

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0204-04

新型色散平坦光子晶体光纤设计与分析

汪井源¹ 陈 焜² 王 荣¹ 文科¹ 朱 勇¹ 徐智勇¹

(¹ 解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007; ² 福建省东山县 73501 部队, 福建 漳州 363400)

摘要 研究了一种新改进的折射率导光子晶体光纤的色散性能。研究表明当纤芯空气孔的孔径小于包层空气孔孔径时, 光子晶体光纤仍然通过全内反射(TIR)导光。采用全矢量平面波展开法分析光子晶体光纤的色散特性, 并设计了波长为 1360 nm 到 1730 nm 时, 色散值在 -10 ± 0.5 ps/(nm·km) 之间的色散平坦光子晶体光纤, 其色散斜率在波长为 1370~1740 nm 时可达 ± 0.01 ps/nm²/km。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 全内反射; 平面波展开法

中图分类号 TN913.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200835s2.0204

A Novel Design of Index-guiding Photonic Crystal Fiber with Flattened Dispersion

WANG Jingyuan¹ Chen Han² Wang Rong¹ Wen Ke¹ Zhu Yong¹ Xu Zhiyong¹

1 Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China;
2 No.73501 of PLA, Zhangzhou, Fujian 363400, China

Abstract Index-guiding triangular PCF with air core is proposed which guides light by total internal reflection (TIR) when the air core is smaller than the air holes in cladding. Dispersion property is investigated using full-vectorial plane-wave expansion (PWE) method. The impacts of the air core on the dispersion property are demonstrated and PCF with dispersion values between -10 ± 0.5 ps/(nm·km) from 1360 nm to 1730 nm and dispersion slope between ± 0.01 ps/(nm²·km) from 1370 nm to 1740 nm is obtained.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber (PCF); total internal reflection (TIR); plane-wave expansion (PWE)

1 引言

光子晶体光纤(PCF)作为一种全新的光纤在近年来逐渐成为研究的热点领域, 并被称为下一代通信光纤。它是由单一材料(如纯石英材料)制成的新型微结构光纤, 在其轴向分布着周期排列的微小空气孔^[1~4]。在纤芯的空气孔中填充石英材料形成缺陷, 从而通过纤芯和包层之间形成的全内反射(total internal reflection, TIR)机制导光。这种折射率导光子晶体光纤也称为全内反射光子晶体光纤。这种光子晶体光纤引起了众多关注, 它具有传统光纤

所不具有的许多奇异特性, 比如高双折射特性、高非线性特性、大模场面积以及灵活的色散管理特性等^[5~8]。

目前, 很多国内外的研究都集中于超平坦色散光纤的设计以获得所需的应用^[9~13]。研究表明光子晶体光纤的色散特性很大程度取决于光纤的几何结构, 如光纤的尺寸, 空气孔间距, 空气孔的排列等^[13~15]。通过改变空气孔直径和空气孔之间的距离, 就可以灵活地设计光纤以获得所需的特性。如图 1(a)所示为包层空气孔呈三角形排列的折射率

基金项目: 中国博士后科学基金(20070420199)、江苏省自然科学基金(BK2008089)和江苏省博士后科研计划(0702014B)资助项目。

作者简介: 汪井源(1975—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光子晶体光纤、无线光通信等方面的研究。

E-mail: wjywjy@tom.com

导光光子晶体光纤,调整空气孔的直径 d , 孔间距 Λ 以及空气孔排列,就可获得不同的光子晶体光纤的色散特性。一般认为,折射率导光光子晶体光纤的纤芯为填充了高折射率材料的缺陷区域。但是实际上,纤芯如果包含有小于包层空气孔孔径的空气孔时,根据有效折射率理论,此时光子晶体光纤仍然通过全内反射(TIR)导光。之前的研究首次提出了利用纤芯空气孔改善 PCF 的色散特性^[14],本文在此基础上,研究了包含空气孔纤芯且包层空气孔呈三角形排列的折射率导光光子晶体光纤的色散特性,光纤结构如图 1(b)所示。在图 1(b)中,纤芯空气孔的孔径 d' 小于包层空气孔的孔径 d 时,此时纤芯有效折射率高于包层有效折射率。改变纤芯空气孔的大小同样可以改变这种折射率导光光子晶体光纤的色散特性。本文采用全矢量平面波展开法分析光纤特性,得到相应的色散曲线及数值结果。

