折射而分开。

关键词: 光纤光学; 光子晶体光纤; 光纤布拉格光栅; 双折射; 双模光子晶体光纤

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Properties of Uniform Fiber Bragg Grating in High Birefringent Photonic Crystal Fiber

Wang Zhi Li Xinbei Wang Jingjing

(Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: The spectral property of the uniform fiber Bragg grating in the high-birefringence photonic crystal fiber are studied. By using the compact supercell method, the transmission property of photonic crystal fiber is analyzed, the coupling rule of forward and backward transmission modes is studied, and properties of uniform fiber Bragg grating written in photonic crystal fiber are concluded. The dependence of Bragg wavelength λ_B , defined as the resonant wavelength of the fiber Bragg grating in photonic crystal fiber with C_{6v} symmetry, on the fiber structural parameters is expressed. The spectrum of the fiber Bragg grating inscribed in a high-birefringent photonic crystal fiber is analyzed and the peaks of reflectivity with different polarization states are much separated for the high birefringent index. Finally, the spectrum of a common fiber Bragg grating in a birefringent two-mode photonic crystal fiber are obtained, in which peaks of reflectivity corresponding to two polarization states of modes LP_{01} and LP_{11} are separated due to high birefringence of the photonic crystal fiber.

Key words: fiber optics; photonic crystal fiber; fiber Bragg grating; birefringence; two-mode photonic crystal fiber

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)^[1]自 1996 年问世以来,迅速成为研究热点,在大量研究机构和人员的广泛研究之后,已经逐步进入应用研究^[2]。光子晶体光纤不仅具有无尽单模特性、灵活的色散特性等等^[1],而且可以通过改变对称性或者改变空气孔的位置、形状和尺寸等参量来获取比传统光纤高一个量级的模式双折射^[3,4]。这些高双折射光子晶体光纤(HB PCF)可以用于高速光通信系统,或者在光纤陀螺等

偏振相关光器件中作为保偏光纤使用。在具有光敏性掺 Ge 的光子晶体光纤中,采用传统的紫外曝光方法写入光纤布拉格光栅(FBG);纯石英材料光子晶体光纤不具有光敏性,可以利用双光子吸收原理写入光纤布拉格光栅^[5]。

由于结构的复杂性,在光子晶体光纤尤其是高双折射光子晶体光纤中写入光纤布拉格光栅的报道比较少,本文主要对高双折射光子晶体光纤中的光纤布拉格光栅的光谱特性进行理论与仿真分析。

* 国家自然科学基金(60402006)和北京交通大学基金(2005M008)资助课题。

作者简介: 王 智(1971~),男,湖北蕲春人,北京交通大学副教授,博士,主要从事光纤通信、光电子和特种光纤等的科研与教学工作。E-mail: zhiwang@center.njtu.edu.cn

收稿日期: 2005-11-28; 收到修改稿日期: 2006-01-10

2 C_{6v} 对称的光子晶体光纤中光纤布拉格光栅特性

光纤布拉格光栅使正向传输模式与反向模式之间发生耦合,如果满足(1)式所示的相位匹配条件^[6],谐振波长处的光产生高反射,透射谱上则出现损耗峰:

$$\lambda_B = (n^+ + n^-)\Delta_g, \quad (1)$$

式中 λ_B 为光纤布拉格光栅的谐振波长, Δ_g 是光栅周期, n^+ , n^- 分别是正向和反向传输模式折射率。

目前,在光子晶体光纤中写入光纤布拉格光栅时,都是选择具有 C_{6v} 对称的结构,即光纤介电常量横向分布同时具有 $2\pi/6$ 旋转对称和反转对称^[7],如图 1 所示。图中 Δ_r 为空气孔间距, d 为空气孔直径,一般用相对孔径 $f = d/\Delta_r$ 来度量孔的大小, R 是光敏芯区半径,图中只给出一圈空气孔的结构。

