

文章编号: 1001-3806(2009)01-0024-03

光子晶体光纤的色散特性分析

詹仪¹, 李效增¹, 郑义²

(1. 曲阜师范大学 印刷学院, 日照 276826; 2. 北京交通大学 理学院, 北京 100044)

摘要: 为了探讨靠近纤芯区域的第1层、第2层和第3层空气孔的直径对光子晶体光纤色散特性的影响, 采用有限元法进行了理论分析。结果表明, 适当调节第1层、第2层和第3层空气孔的直径, 可以使零色散点在1100nm~1800nm之间的任何位置上移动。还可以设计在1270nm~1800nm较宽的波长范围内接近零色散的色散平坦光子晶体光纤。这一结果对光子晶体光纤的设计具有重要的作用。

关键词: 光电子学; 色散; 有限元法; 光子晶体光纤

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A

Analysis of dispersion characteristics of photonic crystal fibers

ZHAN Yi¹, LI Xiao-zeng¹, ZHENG Yi²

(1. College of Graphic Arts, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China; 2. College of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The dispersion properties of photonic crystal fibers were studied with finite element method (FEM) by changing the diameter of the air-holes belonging to the first three rings. It was found that zero dispersion wavelength could be shifted in the range of 1100nm~1800nm by adjusting the air-hole diameter of the first, the second or the third ring. Photonic crystal fibers with nearly zero flattened dispersion over a very broad spectral range can be designed through choosing the suitable air-hole diameter of the first, the second or the third ring. The results is useful for photonic crystal fibers design.

Key words: optoelectronics; dispersion; finite element method; photonic crystal fiber

引言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 是在普通石英光纤中沿轴向均匀排列着空气孔, 从端面看, 存在2维周期性结构, 若其中一个孔遭到破坏或缺失, 则会出现缺陷, 光就会被限制在缺陷中传输^[1]。PCF已展现出与普通光纤完全不同的特性^[2,4], 如单模传输波长从337nm到1550nm, 零色散点可移动到可见光波段和极强的非线性效应等。

色散是光纤的一个重要参量, 对光通讯以及应用光子晶体光纤进行色散补偿^[5]和设计有源器件^[6]等都起着决定作用。因此, 对于光子晶体光纤色散特性的研究更受人们关注^[7-10]。

已有的研究主要集中在孔间距 Λ 和空气占空比 d/Λ (d 为空气孔直径) 对 PCF 色散的影响方面。作者采用有限元法, 通过对靠近纤芯区域的第1层、第2层和第3层空气孔的直径进行调节, 研究 PCF 的色散特性。

作者简介: 詹仪 (1970-), 女, 博士, 现从事光子晶体光纤方面的研究。

E-mail: zhanyi246@126.com

收稿日期: 2007-12-26; 收到修改稿日期: 2008-02-28

1 有限元法及色散

有限元法把截面是任意形状, 空气孔任意排列, 材料折射率任意组合的光子晶体光纤划分出许多网格, 可以同时求出所有模式的传播常数和模场分布。从 Maxwell 方程出发能够得到光子晶体光纤所遵循的本征值方程:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \times \mathbf{H} \right) = \left(\frac{\omega}{c} \right) \mu_r \mathbf{H} \quad (1)$$

式中, ∇ 为哈密顿算符, $\mathbf{H} = H(x, y) \exp(-j\beta z)$ 是磁场强度, ϵ_r, μ_r 分别是介质的相对介电常数和相对磁导率; c 为真空中光速, ω 为光波角频率, β 为传输常数, z 为介质的纵向长度。

利用有限元方法计算光子晶体光纤光传输特性时, 首先建立理论模型, 输入截面几何结构, 再设定入射波长和材料参量, 采用相应边界条件, 就可以计算出模场分布图及基模有效传输常数 β 。

