

文章编号: 0253-2239(2009)06-1644-05

改进的八重准光子晶体光纤的色散特性研究

王艳梅 薛文瑞 张文梅

(山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

摘要 设计了一种改进的准光子晶体光纤,其包层由呈准八重周期分布的空气孔构成,其中靠近芯区的两层小空气孔的直径一致,第三层以外的大空气孔直径一致。采用带有良匹配层(APML)吸收边界的全矢量频域有限差分(FDFD)方法对其色散特性进行了数值分析,计算了孔间距取 $1.40 \sim 2.50 \mu\text{m}$,小空气孔直径取 $0.10 \sim 0.50 \mu\text{m}$,大空气孔直径取 $0.20 \sim 1.00 \mu\text{m}$ 的条件下这种光纤基模的色散曲线。结果表明,通过调节包层中两种不同尺寸的空气孔的大小以及孔间距这三个参数,可以得到不同水平的平坦色散曲线。

关键词 准光子晶体光纤(PQF); 色散; 频域有限差分(FDFD)方法

中图分类号 TN913.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1644

Dispersion Properties of Modified Octagon Photonic Quasicrystal Fibers

Wang Yanmei Xue Wenrui Zhang Wenmei

(College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract A modified photonic quasicrystal fiber is designed which has an octagon-fold symmetric quasicrystal array of air holes in the cladding. Small air-holes of the inner two rings and large air-holes of the outer rings in the cladding are adopted. The dispersion properties are analyzed by using the full vector finite-difference frequency-domain (FDFD) method with anisotropic perfect match layer (APML) absorbing boundaries. Its dispersion curve is calculated, when the distance between adjacent air holes is from $1.40 \mu\text{m}$ to $2.50 \mu\text{m}$, the small air-hole diameter is from $0.10 \mu\text{m}$ to $0.50 \mu\text{m}$ and the large air-hole diameter is from $0.20 \mu\text{m}$ to $1.00 \mu\text{m}$. The results show that the flattened dispersion at different levels can be obtained by adjusting the diameters of two kinds of air holes and the distance between adjacent holes in the cladding.

Key words photonic quasicrystal fibers (PQF); dispersion; finite-difference frequency-domain (FDFD) method

1 引言

早在 20 世纪 80 年代中期, D. Shechtman 等^[1]在检测急速冷却凝固的 Al-Mn 合金时,首次发现了准晶体结构。通过研究这种结构的对称性得知,其格点的排列是长程有序的,人们把它称为准晶体。这种结构很快就被应用到了光学领域,发明了准光子晶体。目前已经发现,准光子晶体可以产生一些独特的现象^[2~4],并得到了一些应用^[5~9]。准光子晶体光纤是把准光子晶体的概念引入光纤而构成的

一种光纤。

近几年,世界各国的许多研究小组都开展了近零超平坦色散光子晶体光纤(PCF)的研究。归纳起来,主要有三类:(1) 基于典型 PCF 结构而构造的近零超平坦色散 PCF^[10~12]: 包层中的空气孔直径都是完全一致的,可调整的参数相对来说比较少;(2) 基于复杂几何结构的近零超平坦色散 PCF^[13~19]: 包层中的空气孔直径是不完全一致的,存在一定的变化,可调整的参数较多,可以达到近零

收稿日期: 2008-07-07; **收到修改稿日期**: 2008-10-28

基金项目: 山西省自然科学基金(20041036)资助项目。

作者简介: 王艳梅(1983—),女,硕士研究生,主要从事光纤光学和光子晶体光纤方面的研究。

E-mail: wangfan01983@163.com

导师简介: 薛文瑞(1967—),男,教授,硕士生导师,主要从事导波光学、光纤光学和光子晶体光纤方面的研究。

E-mail: wrxue@sxu.edu.cn (通信联系人)

超平坦色散的目的；(3) 填充液体材料的近零超平坦色散 PCF^[20]：通过在空气洞中填充液体材料，改变 PCF 局部的折射率，从而灵活地调整 PCF 的色散特性，也可以达到近零超平坦色散的目的。虽然上述三类 PCF 能够得到较理想的近零超平坦色散，但是准光子晶体光纤(PQF)的出现，还是引起了研究者们兴趣。2007 年，S. Kim 等^[21]设计了一种准六重对称性的光子晶体光纤，通过计算，发现这种准光子晶体光纤的无限单模的截止频率较高，近零超平坦色散波长范围较宽，且色散值较小。因为这种准光子晶体光纤的包层中采用了单一直径的空气孔，所以空气孔的直径的改变量必须要精确到 0.01 μm 才能得到超平坦色散。