在这种光纤中,基模的两个正交偏振态理论上是简并的,因此,写入其中的光纤布拉格光栅的布拉格波长 λ_B 不会发生分裂,从而只需要研究一个偏振态的模式耦合即可获得关于光栅的传输特性。如果光子晶体光纤的结构参量为 $\Delta_r = 9 \mu\text{m}$, $f = 0.4$, $R = 4.5 \mu\text{m}$ (6圈空气孔),在其中写入光栅的周期

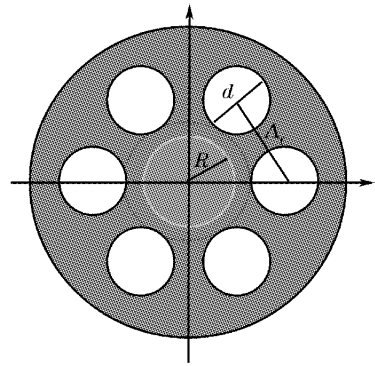


图 1 具有 C_{6v} 对称的光子晶体光纤横截面

Fig. 1 Cross-section of a photonic crystal fiber with C_{6v} symmetry

为 $0.5365 \mu\text{m}$, 长度为 14 cm , 调制指数为 2×10^{-4} , 其反射谱与透射谱如图 2(a)所示。光纤布拉格光栅的传输特性不仅与光栅本身的结构有关, λ_B 也受光子晶体光纤结构参量(空气孔圈数、 Δ_r 和 f)的影响。一般地,随着空气孔的圈数增加或者 Δ_r 增大, λ_B 增大;随着空气孔相对大小 f 的增大, λ_B 减小。图 2(b)~图 2(d)分别表示了布拉格波长随这些结构参量的变化情况,文献[8]对此也进行了一些研究。

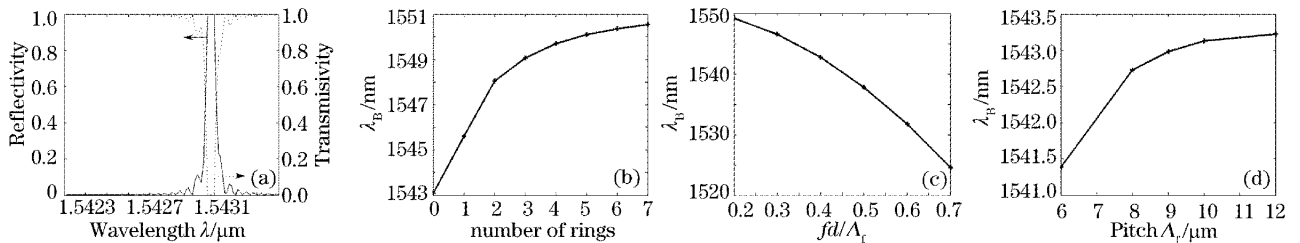


图 2 具有 C_{6v} 对称的光子晶体光纤横截面。(a)反射谱与透射谱,(b) λ_B 随空气孔圈数而减小,(c) λ_B 随 f 而增大,(d) λ_B 随空气孔间距而增大

Fig. 2 Reflection and transmission spectra (a) and dependencies of the Bragg wavelength on the fiber structural parameters, (b) number of rings of air holes, (c) relative hole size, (d) hole space of a uniform fiber Bragg grating in photonic crystal fiber with C_{6v} symmetry

3 超高双折射光子晶体光纤中光纤布拉格光栅的光谱

利用双折射光子晶体光纤可获得超过 10^{-3} 的模式双折射, J. Ju 和 N. Guan 对此都有报道^[3,4]。在如此高的双折射光子晶体光纤中写入光纤布拉格光栅,可以使两个偏振态对应的反射峰间距超过 1 nm 。

图 3(a)和图 3(b)是文献[4]中的高双折射光子晶体光纤的横截面结构和 $1.540 \mu\text{m}$ 附近的模式双折射 Δn_{01} 。光纤是石英-空气孔结构,空气孔间距