光子晶体光纤的色散主要是材料色散和波导色散, 相对较小的由相对折射率差随波长变化而引起的剖面色散可以忽略。光纤的色散系数 D 定义为:

$$D(\lambda) = - \frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \lambda^2} \quad (2)$$

式中, n_{eff} 为导模的模式折射率, 即 $n_{\text{eff}} = \beta[\lambda, n_m(\lambda)]/k_0$, k_0 为自由空间的波数, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为信号的波长; n_m 为光纤材料的折射率, 它是波长的函数。不考虑材料色散时, 即 $n_m(\lambda)$ 为常数, 就可以得到光纤的波导色散。把(2)式中的 $n_{\text{eff}}[\lambda, n_m(\lambda)]$ 换为 $n_m(\lambda)$, 就得到了光波导的材料色散 D_m 的计算公式。

在实际应用中, 为了便于色散设计, 通常将总的色散 $D(\lambda)$ 写成材料色散 $D_m(\lambda)$ 与波导色散 $D_w(\lambda)$ 的代数和:

$$D(\lambda) = D_m(\lambda) + D_w(\lambda) \quad (3)$$

当 $D_m(\lambda) + D_w(\lambda) = 0$ 时, 得到满足特定的零色散波长, 光纤的色散为 0。选定介质之后, 材料色散就不再变化, 因此光纤色散的设计主要在于波导色散的调节。

2 数值模拟与结果分析

光子晶体光纤横截面如图 1 所示。其基质为石

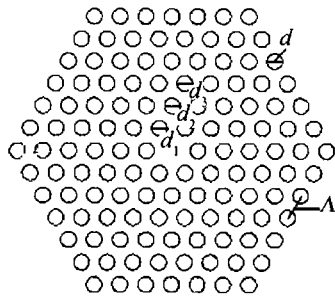


Fig. 1 Cross section of the triangular PCF

英, 空气孔的直径为 $d = 0.69\mu\text{m}$, 相邻两空气孔中心间距 $\Lambda = 2.3\mu\text{m}$ 。第 1 层、第 2 层和第 3 层空气孔的直径为 d_1, d_2 和 d_3 。

首先只改变第 1 层的空气孔直径 d_1 , 孔间距 Λ 和其它层的空气孔直径 d 保持不变, 波导色散及总色散与波长的关系如图 2 所示。由图 2a 可知, 当 d_1/d 从

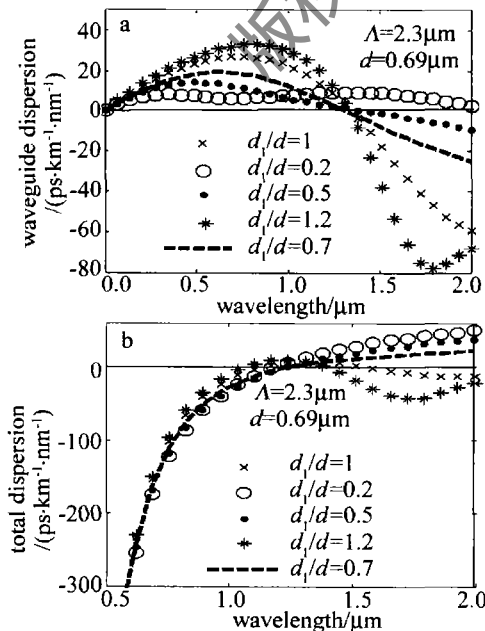
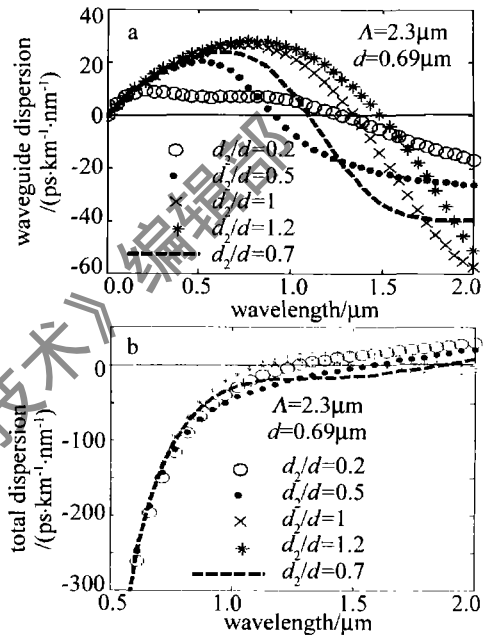