本文将渐变包层空气孔的思想^[12,22,23]引入准八重对称性光子晶体光纤，设计了一种改进的准八重对称性光子晶体光纤，通过改变这种准光子晶体光纤包层中空气孔的大小、间距等参数，在光通信窗口 1.45~1.65 μm 波段范围内得到超平坦色散。

2 结构模型与计算方法

准光子晶体光纤结构如图 1(a)所示，它的包层由变化的呈准八重对称性周期结构的空气孔构成。该光纤的包层由两种不同尺寸的空气孔构成，靠近

芯区的两层小空气孔的直径一致，第三层以外全部的大空气孔的直径一致。这些空气孔呈准八重对称性周期状排列，长程有序。图 1(a)中 Λ 表示包层空气孔间距， d_1 表示靠近芯区最内两层小空气孔的直径， d_2 表示包层中第三层以外大空气孔的直径。图 1(b)为该光纤横截面的单元晶胞的示意图，它由边长为 Λ 正方形和锐角为 45°的菱形组合而成的。从图中可以看出空气孔的间距并不是单一的值。把边长标记为孔间距 Λ ，也就是说空气孔的间距就是指 Λ 。虽然该准晶结构不再有平移对称性，但仍有转动对称性，他们的光子能隙在 S 波射入时是与入射方向无关的。而且由于准晶的每个格点都起着不完全相同的作用，因此它的缺陷模式十分丰富，这对于光子晶体共振腔的形成有利。从实用的角度来看，准晶光子晶体格点的排列有序度的要求也降低了^[24]。由于包层中靠近芯区的两层采用了小空气孔，所以在短波长范围内，导模被很好地束缚在芯区，有效模面积较小，色散特性主要受内层空气孔的影响，而在长波长范围内，导模不仅分布在芯区，而且会向外扩展，有效模面积增大，所以色散特性不仅受内层空气孔影响，也受外层空气孔的影响，因此渐变空气孔的设置就为产生一定波长范围内的平坦色散提供了可能性。

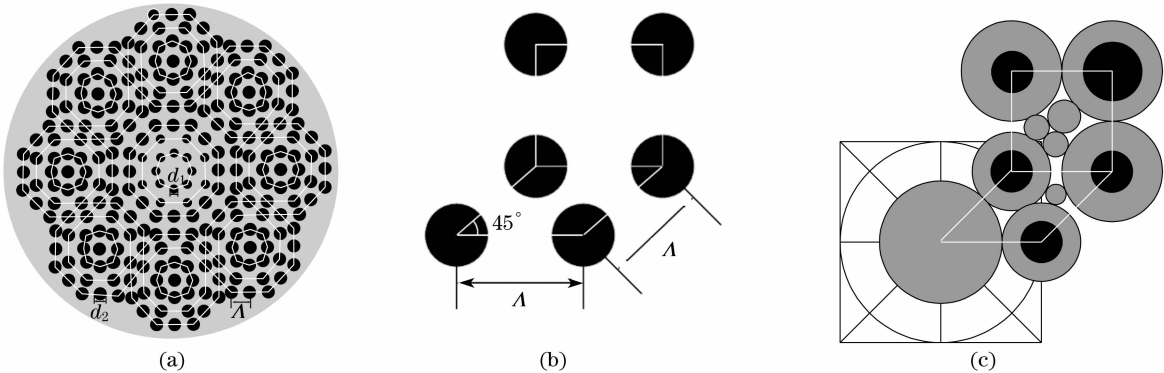


图 1 (a)改进的八重对称性准光子晶体光纤的横截面示意图。(b)八重准光子晶体光纤横截

面中的单元晶胞,(c)预制棒排列中的单元晶胞

八重准光子晶体光纤也可以采用肉眼可见的预制玻璃棒拉制而成，原理如下：
由于八重准周期格子是由正方形和锐角为 45°的菱形组合而成的，所以八重准周期格子的预制玻璃棒可以按图 1(c)示意图来排列。这里，采用了具有不同外径和内径的多种规格的预制玻璃毛细管和实心预制玻璃棒，其中直径较大的实心预制玻璃棒