为 $2.7 \mu\text{m}$, 小孔直径为 $1.4 \mu\text{m}$, 大孔直径为 $2.3 \mu\text{m}$ 。这样的结构可以获得超高双折射。如果在其中芯区内半径为 $1.0 \mu\text{m}$ 的区域写入均匀光纤布拉格光栅,周期为 $0.550 \mu\text{m}$, 长度为 14 cm , 折射率调制为 4×10^{-4} , 两个偏振态的反射谱如图 4 所示。

两个反射峰分别对应两个不同偏振态的光的反射谱,反射峰之间的波长间隔 $\Delta\lambda_B$ 与光纤双折射 B 的关系由下式描述^[9]:

$$\Delta\lambda_B = 2B\Delta_g. \quad (2)$$

由于光纤的模式双折射较大, $\Delta\lambda_B$ 也比较大,图中两

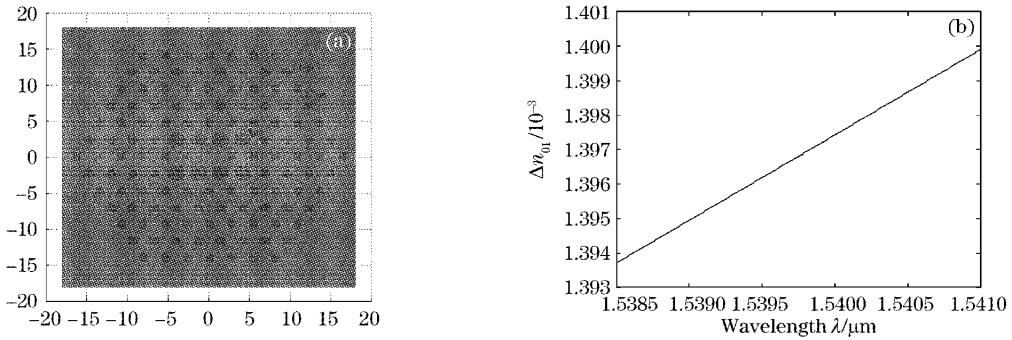


图 3 高双折射光子晶体光纤的横截面结构(a)和模式双折射(b)

Fig. 3 Cross section of an high-birefringence photonic crystal fiber (a) and modal birefringence (b)

个反射峰的位置分别是 1.53915 μm 和 1.54062 μm, 波长间隔达到 1.47 nm.

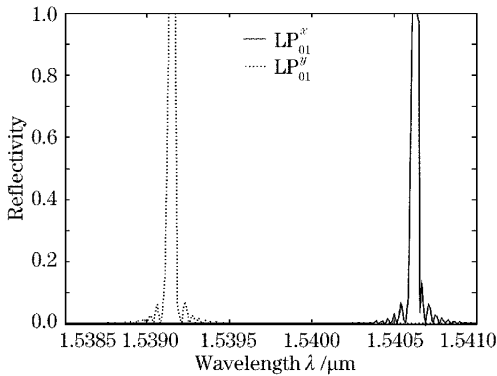


图 4 文献[4]的光子晶体光纤中写入光纤布拉格光栅的反射谱

Fig. 4 Reflection spectra of an fiber Bragg grating inscribed in the photonic crystal fiber of reference [4]

4 双模高双折射光子晶体光纤中光纤布拉格光栅的光谱

图 5(a)所示的高双折射光子晶体光纤是由丹麦 Crystal Fibre A/S 生产的商用光纤,空气孔间距

为 4.179 μm,小孔直径为 2.239 μm,两个大孔直径为 4.069 μm。在所研究的波段内,光纤支持双模工作,同时束缚基模的两个偏振态 LP_01^x 和 LP_01^y 和二阶偶模的两个偏振态 LP_11^e 和 LP_11^o [10]。图 5(b)是该光纤在 1.53 μm 附近的模式双折射,图中同时给出了 LP_01 和 LP_11^e 模的双折射。正是因为它的双折射特性和双模特性,这种光纤引起了广泛的关注 [11,12]。