Fig. 2 Waveguide dispersion and total dispersion parameter of the PCF

0.2 增加到 1.2 时, 在正常和反常色散区, 波导色散的数值随之增加。从图 2b 可看出, d_1/d 的值在 0.2 ~ 1 范围内变化时, 色散值随 d_1/d 的增加而减小。当 $d_1/d = 1$ 和 1.2 时, 总色散在 1300nm 两侧均有一色散零点, 并且 $d_1/d = 1.2$ 时, 在 1550nm 处, 出现最低负色散点。从图 2b 和(3)式可以看出, 调节 d_1/d 的值, 可以使零色散点随着 d_1 的增加向短波长方向平移。

图 3 中给出了当第 2 层空气孔直径 d_2 变化时, 孔间距 Λ 和其它层空气孔的直径 d 保持不变, 波导色散和总色散的曲线。由图 3a 知, 在反常色散区, 波导色



散的数值随 d_2/d 增加而增加。在正常色散区, 当 d_2/d 在 0.2 ~ 0.7 范围内变化时, 波导色散的值随着 d_2/d 的减小而减小; 当 d_2/d 在 0.7 ~ 1.2 范围内变化时, 波导色散的值随着 d_2/d 的增加而减小。无论 d_2/d 怎样变化, 波导色散都有一个负色散值, 可以使总色散数值变小。从图 3b 可以看出, 当 $d_2/d = 1.2$ 和 $d_2/d = 1$ 时, 总的色散在 1300nm 两侧均有一色散零点。当 $d_2/d = 1.2$ 时, 长波长波段, 零色散点至 1800nm 处, 随着 d_2/d 的变化, 零色散点在 1100nm ~ 1800nm 之间可以任意移动, 与 d_1 的变化不同, d_2 的变化不改变纤芯区域的面积。由图 3b 还可以看出, $d_2/d = 1.2$ 和 $d_2/d = 0.7$ 两条曲线分布在零色散直线两侧, 色散值相差较小。

孔间距 Λ 和其它层的空气孔直径 d 保持不变, 第 3 层空气孔直径 d_3 的变化对波导色散和总色散的影响如图 4 所示。由图 4 可以看出, 波导色散和总的色散变化趋势与图 3 相同, 当 $d_3/d = 0.5$ 时, 色散曲线不规则。与图 3b 相比, $d_3/d = 1.2$ 总色散值变化较小; $d_3/d < 1$ 时, 总色散值变化较大。

由以上分析可知, 利用波导色散与结构参量间的

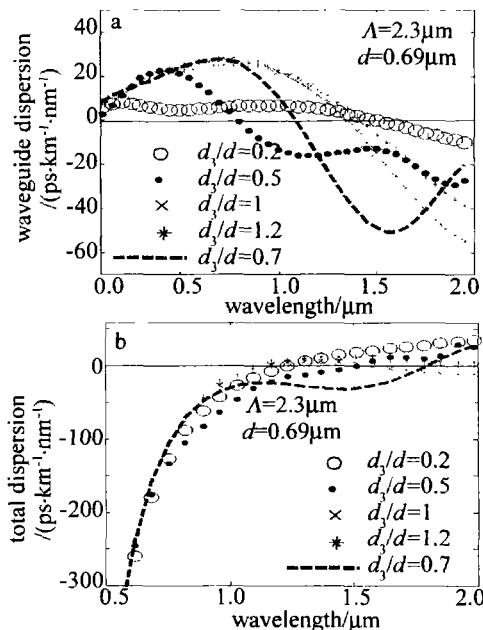


Fig. 4 Waveguide dispersion and total dispersion parameter of the PCF 关系,通过调节结构参量 d_1, d_2, d_3 可以调整零色散点的位置,将零色散点移到 $1100\text{nm} \sim 1800\text{nm}$ 间的任何位置上。但是,在很宽的波长范围内要实现低色散和平坦色散光纤,必须同时调节 d_1, d_2 和 d_3 的值。

