

文章编号: 1001-3806(2009)03-0256-03

## 双芯光子晶体光纤的带隙及色散特性

徐旭明, 李 未, 方利广, 乐庸炉, 杨春云  
(南昌大学 物理系, 南昌 330031)

**摘要:** 为了研究双芯光子晶体光纤的带隙和色散特性, 采用平面波展开法计算了双芯光子晶体光纤的带隙特性, 当相对孔径  $d/\Lambda \geq 0.2$  时, 归一化传播常数  $\beta\Lambda$  的增大, 导致光子禁带宽度增加, 利用空气导光的工作波长范围越大。并采用全矢量模型分析了双芯 PCF 的色散特性, 得到了通过适当调整光纤的结构参量, 可以获得灵活的色散特性的结果。当孔距  $\Lambda = 2\mu\text{m}$ 、相对孔径  $d/\Lambda = 0.4$  时, 在波长  $1.55\mu\text{m}$  附近, 获得近  $480\text{nm}$  的超平坦色散区; 随着相对孔径和孔距的增大, 零色散点向短波长方向移动。这为制作高效传输光信号和高性能的保偏光纤提供了一个有效途径。

**关键词:** 光纤光学; 双芯光子晶体光纤; 光子带隙; 偏振色散

**中图分类号:** TN929.11; TN253 **文献标识码:** A

## Band gap and dispersion property of dual-core photonic crystal fibers

XU Xu-ming, LI Wei, FANG Li-guang, YUE Yong-lu, YANG Chun-yun  
(Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** In order to study the photonic band gap and dispersion property of a dual-core photonic crystal fiber (PCF), the photonic band gap was calculated with the plane-wave expansion method. The calculation results show that when the relative aperture ( $d/\Lambda$ ) is larger than 0.2, the normalized propagation constant ( $\beta\Lambda$ ) increases, so the prohibited band and the range of wavelength propagating in the air-core increase. Secondly, the dispersion property of a dual-core was analyzed with a full vector model. The results show that the dispersion property can be adjusted with different structure parameters of fibers. Results show about  $480\text{nm}$  of super flat dispersion area near  $1.55\mu\text{m}$  can be obtained with  $\Lambda = 2\mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.4$ ; with the relative aperture and aperture distance increasing, zero dispersion point will move to shorter-wave. The results of this study provide an effective way to produce efficient transmission optical fibers and high-performance polarization fibers.

**Key words:** fiber optics; dual-core photonic crystal fiber; photonic band gap; polarization dispersion

### 引 言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 一般由石英和空气孔构成, 且具有 2 维周期性介电常数分布<sup>[1]</sup>。光子晶体光纤又称为多孔光纤 (holey fiber, HF) 和微结构光纤 (microstructure fiber, MF), 根据其导光原理主要分为光子带隙 (photonic band gap, PBG) 光纤和折射率导光光纤<sup>[2-5]</sup>。与传统光纤相比, 光子晶体光纤拥有许多独特的性质<sup>[6-7]</sup>, 通过调整光纤的结构参量, 可以获得无尽单模特性、异常的色散特性、高双折射、大的有效面积单模运转和小有效面积高非线性

等。因此, 光子晶体光纤引起人们的广泛关注。

对双芯 PCF 带隙和色散特性的分析, 需要一个高效数值方法。作者首先采用平面波展开法分析了双芯光子晶体光纤的带隙特性, 然后用全矢量模型分析了双芯 PCF 的色散特性, 重点讨论了双芯 PCF 的结构参量对光纤色散特性的影响。结果表明, 这种光子晶体光纤在色散控制和光信号传输方面具有明显的优势。

### 1 基本理论与方法

#### 1.1 双芯光子晶体光纤光子带隙的理论

光子晶体光纤的带隙性质研究主要是通过平面波展开法。图 1 是双芯 PCF 的截面示意图, 在纯  $\text{SiO}_2$  材料中, 按三角结构沿轴向周期排列着圆空气柱, 在中心区, 沿  $x$  方向移去两个间接的空气柱, 形成一个双芯区, 构成了双芯光子晶体光纤。 $d$  为包层空气孔的孔径,  $\Lambda$  为孔距,  $d/\Lambda$  为相对孔径。