在这种光纤中写入长度为 14 cm,周期为 0.5365 μm 的均匀光纤布拉格光栅,调制指数为 4 × 10^-5,正反向基模耦合产生的反射光谱如图 6(a)所示。图中可见,两个反射峰的位置为 1.52844 μm 和 1.52890 μm,分别与 x、y 两个偏振态对应,波长间隔由(2)式决定,约为 0.46 nm。

LP_11^e 模的模式折射率比 LP_01 模的小,相同周期光纤布拉格光栅产生的 LP_11^e 模的布拉格波长也较小,没有出现在图 6(a)所示的波段。为了便于观察比较,将光纤布拉格光栅的周期增大为 0.5406 μm,这时 LP_11^e 模的反射谱如图 6(b)所示。两个反射峰的位置分别为 1.52846 μm 和 1.52886 μm,波长间隔约为 0.4 nm。

LP_01 模和 LP_11^e 模的反射系数有较大差异,主要是

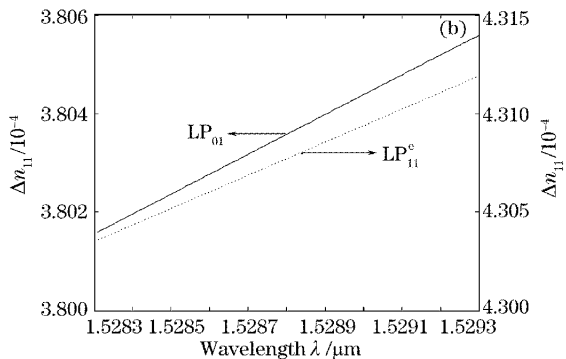
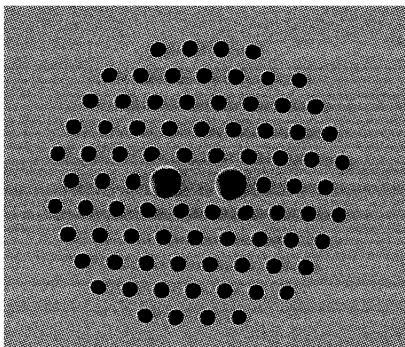
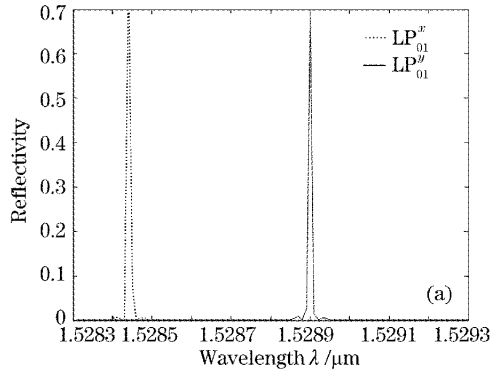


图 5 双模高双折射光子晶体光纤的横截面扫描电镜图(a)和双折射特性(b)

Fig. 5 Scanning electron microscope cross-section image (a) and birefringence (b) of a two-mode high-birefringence photonic crystal fiber

