

文章编号: 1001-3806(2012)01-0111-03

## 基于有限元光子晶体光纤的模场与色散分析

宋德君, 谢康, 肖峻\*

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

**摘要:** 为了获得超平坦色散特性, 且有较大的模场面积和较小的限制损耗, 从麦克斯韦方程组出发, 采用有限元法, 在考虑到纯石英材料自身色散的前提下, 进行了相应的理论分析, 计算得到了光子晶体光纤的模场分布、基模有效折射率和色散系数等参量关系, 可知光纤色散值的变化在  $\pm 1.0 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  以内, 模场面积都大于  $40 \mu\text{m}^2$ , 限制损耗小于  $0.2 \text{ dB/km}$ 。结果表明, 调节空气孔直径和包层空气孔间距的大小, 改变介质的填充比, 可以有效地控制光子晶体光纤的色散与模场面积。

**关键词:** 光学设计与制造; 光子晶体光纤; 色散; 有限元法; 色散平坦

中图分类号: O436.3 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.028

### Mode field and dispersion analysis of photonic crystal fiber based on finite element method

SONG De-jun, XIE Kang, XIAO Jun

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In order to obtain ultra-smooth dispersion characteristics, a large mode area and a smaller limitation loss, starting from the Maxwell equations, taking into account the dispersion of pure quartz themselves, the mode field distribution of the photonic crystal fibers, effective index of fundamental modes and dispersion coefficient were calculated with the finite element method. With the fiber dispersion within  $\pm 1.0 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ , the mode area was larger than  $40 \mu\text{m}^2$ , and the confinement loss was less than  $0.2 \text{ dB/km}$ . The results show that the dispersion and mode field area of photonic crystal fibers can be controlled by adjusting the air hole diameter, the pitch size of the cladding air holes, and the media filling ratio.

**Key words:** optical design and manufacturing; photonic crystal fiber; dispersion; finite element method; flat dispersion

### 引言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 又称作多孔光纤、微结构光纤, 最早是在 1992 年提出的<sup>[1]</sup>。它是一种带有线缺陷的 2 维光子晶体。光纤包层由规则分布的空气孔排列成六角形的微结构组成; 纤芯由石英或空气孔构成线缺陷, 利用其局域光的能力, 将光限制在纤芯中传播。光子晶体光纤按导光机制可以分为两种: 一种与传统导光原理类似的全内反射光子晶体光纤; 另一种是基于光子带隙导光原理的带隙型光子晶体光纤<sup>[2]</sup>。光子晶体光纤在色散补偿方面具有很大潜力, 在光通信系统中将发挥重要作用<sup>[3-5]</sup>。其设计的灵活性和具有一系列独特的光学特性, 成为了一个热门的研究课题而备受关注, 目前在很多领域中已

经得到了应用。

因为光子晶体光纤是由一种材料构成, 其纤芯和包层的折射率差值可以通过改变空气孔在包层中所占的比率来控制, 所以, 只要改变空气孔在光纤包层中的分布规律和几何尺寸, 就可以实现对色散、传输模式和偏振等特性的控制, 能够实现零色散短波推进、超平坦色散以及很高的负色散等等。对于正六边形圆形空气孔排列的光子晶体光纤而言, 要在较宽的波长范围内都具有较低的色散值且保持色散平坦仍然比较困难, 但通过对光子晶体光纤结构的改进和参量的优化设计, 选择适当的结构参量, 可使其满足这一要求。

光子晶体光纤常用的理论研究方法有: 有效折射率法 (effective index method, EIM)<sup>[6]</sup>、时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD)<sup>[7]</sup>、平面波法 (plane wave method, PWM)<sup>[8]</sup>、有限元法 (finite element method, FEM)<sup>[9]</sup> 等。有限元法能够适用于任意不规则形状的截面, 空气孔任意排布, 建模和计算过程也比较方便, 故本文中采用有限元法对全内反射光子晶体光纤进行模拟计算。

**作者简介:** 宋德君 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光子晶体光纤和光纤通信系统光纤放大器控制与监测技术。

\* 通讯联系人。E-mail: junxiao@uestc.edu.cn

收稿日期: 2011-03-31; 收到修改稿日期: 2011-04-21

### 1 有限元法计算原理

波动方程一类的偏微分方程,有限元法将其表征的连续函数所在的封闭场划分成有限个小区域,这些小区域通常为三角形,每个小区域用一个待定的近似函数来代替,于是整个场域的函数被离散化,由此获得一组近似的代数方程,并联立求解,以获得该场域中函数的近似数值。

