

光子晶体光纤色散特性的多极法研究

杜海龙¹, 郑 义², 李 坤¹, 傅修远¹, 闫 昕^{1,3}

(1. 郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450052;

2. 北京交通大学理学院, 北京 100044; 3. 枣庄学院物理与电子工程系, 山东 枣庄 277160)

摘 要:应用多极法对折射率导模型光子晶体光纤的色散特性进行了数值模拟。与实验数据对比,验证了该计算方法的准确性。研究了结构参量孔径 d 、孔距 Λ 和包层空气孔层数 N_r 对光子晶体光纤色散特性的影响;分析表明,通过改变包层空气孔直径 d 或空气孔间距 Λ ,可使光子晶体光纤零色散波长移动;当包层空气孔层数 N_r 较小时, N_r 不同的各光纤色散特性差别极大;当 N_r 足够大时,将不再影响光子晶体光纤的色散特性。本文的计算和分析可以为设计适当色散特性的光子晶体光纤提供理论依据。

关键词:光子晶体光纤;色散;模式折射率;多极法

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A

Analysis of Dispersion Properties of Photonic Crystal Fibers by Multipole Method

DU Hai-long¹, ZHENG Yi², LI Kun¹, FU Xiu-yuan¹, YAN Xin^{1,3}

(1. Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electric Information Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052; 2. School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; 3. Department of Physics and Electron Engineering Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China)

Abstract: The dispersion characteristics of photonic crystal fibers (PCF) are simulated numerically by the multipole method. It is proved to be accurate contract with the experiment data. We have studied the effect of the structural parameters on dispersion properties such as hole diameter, pitch and the number of the hole rings. It shows that the zero-dispersion wavelength can be shifted by changing the pitch or hole diameter. When N_r is small, the dispersion properties of the photonic crystal fibers have large differentiation; but when N_r is larger the dispersion properties will no longer change. The calculation and the analysis provides a certain theoretical base with the design of photonic crystal fibers with desirable dispersion.

Key words: photonic crystal fiber; dispersion; mode refractive index; multipole method

1 引 言

光子晶体光纤^[1] (photonic crystal fiber, PCF) 又称为微结构光纤 (micro-structured optical fiber) 或多孔光纤 (holey fiber), 它由未掺杂的二氧化硅和空气孔构成, 其横截面是周期性排列的沿轴向均匀的圆空气孔, 在纤芯位置, 其周期性被破坏从而形成缺陷, 光就可以沿缺陷传播。按导模机制, 光子晶体光纤可以分为两类: 折射率导模型光子晶体光纤和光

子带隙导模型光子晶体光纤。折射率导模型光子晶体光纤作为一种结构特殊的新型光纤, 具有很多特殊的性质, 如无截止波长单模传输、在可见光和近红

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60478021) 资助。

作者简介: 杜海龙 (1983 -), 男, 郑州大学信息工程学院硕士研究生, 研究方向为光电信息处理与光通信。E-mail: duhailong9804@163.com

收稿日期: 2007-07-20; 修订日期: 2007-10-09

外波段具有反常色散和极强的非线性效应等。本文讨论的光子晶体光纤都属于折射率导模型光子晶体光纤,其横截面和结构参数如图1所示。

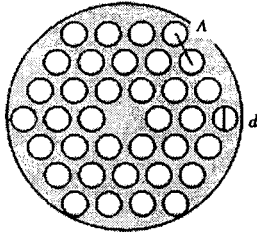


图1 光子晶体光纤横截面和结构参数示意图

在光通信中,色散是影响光纤传输的传输距离和传输性能的关键性因素。通过合理调节空气孔的尺寸和间距,光子晶体光纤表现出奇异的色散特性,因此具有在色散管理方面的独特优势。现在,利用光子晶体光纤的色散特性用作色散补偿^[2]、光孤子传输和产生^[3]和有源器件^[4]等正成为研究热点。

本文应用多极法对折射率导模型光子晶体光纤的色散特性进行了研究,分析了结构参量孔径 d 、孔距 Λ 等对其色散特性的影响,并着重分析了包层空气孔层数 N_r 对色散特性的影响。