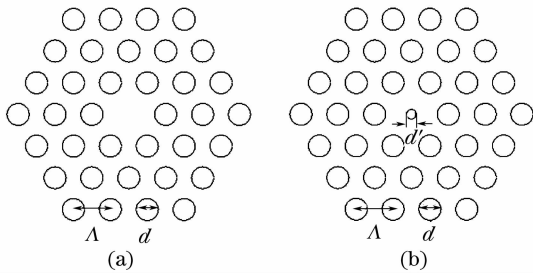


图 1 (a)传统折射率导光光子晶体光纤;
(b)空气芯折射率导光光子晶体光纤

Fig.1 (a) Traditional index-guiding PCF;
(b) Index-guiding PCF with aircore

2 新型 PCF 的结构设计及其超平坦色散特性

2.1 理论基础

根据模式传播理论,基模的有效折射率为 $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$, 其中 β 是传播常数, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是自由空间波数。根据 Maxwell 方程组可以得到模式的有效折射率,可以求得色散系数

$$D(\lambda) = -(\lambda/c)(d^2 n_{\text{eff}}/d\lambda^2), \quad (1)$$

式中 c 是真空中光速, λ 是工作波长。实际上,总色散为波导色散和材料色散之和,其一阶近似公式为

$$D(\lambda) \approx D_g(\lambda) + \Gamma(\lambda)D_m(\lambda) \quad (2)$$

其中 Γ 是石英材料的限制因子,对于折射率导光光子晶体光纤来说,因为模场主要被限制在纤芯区域,因此其值近似为 1。材料色散 D_m 可以直接由三阶 Sellmeier 方程得到。然后,可以按照式(1)的定义

来计算波导色散 D_g , 这时忽略材料折射率随波长变化的影响,而将其看成为常数(例如,纯石英的折射率是 1.45)。本文采用全矢量平面波展开法来分析光子晶体光纤的色散特性^[1,3]。

2.2 数值分析结果

事实上,波导色散与光纤的设计参数有很大的关系,因此可以通过优化设计参数来获得所需的色散特性^[14,15]。对于给定的 Λ 和 d , 纤芯空气孔孔径变化时,光子晶体光纤的波导色散如图 2 所示。图 2 中的实线为纯石英材料芯的光子晶体光纤的波导色散曲线。从图 2 中可以看出,当纤芯空气孔很小时($d'/\Lambda = 0.05$),其对色散的影响非常小,该曲线接近于实线($d'/\Lambda = 0$)。当纤芯空气孔逐渐增大时,空气孔芯对波导色散的影响也越来越明显,可以发现波导色散曲线变得逐渐平坦,并且零色散点波长向更短波长移动。

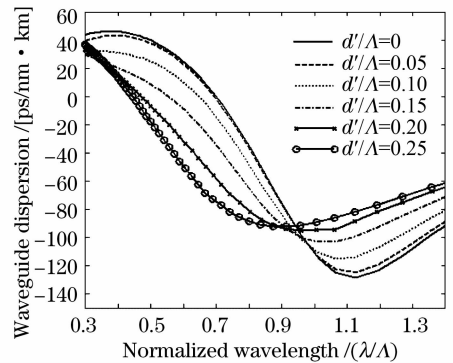


图 2 空气芯光子晶体光纤波导色散与归一化波长的关系
 $\Lambda = 2 \mu\text{m}, d = 0.8 \mu\text{m}$

Fig.2 Waveguide dispersion as a function of normalized wavelength for index-guiding PCF with air core
 $\Lambda = 2 \mu\text{m}, d = 0.8 \mu\text{m}.$

适当设计空气孔纤芯折射率导光光子晶体光纤,可以获得适合不同需要的色散特性。图 3 所示为包含了材料色散在内的超平坦色散光子晶体光纤总色散曲线和色散斜率曲线,这里 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}, d = 0.68 \mu\text{m}, d' = 0.255 \mu\text{m}$ 时。图中可见,从 1360 nm 到 1730 nm 的波长上,总色散值在 $-10 \pm 0.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 之间,其色散斜率在 1370 nm 到 1740 nm 的波长上为 $\pm 0.01 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。对比实芯光子晶体光纤的总色散曲线($\Lambda = 2.3 \mu\text{m}, d = 0.68 \mu\text{m}, d' = 0$),显然,带有空气孔纤芯的折射率导光光子晶体光纤的总色散曲线变得平坦。

考察纤芯有空气孔和无空气孔时的光子晶体光纤场分布,如图 4(a)和(b)所示,这里 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}, d = 1.38 \mu\text{m}, d' = 0.4 \mu\text{m}$,且波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。

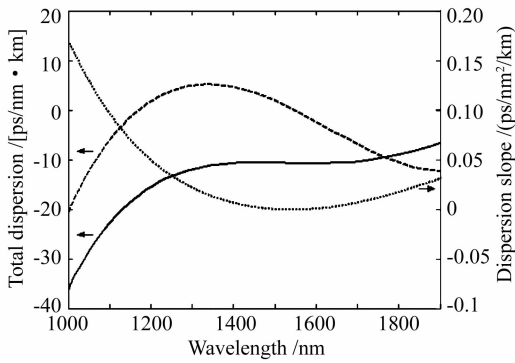


图3 空气芯光子晶体光纤的总色散曲线(实线)和色散斜率曲线(点线) $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, $d = 0.68 \mu\text{m}$, $d' = 0.255 \mu\text{m}$, 相同参数时, 无空气孔纤芯光子晶体光纤的总色散曲线(虚线) $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, $d = 0.68 \mu\text{m}$, $d' = 0$