用来形成整个光纤的芯区，直径较小的实心预制玻璃棒用来填充空隙。多次复制这种石英毛细管的排列，采用拉丝的方法^[25,26]，便可拉制出符合要求的八重准光子晶体光纤。
这里所采用的全矢量的压缩的二维频域有限差分(FDFD)方法^[27~29]是一种简单有效的数值计算方法，它从麦克斯韦方程出发，假设沿 z 方向的传播

常数是 β ,每个场分量用 $\phi(x,y,z)=\phi(x,y)\exp(j\beta z)$ 来表示,其中 ϕ 代表任意场分量。依据有限差分原理,可以得到一个矩阵本征值方程

$$\begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} \\ Q_{yx} & Q_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 Q_{ij} 为系数矩阵元, H_x 和 H_y 分别磁场的 x 分量和 y 分量。给定光纤的几何参数、电磁参数和工作波长,通过解本征值方程(1)就能够得到在该工作波长下的传播常数 β 、有效模折射率 n_{eff} 和每个模式在横截面内的磁场分布。这个本征值问题可以由Arnoldi算法^[30]来解决,该算法能够有效地处理大型复系数稀疏矩阵本征值问题。这里采用 601×601 层的网格点来离散整个计算区域,其中20层是用来截断网格的各向异性良匹配层(APML)。空间离散步长为 $\Delta x=\Delta y=0.05\text{ }\mu\text{m}$ 。

光纤的波导色散 D 由下式^[31]给出

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

其中 c 为真空中的光速,Re代表实部, n_{eff} 为有效模折射率。材料色散可由塞耳迈耶尔方程^[32]给出。光纤的总色散等于波导色散和材料色散之和。全矢量压缩的二维频域有限差分FORTRAN程序已经在前期的工作中^[33~36]得到了验证和应用。

3 结果与讨论

为了搞清楚这种准光子晶体光纤的色散特性,进行了大量的计算来寻找各个参数对色散特性的影响。计算中,孔间距 Λ 的取值范围为 $1.40\sim 2.50\text{ }\mu\text{m}$,小空气孔直径 d_1 的取值范围为 $0.10\sim 0.50\text{ }\mu\text{m}$,大空气孔直径 d_2 的取值范围为 $0.20\sim 1.00\text{ }\mu\text{m}$,工作波长 λ 的取值范围为 $1.45\sim 1.65\text{ }\mu\text{m}$ 。

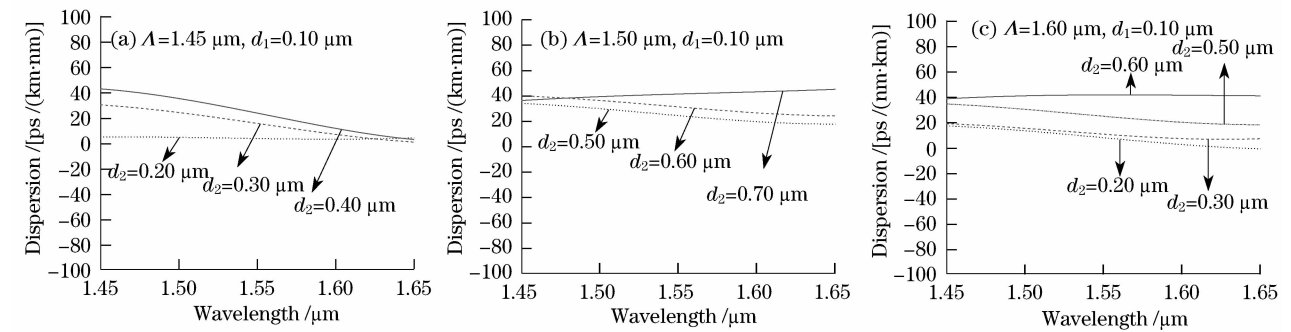


图 3 固定孔间距 Λ 和小空气孔直径 d_1 ,改变大空气孔直径 d_2 的条件下,光纤的色散值随波长的变化关系
 Fig. 3 Dependence of the dispersion of the fiber on the wavelength with different the large air-hole diameter d_2

图 3 是在固定孔间距 Λ 和内层小空气孔 d_1 ,改变外层大空气孔直径 d_2 的条件下,光纤的色散值与

首先,固定孔间距 Λ 及大空气孔直径 d_2 的大小,考察靠近芯区两层小空气孔直径 d_1 的大小对该八重准光子晶体光纤色散特性的影响规律,计算结果如图 2 所示。