根据以上分析, $d_2/d = 1.2$ 和 $d_2/d = 0.7$ 两条曲线分布在零色散直线两侧,总色散值相差较小,并且 $d_3/d = 1.2$ 的变化趋势与 $d_2/d = 1.2$ 变化趋势相同。因此,可以使 $d_3/d = 1.2$ 左右, $d_2/d = 0.7$ 左右,适当减小 d_1/d 的值加以补偿,可以获得低色散和平坦色散的光子晶体光纤。图 5 中给出了当 $d_1/d = 0.87, d_2/d = 0.64$ 和 $d_3/d = 1.2$ 时的总色散曲线。由图 5 可以看

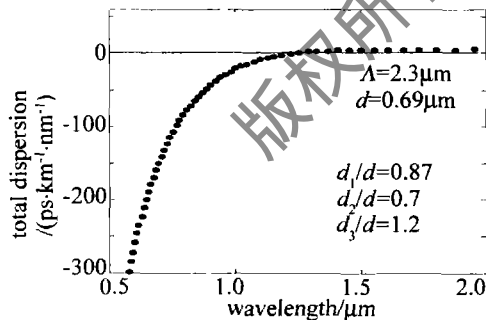


Fig. 5 Total dispersion parameter of the PCF

出,总色散在 $1270\text{nm} \sim 1800\text{nm}$ 波长范围内保持近零色散值和平坦色散。

3 结论

研究了波导色散和总色散与光子晶体光纤的第 1 层、第 2 层和第 3 层的空气孔直径的变化关系,分析发现,改变第 1 层、第 2 层和第 3 层空气孔直径,可以调节零色散点的位置,使零色散点在 $1100\text{nm} \sim 1800\text{nm}$ 间的任何位置上移到。通过对 d_1, d_2, d_3 的适当选择还可以在 $1200\text{nm} \sim 1800\text{nm}$ 波长范围内实现低色散和平坦色散光纤。作者的计算和分析可为光子晶体光纤的设计提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P St J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(9): 1547-1549.
- [2] BIRKS T A, KNIGHT J C, RUSSELL P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(13): 961-963.
- [3] MOGILEVTSOV D, BBIKS T A, RUSSELL P St J. Group-velocity dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Opt Lett*, 1998, 23(21): 1662-1664.
- [4] BRODERICK N G R, MONRO T M, BENNETT P J, *et al.* Nonlinearity in holey optical fibers; measurement and future opportunities [J]. *Opt Lett*, 1999, 24(20): 1395-1397.
- [5] MANGAN B G. Experimental study of dual-core photonic crystal fiber [J]. *Electron Lett*, 2000, 36(6): 1358-1360.
- [6] CHAMPERT P A, POPOV S V, TAYLOR J K. Generation of multi-watt, broadband continua in holey fibers [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(2): 122-124.
- [7] WANG R X. Numerical study of initial chirp compensating for fiber dispersion function [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(1): 109-112 (in Chinese).
- [8] CUCINOTTA A, POLI F, SELLERI S, *et al.* Amplification properties of Er^{3+} -doped photonic crystal fibers [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(3): 782-788.
- [9] SHEN L P, HUNAG W P, CHEN G X, *et al.* Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(4): 540-542.
- [10] ZHONG X Q, CHEN J G, LI D Y. Modulation instability in the decreasing dispersion fibers with quintic nonlinearity [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 27-30 (in Chinese).