Fig. 3 Total dispersion (solid curve) and dispersion slope (dotted curve) of PCF with air core, where total dispersion (solid curve) and dispersion slope (dotted curve) of PCF with air core, where $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, $d = 0.68 \mu\text{m}$ and $d' = 0.255 \mu\text{m}$. To compare with it, total dispersion of PCF without air-core (dashed curve) is illustrated too, where $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, $d = 0.68 \mu\text{m}$ and $d' = 0$

由于纤芯空气孔的引入, 包层对场的束缚能力被削弱, 限制在纤芯中的场逐渐向包层扩散。如图 4(a) 所示, 电场主要分布在实芯区域并且在纤芯的中心处具有最大值。在图 4(b) 中, 电场主要分布在空气芯和包层之间, 部分能量泄漏进空气孔芯和包层当中。

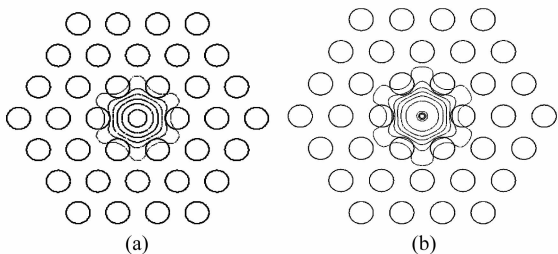


图4 (a) 传统折射率导光光子晶体光纤的电场分布; (b) 空气芯折射率导光光子晶体光纤的电场分布。
 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, $d = 1.38 \mu\text{m}$, $d' = 0.4 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

Fig. 4 (a) Electric-field distribution of traditional index-guided PCF; (b) electric-field distribution of index-guided PCF with air core. Here, $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, $d = 1.38 \mu\text{m}$, $d' = 0.4 \mu\text{m}$ and $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

3 结 论

本文研究了纤芯包含空气孔的折射率导光光子晶体光纤及其色散特性。空气孔纤芯的引入能更灵活地设计光子晶体光纤来获得所需色散特性。文中分析了空气孔纤芯对光子晶体光纤色散特性的影响, 并获得光波长从 1360 nm 到 1730 nm 时, 色散值在 $-10 \pm 0.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 之间的色散平坦光纤。理论上, 当纤芯空气孔的孔径小于包层空气孔的孔径时, 这种光子晶体光纤能够通过全内反射导光。通过调整纤芯空气孔的大小, 这种折射率导光光子晶体光纤的色散特性能够满足不同的应用。值得注意的是, 如果空气孔芯增大, 那么泄漏损耗也会迅速增加。当纤芯空气孔的孔径大于包层空气孔的孔径时, 这种光子晶体光纤是无法通过全内反射导光的。

参 考 文 献

- 1 Bjarklev J. Broeng, A. S. Bjarklev. Photonic Crystal Fibers [M]. Kluwer: Academic, 2003, 1~8
- 2 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
- 3 J. Broeng, D. Mogilevstev, S. E. Barkou *et al.*. Photonic crystal fibers: A new class of optical waveguides [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 1999, **5**: 305~330
- 4 W. H. Reeves, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(14), 609~613
- 5 T. A. Birks, J. C. Knight, P. S. J. Russel. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13), 961~963
- 6 K. Saitoh, M. Koshiba. Leakage loss and group velocity dispersion in air-core photonic bandgap fibers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(23), 3100~3109
- 7 J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks *et al.*. Photonic band gap guidance in optical fiber [J]. *Science*, 1998, **282**: 1476~1478
- 8 Philip Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**: 358~362
- 9 K. Saitoh, M. Koshiba. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(8): 843~852
- 10 F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri *et al.*. Tailoring of flattened dispersion in highly nonlinear photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1065~1067
- 11 Ferrando, E. Silvestre, P. Andrés *et al.*. Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13), 687~697
- 12 L. P. Shen, W. P. Huang, S. S. Jian. Design and optimization of photonic crystal fibers for broadband dispersion compensation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(4), 540~542
- 13 Jingyuan Wang, Chun Jiang, Weisheng Hu *et al.*. Modified design of photonic crystal fibers with flattened dispersion [J]. *Optics and Laser Technol.*, 2006, **38**: 169~172

- 14 Jingyuan Wang, Chun Jiang, Weisheng Hu *et al.* . Properties of index-guided PCF with air-core[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**:317~321
- 15 Jingyuan Wang, Chun Jiang, Weisheng Hu *et al.* . High birefringence photonic bandgap fiber with elliptical air holes[J]. *Optics Fiber Technology*, 2006, **12**:265~267
- 16 K. Saitoh, N. Florous, M. Koshiba. Ultra-flattened chromatic-dispersion controllability using a defected-core photonic crystal fiber with low confinement losses[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**: 8365~8371
- 17 Jingyuan Wang, Mingyi Gao, Chun Jiang *et al.* . Design and parametric amplification analysis of dispersion-flat photonic crystal fibers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, **3**(7), 380~382