由它们各自与写有光纤布拉格光栅折射率调制区域(分析时选取半径为 $2 \mu\text{m}$)的耦合系数决定,在图中



所示波段内,二者的耦合系数分别为 $0.55287 / \mu\text{m}$ 和 $0.22963 / \mu\text{m}$,显然相差很大。

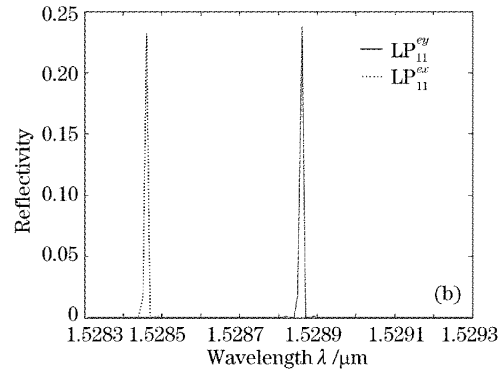


图 6 高双折射双模光子晶体光纤中光纤布拉格光栅的反射谱。(a) LP_{01} 模的反射谱, (b) LP_{11} 模的反射谱

Fig. 6 Reflection spectra of the fiber Bragg grating in the two-mode high birefringence photonic crystal fiber.

(a) LP_{01} mode, (b) LP_{11} mode

从图 4、图 6 所示的反射谱可以发现,高双折射光子晶体光纤中写入光纤布拉格光栅后,两个偏振态对应的反射峰的波长间隔比较大,不同偏振方向的光在不同的波长发生反射。如果两个反射谱没有重叠波段,可以将这种光子晶体光纤-光纤布拉格光栅系统应用于横向应力(应变)传感与检测^[13],或者用于偏振滤波器。当两个反射谱的带宽超过波长间隔, x, y 偏振光的反射谱会发生重叠,在重叠波段内,可实现偏振模色散补偿^[14]。

5 结 论

首先说明了具有 C_6 对称性的光子晶体光纤中均匀光纤布拉格光栅的传输特性随光纤结构的变化关系。然后对高双折射光子晶体光纤和双模双折射光子晶体光纤中的光纤布拉格光栅的光谱特性进行了理论研究,高双折射使不同偏振态的反射峰分开较大,可以达到 1.47 nm 以上。

致谢 作者感谢浙江大学陈学文博士和上海光机所刘锐关于光子晶体光纤中光纤布拉格光栅的讨论与建议。

参 考 文 献

- 1 Philip Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 2 Jonathan C. Knight. Photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 847~851

- 3 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
- 4 Ning Guan, Katsuhiko Takenaga, Katsuaki Izoe *et al.*. Highly birefringent photonic crystal fiber for a wide wavelength range [C]. *ECOC 2004*, 2004. 415~416
- 5 N. Groothoff, J. Canning, E. Buckley *et al.*. Bragg gratings in air-silica structured fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(4): 233~235
- 6 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 7 Ren Guobin, Wang Zhi, Lou Shuqin *et al.*. Mode classification and degeneracy in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(11): 1310~1321
- 8 Liu Rui, Qu Ronghui, Cai Haiwen *et al.*. Analysis of the transmission spectrum of fiber Bragg grating in photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1007~1012 (in Chinese)
- 刘 锐, 瞿荣辉, 蔡海文等. 光子晶体光纤布拉格光栅传输谱的特性分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1007~1012
- 9 Zhongwei Tan, Yongjun Fu, Tigang Ning *et al.*. Writing Bragg grating on high-birefringence fiber for PMD compensation [C]. *APOC2002 (Proc. SPIE 4904-53)*. 2002. 248~252
- 10 W. Jin, Z. Wang, J. Ju. Two-mode photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(6): 2082~2088
- 11 J. Ju, W. Jin, M. S. Demokan. Two-mode operation in highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(11): 2472~2474
- 12 Jian Ju, Zhi Wang, Wei Jin *et al.*. Temperature sensitivity of a two-mode photonic crystal fiber interferometer[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006 (to be published)
- 13 Chen-Chun Ye, S. E. Staines, S. W. James *et al.*. A polarisation maintaining fibre Bragg grating interrogation system for multi-axis strain sensing [C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002, **OFS2002**: 179~182
- 14 S. Lee, R. Khosravani, J. Peng *et al.*. High-birefringence nonlinearly-chirped fiber Bragg grating for tunable compensation of polarization mode dispersion[C]. *OFC '99*, 1999. 272~274