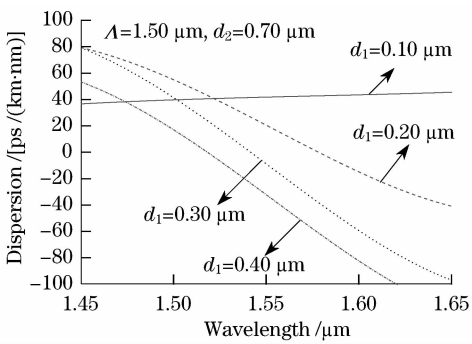


图 2 固定孔间距 Λ 和大空气孔直径 d_2 ,改变小空气孔直径 d_1 的条件下,光纤的色散值随波长的变化关系

Fig. 2 Dependence of the fiber dispersion on the wavelength with different small air-hole diameter d_1

图 2 所示为内层小空气孔 d_1 的大小对该光纤的色散特性的影响规律。其中孔间距 Λ 的取值为 $1.50\text{ }\mu\text{m}$,外层大空气孔直径 d_2 的取值为 $0.70\text{ }\mu\text{m}$,最内两层小空气孔直径 d_1 取值从 $0.10\text{ }\mu\text{m}$ 到 $0.40\text{ }\mu\text{m}$ 。从图中可以看出,在光通信窗口 $1.45\sim 1.65\text{ }\mu\text{m}$ 波段范围内,当内层小空气孔 d_1 取值 $0.10\text{ }\mu\text{m}$ 时,色散曲线比较平坦,此后随着 d_1 的增大色散曲线的走势越来越陡,且在长波段范围变化较明显。这意味着内层小空气孔的大小严重影响着该光纤的色散特性。

针对固定孔间距 Λ 及最内两层小空气孔直径 d_1 的条件下,外层大空气孔直径 d_2 的大小对该光纤的色散特性的影响规律,分别选取了三组计算结果,如图 3 所示。

波长的依赖关系图。其中孔间距 Λ 取值分别为 $1.45\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.50\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.60\text{ }\mu\text{m}$ 。从图中可以看到,

在光通信窗口 1.45 ~1.65 μm 波段范围内,图3(a)中随着外层大空气孔直径 d_2 的减小,该光纤的色散曲线的位置下移,并且这种下移倾向在短波段范围内比较明显。图 3(b)和(c)中随着外层大空气孔直径 d_2 的减小,该光纤的色散曲线的位置也下移,但这种下移倾向是在长波段范围内比较明显。当孔间距 Λ 取值 1.45 μm ,内层小空气孔 d_1 取值 0.10 μm ,外层大空气孔直径 d_2 取值为 0.20 μm 时,得到了一条平坦色散曲线,其色散值可以控制在 $3.70 \pm 0.89 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 的范围。

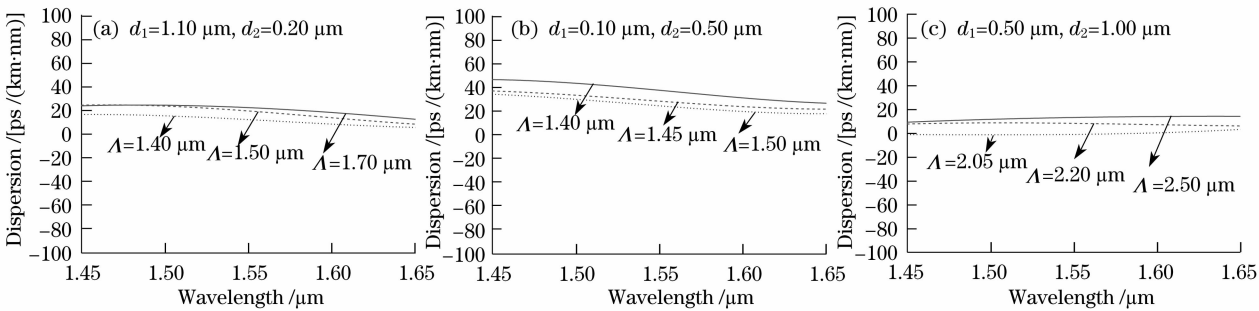


图 4 固定大小空气孔直径,改变孔间距 Λ 条件下,光纤的色散值随波长的变化关系

Fig. 4 Dependence of the fiber dispersion on the wavelength with different distance between adjacent air holes