光子晶体光纤包层周期性结构所形成的光子带隙时, 只需考虑无自由电荷或石英介质材料和气孔构成

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目 (0612043; 2007GZW2547); 江西省教育厅重点资助项目 (赣教技字 [2006]15 号); 江西省科技攻关资助项目

作者简介: 徐旭明 (1964-), 男, 教授, 主要从事光与凝聚物质的相互作用的研究。

E-mail: ncxmxcn@ncu.edu.cn

收稿日期: 2008-04-01; 收到修改稿日期: 2008-05-06

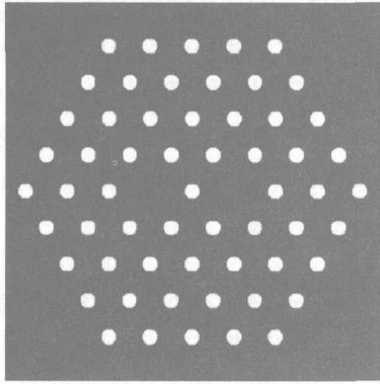


Fig. 1 Cross section of a dual-core photonic fiber

的光子晶体,根据麦克斯韦方程组得到电磁波的波动方程为:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \right] = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (2)$$

式中,  $c$  为真空中的光速。由于光子晶体的周期性,根据 Bloch 定理,在倒易空间晶格矢量  $\mathbf{G}$  的形式按傅里叶级数展开,可以得到本征方程:

$$\sum_{\mathbf{G}'} |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| |\mathbf{k} + \mathbf{G}| \epsilon^{-1}(\mathbf{G} + \mathbf{G}') \times \begin{bmatrix} \hat{e}_2 \cdot \hat{e}_2 & -\hat{e}_2 \cdot \hat{e}_1 \\ -\hat{e}_1 \cdot \hat{e}_2 & \hat{e}_1 \cdot \hat{e}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1' \\ h_2' \end{bmatrix} = \frac{\omega^2}{c^2} \begin{bmatrix} h_1' \\ h_2' \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{k}$  是波矢量,  $h_1, h_2$  是任意整数,  $\omega$  是角频率,在空芯 PBG 光子晶体光纤中通常用归一化传播常数  $\beta\Lambda$  用来表征纵向传播常数,因为空气纤芯中可能存在的模式有效折射率应该小于1,因此,在纤芯中导光必须

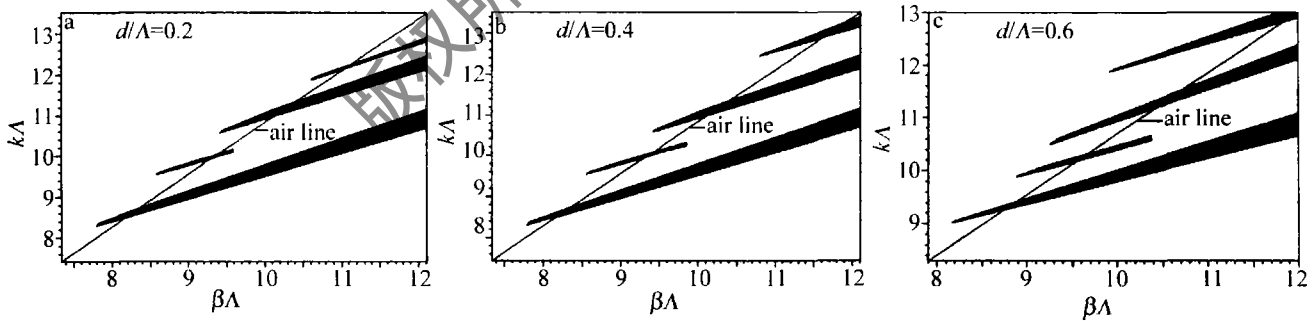


Fig. 2 Photonic band gap of PCF with periodicity of structure envelope

1,空气线下方  $n_{\text{eff}} > 1$ 。从带隙图中可以看出,随着  $d/\Lambda$  比值的增大,光子带隙逐渐变宽,而且向归一化频率较高的方向移动,这种带隙对于传导模式在双芯中传输特别有用。因为对于双芯带隙型光子晶体光纤,其传导模式对应于空气线上方的带隙,相应地在双芯中传导的模式有效折射率小于1且接近于1,即对带隙型 PCF 最有意义的是带隙图中空气线上方的部分。