2 理论模型

多极法是一种对 PCF 色散特性进行数值模拟的有效而快捷的方法,最早由 White 和 Kuhlmeiy 等提出^[5-7],可以获得很高精度的模式有效折射率和损耗等,进而计算出光子晶体光纤的模场分布、色散等。多极法与其他展开法类似,只是使用了更多的扩展项,每一项基于结构中的每一个空气孔,将每个元素的扩展结合起来得到各种模式,从而具有非常高的精度并且能够快速收敛。利用多极方法模场可以展开成柱函数(Bessel 函数)的形式^[8],在第1个空气孔的内部,其纵向电场可以在极坐标系下展开成:

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m^{(l)} J_m(k_{\perp}^i \cdot r_l) \exp(im\Phi_l) \exp(i\beta z) \quad (1)$$

在第1个空气孔近邻的介质中,其纵向电场可以表示成:

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [b_m^{(l)} J_m(k_{\perp}^e \cdot r_l) + c_m^{(l)} H_m(k_{\perp}^e \cdot r_l)] \cdot \exp(im\Phi_l) \exp(i\beta z) \quad (2)$$

其中, $k_{\perp}^i = (k_0^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}$; $k_{\perp}^e = (k_0^2 n_e^2 - \beta^2)^{1/2}$; 空气的折射率 $n_i = 1$; n_e 是石英折射率; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是自由

空间的波数;磁场分量 H_z 的表达式与此类似。

在空气孔的界面上利用电磁场的边界条件,可以得到关于 $a_m^{(l)}$, $b_m^{(l)}$ 和 $c_m^{(l)}$ 的表达式,在具体的运算中选取适当的 M ($-M \leq m \leq M$) 值,可以优化计算速度和精度,进一步通过 $\beta = n_{\text{eff}} k_0$ 求得模式折射率 n_{eff} 。通过模式有效折射率 n_{eff} 的实部可以求得色散系数:

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

3 数值模拟结果与分析

3.1 与实验数据对比

文献[9]中对参数为 $\Lambda = 2.3\mu\text{m}$, $d = 0.621\mu\text{m}$ 的光子晶体光纤的色散进行了测量,在 $\lambda = 813\text{nm}$ 处的测量值为 $-77.7\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,曲线斜率为 $0.464\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,文献[10]、[11]中采用有限元方法得到的计算结果分别为 $-77.3\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 和 $-78.6\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, $0.450\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$;我们采用多极法计算的结果为 $-76.9\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,曲线斜率为 $0.454\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,如图2中所示;考虑到包层空气孔的非标准圆和不均匀性,计算结果误差在文献[9]要求的范围之内,而且与实验测量值非常接近。可见,多极法的计算结果与实验结果以及基于矢量方程的有限元方法的计算结果吻合得很好,证明了此方法的准确性。

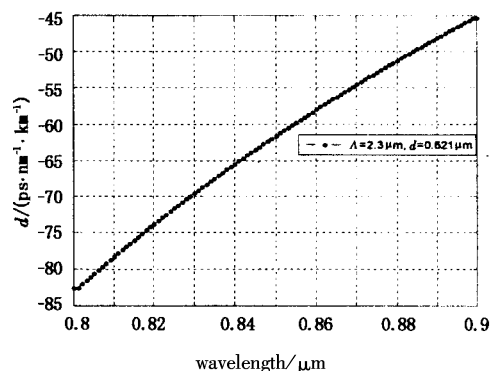


图2 多极法计算的 $\Lambda = 2.3\mu\text{m}$, $d = 0.621\mu\text{m}$ PCF 色散值

3.2 空气孔直径 d 、孔间距 Λ 对色散特性的影响

为了分析包层空气孔直径 d 和孔间距 Λ 对色散特性的影响,我们取包层空气孔层数为3,计算了两组数据。第一组孔间距 $\Lambda = 2.8\mu\text{m}$ 不变,孔直径 d 分别取0.5,0.7,0.9和1.4 μm ;第二组空气孔直径 $d = 1.15\mu\text{m}$ 不变,空气孔间距 Λ 分别为2.2,2.5,2.8和3.3 μm 。两组数据的计算结果分别如图