文中采用全矢量有限元法对所设计的光子晶体光纤模型的色散特性、模场面积、双折射和限制损耗特性进行数值分析。在有限元法中,光纤截面被分成许多独立而相似的曲线混合边缘节点单元,对每一个单元求解离散的麦克斯韦方程,在单元的边界上加上理想电导或磁导条件便可计算任意光子晶体光纤的模式场。

图1为一个三角形边单元的结构,具有6个节点,1~3位于三角形的顶点, $H_{z1}, H_{z2}, H_{z3}$ 表示磁场的z轴向分量,4~6在三角形的边上, $H_{t1}, H_{t2}, H_{t3}$ 代表磁场的切向分量。

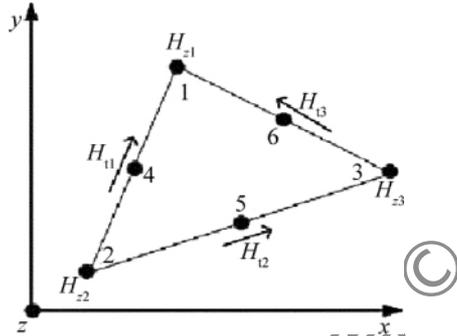


Fig. 1 Schematic diagram of a triangular element

光子晶体光纤横截面上不同部分的折射率不同,并且在界面上发生突变<sup>[10]</sup>,因此电矢量波动方程为:

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] E + n^2 (k_0^2 + k_z^2) E = 0 \quad (1)$$

写成对折射率不同的空气或者介质部分的齐次方程:

$$(\nabla_i^2 + k_0^2 n_i^2 - \beta) E = 0 \quad (2)$$

式中,下标*i*为区域编号,其中 $k_0$ 为真空中的波数, $n_i$ 为光子晶体光纤2维横截面上折射率分布, $\beta$ 为传播常数。在整个求解区域狄利克雷边界条件或诺埃曼边界条件下,最终得到下面的本征值矩阵方程:

$$([A] - \lambda^2 [B]) \{ \epsilon \} = 0 \quad (3)$$

式中  $\{A\} = \sum \{A_e\}$ ,  $\{B\} = \sum \{B_e\}$ ,  $\{ \epsilon \} = \sum \{ \epsilon_e \}$ 。

本征方程的本征值的求解可借助于数值方法,通过求解本征值和本征矢量,便可得到各阶模式的传输常数和相应的模场分布。

对于模场面积,可以通过求解有效模面积求得,有效模面积  $A_{eff}$  为:

$$A_{eff} = \frac{\left[ \iint_S E^2 dx dy \right]^2}{\iint_S E^4 dx dy} \quad (4)$$

式中, $S$ 是有效积分区域, $E^2$ 是光纤横截面的场强分布<sup>[11-12]</sup>。

### 2 模拟结果与分析

采用有限元法对所设计的光子晶体光纤的色散特性、模场面积、双折射和损耗特性进行数值模拟。将光子晶体光纤的包层气孔间距设计为  $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,空气孔层数为3层,光波长的范围取  $0.4 \mu\text{m} \sim 2.0 \mu\text{m}$ ,空气孔尺寸  $d/\Lambda$  分别为0.4, 0.5和0.6。

计算得到这种光纤的色散,如图2所示。图中自上而下曲线的  $d/\Lambda$  值依次为0.6, 0.5, 0.4和0.3。从图中可以看出,随着空气填充比的增加,零色散点明显向短波区移动,例如  $d/\Lambda = 0.5$  时,零色散点在  $0.9 \mu\text{m}$  附近。故可以改变结构参量,将光纤设计为在可见光区域具有大的反常波导色散,使得整个光纤的零色散点可以移至可见光波段。

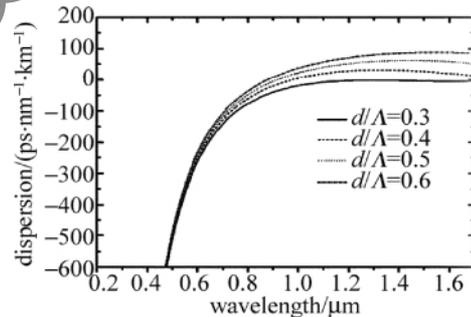


Fig. 2 Dispersion curve of photonic crystal fibers

由图3可以看出,特定结构的PCF的有效面积随波长的增加而增大。对于相同的结构参量 $\Lambda$ ,空气孔的相对大小  $d/\Lambda$  较波长对有效面积的影响更大。对于相同的波长,有效面积随孔径  $d$  的增大而减小。这是因为填充比增大,包层的有效折射率越低,包层和纤芯的折射率差就越大,这样纤芯对光场功能的束缚能力就越强,有效面积就越小。