满足  $\beta\Lambda \leq k\Lambda$  这个条件。

### 1.2 全矢量模型

由于纵向均匀的光波导,如果不考虑由于横向尺寸有限而导致的限制损耗和其它损耗,横向场  $e_i(x, y)$  可以分为  $x, y$  两个方向的偏振分量,它们分别满足矢量波动方程<sup>[8]</sup>:

$$(\nabla_{\perp}^2 - \beta^2 + k^2 n^2) e_x = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ e_y \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} + e_x \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \right] \quad (4)$$

$$(\nabla_{\perp}^2 - \beta^2 + k^2 n^2) e_y = -\frac{\partial}{\partial y} \left[ e_x \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} + e_y \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \right] \quad (5)$$

式中,  $n^2 = n^2(x, y)$  为横截面折射率分布,  $k = 2\pi/\lambda$  为真空波数,  $\beta$  为对应模式的传输常数。利用 PCF 中场的局域性的特点,用 Hermite-Gaussian 函数对横向电场  $e_x$  和  $e_y$  分别展开,可以得到本征方程:

$$L \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,交叠积分  $I^{(1)}, I^{(2)}, I^{(3)}, I^{(4)}$  可以写成解析形式。由此求解矢量波动方程转换成求解本征值问题。

### 2 光子带隙特性

在不同  $d/\Lambda$  参量条件下,计算了双芯 PBG 光子晶体光纤能带结构,对每一个归一化传播常数  $\beta\Lambda$ ,均有一个能带结构的归一化频率  $k\Lambda$  与之对应,带隙图中的空气线是  $\beta\Lambda = k\Lambda$  时的一条空气能带线,如图2所示。图中的空气线对应于  $\beta/k = 1$ ,空气线上方  $n_{\text{eff}} <$

### 3 色散特性

光纤中的总色散  $D$  主要包含波导色散  $D_w$  和材料色散  $D_m$  两部分<sup>[9]</sup>。由于采用的是纯石英材料,因此对于不同结构参量的 PCF,材料色散  $D_m$  相同,波导色散  $D_w$  可由下式得到:

$$D_w = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (7)$$

如图3所示,选择结构参量  $\Lambda = 2\mu\text{m}$ ,改变相对孔径,波导色散具有最大值和最小值,在波导色散单调减小的区域,色散的斜率保持近似相同。固定相对孔径  $d/\Lambda = 0.4$ ,改变孔距,波导色散随波长的变化如图4

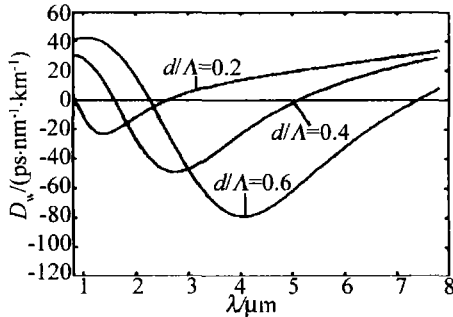


Fig. 3 Waveguide dispersion at different relative aperture

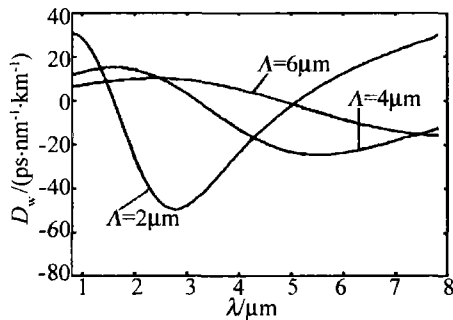


Fig. 4 Waveguide dispersion at different aperture distance

所示。在波导色散单调减小的区域,随着孔距的变化,色散的斜率将产生很大的变化,这种变化是源于 Maxwell 方程的比例不变性所决定的<sup>[10]</sup>。