3 和图 4 所示。从图中可以看出,不管通过采取减小空气孔直径 d 还是增大包层空气孔间距 Λ 的方法,随着包层空气填充率的减小,都可以使光纤的零色散波长向长波方向移动,而且图 3 尤为明显,即保持包层空气孔间距不变,减小空气孔直径对零色散波长的影响更大。同样,可以通过增加包层空气孔填充率,特别是采取增大空气孔直径的方法可以将零色散波长向短波长移动。

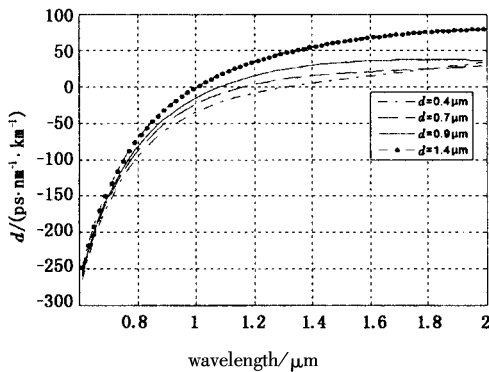


图 3 $\Lambda = 2.8 \mu\text{m}$,不同空气孔直径 d 对色散特性的影响

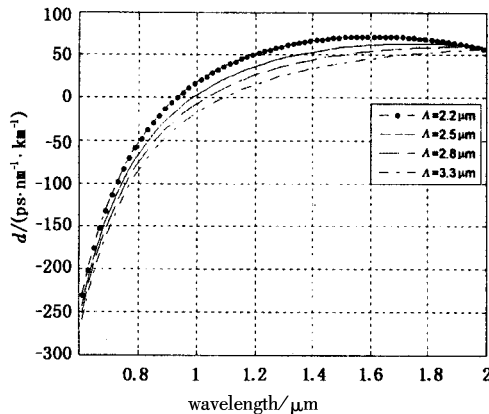


图 4 $d = 1.15 \mu\text{m}$,不同孔间距 Λ 对色散特性的影响

3.3 结构比例对色散特性的影响

令光子晶体光纤相对孔径 d/Λ 不变,即空气孔直径和孔间距等比例变化来分析结构比例对色散特性的影响。图 5 为空气孔直径 d 分别取 0.5, 0.7, 0.8 和 0.9 μm , 对应的孔间距 Λ 分别取 1.5, 2.1, 2.4 和 2.7 μm 的光子晶体光纤的数值模拟结果。从图中可以看出,虽然四种光纤的 d/Λ 是相等的,但是色散特性却随着间距 Λ 的不同有很大的区别。在 $\lambda > 1.1 \mu\text{m}$ 波长范围各光纤的色散特性既可以表现为正常色散也可以表现为反常色散。随着空气孔间距 Λ 的减小,如图 5 中 $\Lambda = 1.5 \mu\text{m}, d = 0.5 \mu\text{m}$ 的光子晶体光纤,色散可以在整个波长范围为负值,即在整个波长范围表现为正常色散,而且在光通信波