从以上的计算结果能够看出,由于这种准光子晶体光纤的包层中采用了两种不同直径的空气孔,即在靠近芯区的两圈空气孔采用了小直径空气孔的结构,所以空气孔的直径的改变量只要精确到 0.05 μm 就能得到超平坦色散。通过调节 d_1 、 d_2 和 Λ 这三个参数,可以在光通信窗口 1.45 ~1.65 μm 波长范围内获得色散值较小的超平坦色散。相比较而言,该光纤的色散曲线的走势对小空气孔 d_1 这个参数的敏感性最强。

4 结 论

设计了一种改进的准光子晶体光纤,其包层由呈准周期结构的大小两种空气孔构成。采用带有良匹配层(APML)吸收边界的全矢量频域有限差分(FDFD)方法对其色散特性进行了数值分析。分别计算了孔间距取 1.40 ~2.50 μm ,小空气孔直径取 0.10 ~0.50 μm ,大空气孔直径取 0.20 ~1.00 μm 的色散值。通过调节包层中两种不同尺寸的空气孔的大小以及孔间距这三个参数,可以得到不同水平的平坦色散曲线。当孔间距 Λ 取值 1.45 μm ,内层小空气孔 d_1 取 0.10 μm ,外层大空气孔直径 d_2 取 0.20 μm 时,在波段范围 1.45 ~1.65 μm 内得到了一条平坦色散曲线。当孔间距 Λ 取 2.05 μm ,内层小空气孔 d_1 取 0.50 μm ,外层大空气孔直径 d_2 取

图 4 是在固定大小空气孔的条件下,通过改变孔间距的大小,得到的该光纤的色散值与波长的关系图。从图中可以看到,在光通信窗口 1.45 ~1.65 μm 波段范围内,图 4(a)和图 4(c)中当包层大小空气孔固定时,随着孔间距 Λ 的增大,该光纤的色散曲线位置上移。图 4(b)中该光纤的色散曲线的位置随着孔间距 Λ 的增大而下移。当孔间距 Λ 取值 2.05 μm ,内层小空气孔 d_1 取值 0.50 μm ,外层大空气孔直径 d_2 取值 1.00 μm 时,可以得到一条平坦色散曲线,其色散值可以控制在 $0.95 \pm 2.26 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 的范围。

1.00 μm 时,同样在波段范围 1.45 ~1.65 μm 内也得到了平坦色散曲线。通过计算发现该光纤的色散曲线的走势对小空气孔 d_1 这个参数的敏感性最强。这些工作将对于准八重对称性光子晶体光纤的设计、制作和应用等具有一定的参考价值。

参 考 文 献

1 D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias *et al.*. Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984,**53**(20): 1951~1953
2 M. E. Zoorob, M. D. B. Chariton, G. J. Parker *et al.*. Complete photonic bandgaps in 12-fold symmetric quasicrystals [J]. *Nature*, 2000, **400**:740~743
3 B. Freedman, G. Bartal, M. Segev *et al.*. Wave and defect dynamics in nonlinear photonic quasicrystals[J]. *Nature*, 2006, **440**:1166~1169
4 Su Yucheng, Feng Shuai, Yang Yuping *et al.*. The distribution of density of photonic states in quasiperiodic photonic crystal[J]. *Journal of the CUN (Natural Sciences Edition)*, 2007,**16**(1): 42~46
苏玉成,冯 帅,杨玉平等. 准周期光子晶体的态密度[J]. 中央民族大学学报(自然科学版),2007,**16**(1):42~46
5 Y. S. Chan, C. T. Chan,Z. Y. Liu. Photonic band gaps in two dimensional photonic quasicrystals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**: 956~959
6 C. Jin, B. Cheng, B. Man *et al.*. Band gap and wave guiding effect in a quasiperiodic photonic crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**: 1848~1850
7 K. Nozaki, T. Baba. Quasiperiodic potonic crystal microcavity lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**: 4875~4877
8 S. K. Kim, J. H. Lee, S. H. Kim *et al.*. Photonic quasicrystal single-cell cavity mode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**:

031101-3

- 9 P. T. Lee, T. Q. Lu, F. M. Tsai *et al.*. Whispering gallery mode of modified octagonal quasiperiodic photonic crystal single-defect microcavity and its side-mode reduction[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**: 201104-3
- 10 A. Ferrando, E. Silvestre, J. J. Miret *et al.*. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11):790~792
- 11 A. Ferrando, E. Silvestre, P. Andrés *et al.*. Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2001, **9**(13): 687~697
- 12 W. H. Reeves, J. C. Knight, P. S. J. Russell *et al.*. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(14):609~613
- 13 K. Saitoh, M. Koshiba, T. Hasegawa *et al.*. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(8):843~852
- 14 T. L. Wu, C. H. Chao. A novel ultraflattened dispersion photonic crystal fiber[J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1):67~69
- 15 Jingyuan Wang, Mingyi Gao, Chun Jiang *et al.*. Design and parametric amplification analysis of dispersion-flat photonic crystal fibers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7):380~382
- 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. Exp.*, 2005, **13**(21): 8365~8371
- 17 S. G. Li, X. D. Liu, L. T. Hou. Numerical simulation and analysis on photonic crystal fibers with closing to zero and flattened chromatic dispersion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):713~717
李曙光,刘晓东,侯蓝田. 接近于零色散的色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):713~717
- 18 Wang Zihan, Wang Qingyue, Li yanfeng *et al.*. Calculation and design of photonic crystal fibers with broadband flattened dispersion property around $1.55\ \mu\text{m}$ [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2005, **16**(5):122~126
王子涵,王清月,栗岩峰等. $1.55\ \mu\text{m}$ 处具有宽带平坦色散的光子晶体光纤设计[J]. *光电子激光*, 2005, **16**(5):122~126
- 19 Liu Jie, Yang Changxi, Claire Gu *et al.*. A novel photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1569~1574
刘 洁,杨昌喜,Claire Gu 等. 一种新型高非线性色散平坦光子晶体光纤结构[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1569~1574
- 20 K. M. Gundu, M. Kolesik, J. V. Moloney *et al.*. Ultra-flattened-dispersion selectively liquid-filled photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(15):6870~6878
- 21 S. Kim, C. Kee, J. Lee. Novel optical properties of six-fold symmetric photonic quasicrystal fibers[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(20): 13221~13226
- 22 Wu Jinqing, Xue wenrui, Zhou Guosheng. Dispersion property analysis of square-lattice varying microstructured optical fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 174~178
武劲青,薛文瑞,周国生. 方形渐变微结构光纤的色散特性分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2):174~178
- 23 T. L. Wu, C. H. Chao. An efficient approach for calculating the dispersions of photonic-crystal fibers; design of the nearly zero ultra-flattened dispersion[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6): 2055~2061
- 24 Jin Chongjun, Cheng Bingying, Li Zhaolin *et al.*. Quasicrystal and non-quasicrystal photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2000, **17**(5): 432~433
金崇君,程丙英,李兆霖等. 准晶与非晶光子晶体[J]. *量子电子学报*, 2000, **17**(5):432~433
- 25 Huang Daizheng. Photonic crystal optical fiber[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2008, **3**:17~19
黄代政. 光子晶体光纤[J]. *科技创新导报*, 2008, **3**:17~19
- 26 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(19):1547~1549
- 27 Z. Zhu, T. G. Brown. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(17): 853~864
- 28 S. Guo, F. Wu, S. Albin. Loss and dispersion analysis of microstructured optical fibers by finite-difference method [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15):3341~3352
- 29 C. Yu, H. C. Chang. Yee-mesh-based finite difference eigenmode solver with PML absorbing boundary conditions for optical waveguides and photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25):6165~6177
- 30 <http://www.caam.rice.edu/software/ARPACK/>
- 31 F. Fogil, L. Saccomandi, P. Bassi. Full vectorial BPM modeling of index-guiding photonic crystal fibers and couplers[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(1): 54~59
- 32 K. Okamoto. *Fundamentals of Optical Waveguides* [M]. New York: Academic Press, 2000
- 33 Wu Yanrong, Guo Lixia, Xue Wenrui *et al.*. Photonic crystal fiber with single polarization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 593~597
武延荣,郭丽霞,薛文瑞等. 单偏振光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 593~597
- 34 Guo Lixia, Wu Yanrong, Xue Wenrui *et al.*. Dispersion properties of photonic crystal fiber with composite hexagonal air hole lattice[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 935~939
郭丽霞,武延荣,薛文瑞等. 复合六边形空气孔格点光子晶体光纤的色散特性分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 935~939
- 35 Wang Honghua, Xue Wenrui, Zhang Wenmei. Negative dispersion properties of photonic crystal fiber with dual core and composite lattice[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):27~30
王红华,薛文瑞,张文梅. 双芯复合格点光子晶体光纤的负色散特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):27~30
- 36 W. R. Xue, Y. N. Guo, P. Li *et al.*. Propagation properties of a surface plasmonic waveguide with double elliptical air cores[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14):16710~16720