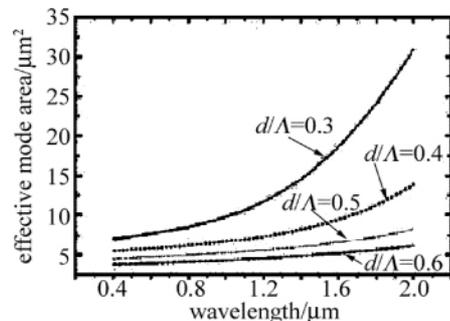


Fig. 3 Effective mode field area of photonic crystal fibers

有效模场面积随  $d/\Lambda$  增加而减小,光纤的芯径减

小,可以提高对光的局限,减小光的泄漏损耗;也可以增大纤芯截面上单位面积的光功率密度,易于产生各种非线性效应,如四波混频、受激喇曼散射、自相位调制和交叉相位调制等。如果在设计时  $d/\Lambda$  取值很小,将获得大模场面积。大模场 PCF 适于高功率激光的传输和产生,同时在  $d/\Lambda$  很小时,还可确保光纤保持无限的单模传输,这是因为  $d/\Lambda$  较小,因此包层对于模式的束缚能力降低<sup>[13]</sup>。

### 3 结构改进

把第 1 层由圆形空气孔变成椭圆空气孔,且每一个椭圆的长轴与椭圆中心到纤芯中心点的连线垂直。椭圆空气孔的中心与原圆形中心重合,外层圆形空气孔直径均为  $d$ ,椭圆的长轴为  $a$ ,短轴为  $b$ ,结构示意图见图 4。这可能使光纤中出现双折射,分析结构变化对光纤高双折射特性的影响。光纤双折射特性通常用模式双折射来描述,模式双折射实际上是  $x$  偏振模和  $y$  偏振模的折射率差。

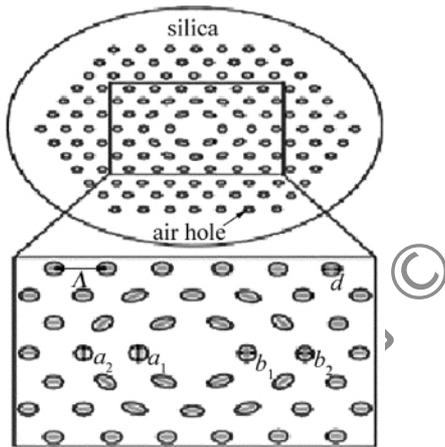


Fig. 4 Cross-section diagram of improved photonic crystal fibers

对选取结构参量为  $\Lambda = 2.3\mu\text{m}$ ,  $d = 0.46\mu\text{m}$ ,  $a_1 = 0.61\mu\text{m}$ ,  $b_1 = 0.35\mu\text{m}$ ,  $a_2 = 2.52\mu\text{m}$ ,  $b_2 = 0.40\mu\text{m}$  的光子晶体光纤,在工作波长为  $\lambda = 1550\text{nm}$  时进行了模拟计算。两个偏振态对应的模式折射率分别为  $n_x = 1.4380060$ ,  $n_y = 1.4380053$ 。这时两个偏振态之间的模式双折射  $\Delta n = n_x - n_y < 1 \times 10^{-6}$ ,可见,此时光纤的双折射很小。图 5 是通过计算改进结构后的光子晶体光纤基模两个偏振方向的电场强度。

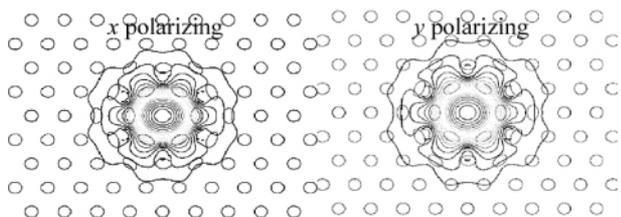


Fig. 5 Electric field intensity distribution along both polarization directions of improved photonic crystal fibers

从图 6 中可以看出,光纤可以在很大的带宽内都保持色散非常平坦。在模拟计算的  $1000\text{nm} \sim 1900\text{nm}$  波长范围内,光纤色散值的变化在  $\pm 1.0\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  以内。

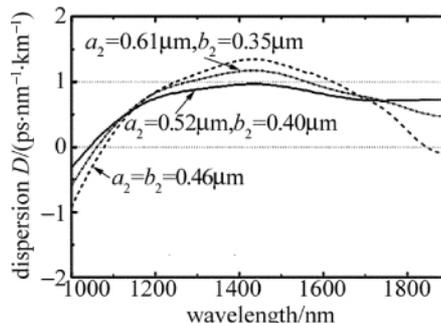


Fig. 6 Dispersion vs. wavelength for photonic crystal fibers ( $\Lambda = 2.3\mu\text{m}$ ,  $d = 0.46\mu\text{m}$ ,  $a_1 = 0.61\mu\text{m}$ ,  $b_1 = 0.35\mu\text{m}$ )