长范围内,色散比较平坦,因此此类光纤可用于波分复用系统的宽带色散补偿。

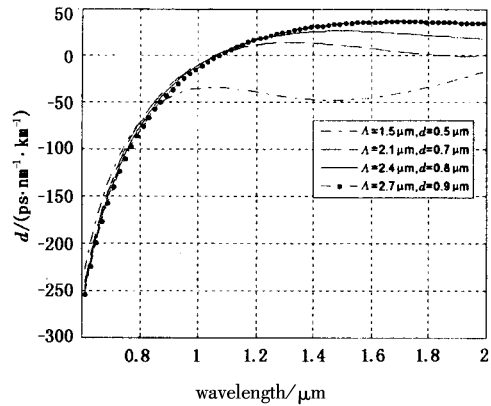


图 5 $d/\Lambda = 1/3$,不同的孔直径 d 和孔间距 Λ 对色散的影响

3.4 包层空气孔层数 N_c 对色散特性的影响

通过数值模拟,我们发现光子晶体光纤包层具有不同层数的空气孔时(如图 6 所示),其色散特性也有很大的区别。

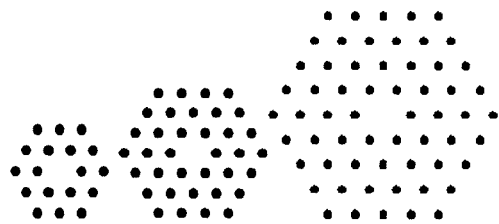


图 6 包层具有不同层数空气孔的光子晶体光纤截面图

图 7 和图 8 分别为 $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}, d = 0.28 \mu\text{m}$ 和 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}, d = 0.5 \mu\text{m}$ 的光子晶体光纤包层空气孔层数分别取 1, 2, 3, 4, 5 时的色散特性曲线。可以看出,各色散曲线先交叉然后又分开;包层空气孔层数 N_c 较小时,各色散曲线差别很大;随着 N_c 增大,差别逐渐减小,最终色散曲线趋于稳定。

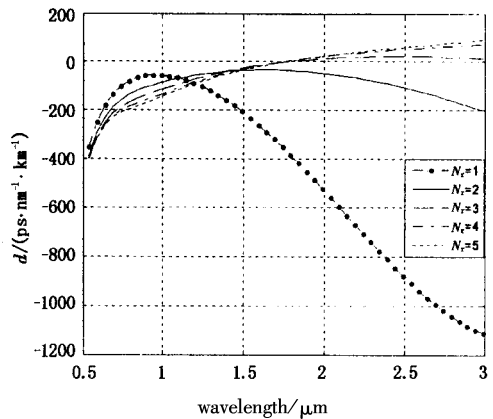


图 7 $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}, d = 0.28 \mu\text{m}$,包层空气孔层数不同的 PCF 色散曲线

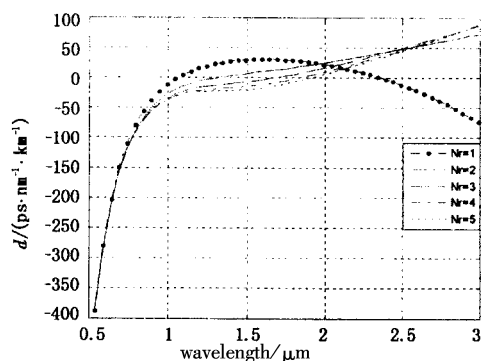


图8 $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$, $d = 0.5\mu\text{m}$, 包层空气孔层数不同的 PCF 色散曲线

图9为 $\Lambda = 1.0\mu\text{m}$, $d = 0.28\mu\text{m}$ 的 PCF 在 $\lambda = 1150\text{nm}$, 1310nm 和 1550nm 三波长处的色散值随着 N_r 的变化情况。从图中可以看出,随着 N_r 增大,三波长处 PCF 色散值是逐渐减小的,且最终将趋向于一稳定值。

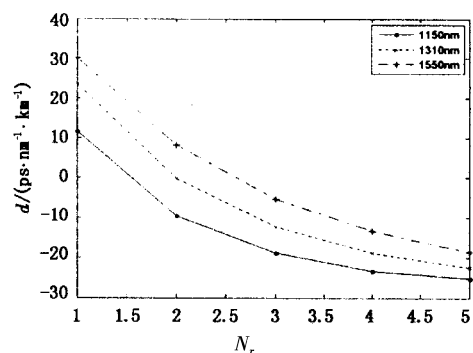


图9 $\Lambda = 1.0\mu\text{m}$, $d = 0.28\mu\text{m}$, 空气孔层数 N_r 不同的 PCF 在 $\lambda = 1150\text{nm}$, 1310nm 和 1550nm 处的色散趋势