考虑光纤的材料色散,得到总色散如图5和图6所示。在短波长端,相对孔径的变化对光纤的色散影

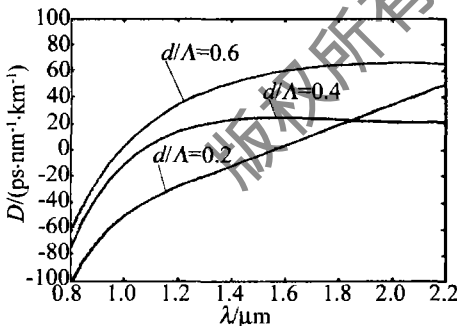


Fig. 5 Total dispersion at different relative aperture

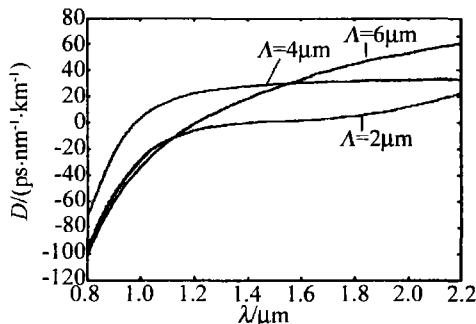


Fig. 6 Total dispersion at different aperture distance

响很小,因为模场被有效地限制在芯区,但随着波长的增加,越来越多的模场能量将向包层中渗透,对色散的影响将显现出来。在  $\Lambda = 2\mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.4$  时,在波长  $1.55\mu\text{m}$  附近,获得近  $480\text{nm}$  的超平坦色散区。随着相对孔径和孔距的增大,零色散点向短波长方向移动。

## 4 结论

通过以上分析可知,在双芯 PCF 中,随着  $d/\Lambda$  比值的增大,光子带隙逐渐变宽,而且向归一化频率较高的方向移动。同时,双芯光子晶体光纤具有灵活的色散特性,通过适当选择光纤的结构参量,可以获得正色散、负色散、零色散和超平坦色散特性。通过设计光纤的结构参量,还可以使双芯光子晶体光纤在要求的波长上实现高双折射和单模传输,为制作高效传输光信号和高性能的保偏光纤提供了一个有效途径,作者将对其进行下一步研究。

## 参考文献

- [1] KNIGHT J C, BIRKS T A, CREGAN R F, *et al.* Photonic crystals as optical fiber physics and applications [J]. *Optical Materials*, 1999, 11 (2/3): 143-151.
- [2] SINHA R K, VARSHNEY D. Dispersion properties of photonic crystal fiber: comparison by scalar and fully vectorial effective index methods [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2005, 37 (8): 711-722.
- [3] ALISTAIR D F, KENTARO F, TANYA M M, *et al.* Modeling the fabrication of hollow fibers: capillary drawing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19 (12): 1924-1931.
- [4] ZHOU G Y, HOU Zh Y, LI Sh G, *et al.* Mathematical mode for fabrication of micro-structure fibers [J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, 22 (5): 1162-1165.
- [5] FANG H, LOU Sh Q, REN G B, *et al.* Theoretical analysis on splice loss of photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26 (6): 806-811 (in Chinese).
- [6] WADSWORTH W J, KNIGHT J C, RUSSELL P S T J, *et al.* Soliton effects in photonic crystal fibers at  $800\text{nm}$  [J]. *Electron Lett*, 2000, 36 (1): 53-55.
- [7] FERRANDO A, SILVESTRE E. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Opt Lett*, 2000, 25 (12): 790-792.
- [8] SNYDER W. *Optical waveguide theory* [M]. New York: Chapman and Hall, 1983: 45-47.
- [9] HUANG J J, LI G, CHEN M, *et al.* Simulation dispersion properties of photonic crystal fiber [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (4): 432-425 (in Chinese).
- [10] JOANNOPOULOS J D, MEADE R D, WINN J N. *Photonic crystal: molding the flow of light* [M]. New York: Princeton University Press, 1995: 19-21.