图10为 $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$, $d = 0.5\mu\text{m}$ 的 PCF 在 $\lambda = 2100\text{nm}$, 2400nm 和 2700nm 处的色散趋势。同样可以看出,在长波长部分,随着包层空气孔层数增多,色散值是逐渐变大的,且最终色散也趋于稳定。

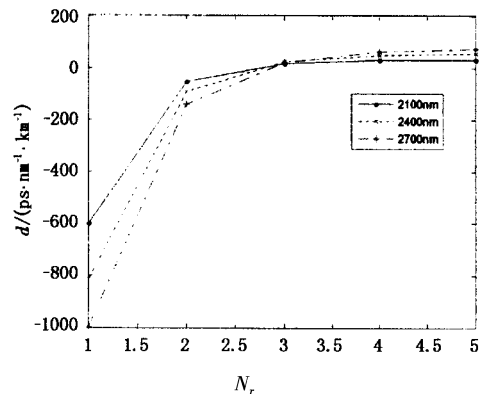


图10 $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$, $d = 0.5\mu\text{m}$, 空气孔层数 N_r 不同的 PCF 在 $\lambda = 2100\text{nm}$, 2400nm 和 2700nm 处的色散趋势

因此我们推理,当包层的空气孔层数 N_r 足够大时,光子晶体光纤的色散特性将不再随 N_r 而变化,

即包层空气孔层数将不再影响光子晶体光纤的色散特性。

4 结论

本文应用多极法对光子晶体光纤的基模色散特性进行了数值模拟。研究发现通过改变光子晶体光纤包层空气孔直径 d 或空气孔间距 Λ , 可使零色散波长向长波或短波方向移动;包层空气孔层数 N_r 同样对色散特性有很大的影响;当层数较少时,各光纤色散特性差别较大;当 N_r 足够大时, N_r 对色散特性将不再影响。数值计算表明,用多极法能够较准确地研究光子晶体光纤的色散特性,为设计具有适当色散特性的光子晶体光纤提供了理论计算依据。

参考文献:

- [1] J C Knight, T A Birks, P St J Russell, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. Opt. Lett., 1996, 21(19): 1547 - 1549.
- [2] Birk T A, Mogilevtsev D, Night J C, et al. Single material fibers for dispersion compensation [C]//OFC FG2 - 1 - FG2 - 3.
- [3] Wadsworth W J, Night J C, Ortigosa-Blanch A, et al. Soliton effects in photonic crystal fibers at 800 nm [J]. Electron. Lett., 2000, 36(1): 53 - 55.
- [4] Champert P A, Popov S V, Taylor J K, et al. Generation of multiwatt, broadband continua in holey fibers [J]. Opt. Lett., 2002, 27(2): 122 - 124.
- [5] White T P, Kuhlmeiy B T, McPhedran R C, et al. Multipole method for microstructured optical fiber formulation [J]. Opt. Soc. Am. B, 2002, 19(10): 2322 - 2330.
- [6] Kuhlmeiy B T, White T P, Ronsensez, et al. Multipole method for microstructured optical fibers, II. Implementation and results [J]. Opt. Soc. Am. P2000, 19(10): 2331 - 2340.
- [7] White T P, McPhedran R C, Botten L C, et al. Calculations of air-guided modes in photonic crystal fibers using the multipole method [J]. Optics Express, 2001, 9(13): 721 - 732.
- [8] Zhu Z M, Brown T G. Multipole analysis of hole-assisted optical fibers [J]. Opt. Commun., 2002, 206: 333 - 339.
- [9] M J Gander, R McBride, J D C Jones, et al. Experimental measurement of group velocity dispersion in photonic crystal fiber [J]. Electron. Lett., 1999, 35(1): 63 - 64.
- [10] M Koshiba. Full-vector analysis of photonic crystal fibers using the finite element method [J]. IEICE Trans. Electron., 2002, E852C(4): 881 - 888.
- [11] F Brechet, J, Marcou, D Pagnoux, et al. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers by the finite element method [J]. Opt. Fiber Technol., 2000, 6(2): 181 - 191.