从图 7 中可以看出,在整个波长范围内光纤的模场面积都大于  $40\mu\text{m}^2$ ,限制损耗小于  $0.2\text{dB/km}$ 。在  $1550\text{nm}$  波长处光纤的模场面积为  $60\mu\text{m}^2$ ,与普通单模光纤相当;限制损耗为  $0.025\text{dB/km}$ 。

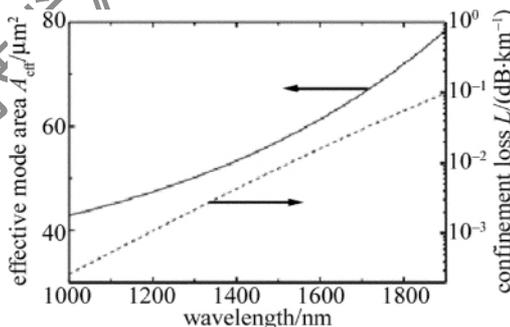


Fig. 7 Fiber effective mode area and confinement loss curves

### 4 结论

通过对光子晶体光纤的结构合理优化设计,选择适当的结构参量,获得了在较宽的波长范围内保持色散平坦且有较低的色散值。采用有限元法对改进的光子晶体光纤的色散特性、模场分布、双折射以及限制损耗进行了数值模拟分析,发现改进结构的光子晶体光纤,比原来的正六边形排列圆形空气孔光子晶体光纤更容易获得超平坦色散特性,且有较大的模场面积和较小的限制损耗。

#### 参 考 文 献

[1] CUCINOTTA A,SELLERI S,VINCETTI L, et al. Holey fiber analysis through the finite-element method [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(11): 1530-1532.  
 [2] NIGHT J C, RUSSELL P S. New way to guide light [J]. Science, 2002, 296(5566): 276-277.  
 [3] LI M, SUN J Q, LIU D M, et al. Study on degradation of extinction ratio of wavelength converter based on XGM [J]. Laser Technology, 2001 25(1): 76-79 (in Chinese).

研究中出现的新现象,值得进一步研究。现在已经明确,产生全反射隧穿效应的原因之一是在全反射条件下,光疏介质中的传播角为复数,对应倏逝波传播。定量关系有待进一步深入研究。

## 参 考 文 献

- [1] LIU Q N. The design of double channel polarization tunable filter of photonic crystal [J]. *Laser Technology*, 2008, 32 ( 1 ): 84-87 ( in Chinese ).
- [2] LIU Q N. Effect of absorption of dopant on design of photonic crystal filters[J]. *Laser Technology* 2008 32( 3 ): 327-330( in Chinese ).
- [3] DU G Q , LIU N H. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. *Acta Physica Sinica* , 2004 53( 4 ): 1095-1097( in Chinese ).
- [4] ZHANG D G , NI N , AN H N. Electromagnetic field analysis and numerical calculation of one-dimensional magneto-photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica* 2004 33( 8 ): 1007-1010( in Chinese ).
- [5] WANG R , ZHANG C X , NIE Y H. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica* 2007 35( 1 ): 89-92( in Chinese ).
- [6] LI R , REN K , REN X B. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. *Acta Physica Sinica* 2004 53( 8 ): 2520-2523( in Chinese ).
- [7] LIU Q N. Transmission characteristics of electromagnetic wave in 1-D rectangle photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica* , 2010 39( 5 ): 847-850( in Chinese ).
- [8] LIU Q N. Filtering feature of 1-D rectangle doping photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers* , 2010 , 37 ( 8 ): 2041-2044 ( in Chinese ).
- [9] LIU Q N. A new simple and convenient method for study of properties forbidden band of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica* 2007 36( 6 ): 1031-1034( in Chinese ).
- [10] LIU Q N. Defect mode and mode of electromagnetic wave in cylindrical doping photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2010 37 ( 4 ): 991-994( in Chinese ).
- [11] LIU Q N. The mode and defect mode of electromagnetic wave in rectangular doped photonic crystal [J]. *Acta Physica Sinica* , 2010 59 ( 4 ): 2551-2555( in Chinese ).
- [12] FANG Y T , LIANG Zh Ch. Unusual transmission through usual one-dimensional photonic crystal in the presence of evanescent wave [J]. *Optics Communications* 2010 283( 10 ): 2102-2106.
- [13] LIU Q N. Mode and bandgap of electromagnetic wave in flat-panel 1-D photonic crystal [J]. *Semiconductor Optoelectronics* , 2010 , 31 ( 1 ): 107-110( in Chinese ).
- [14] LIU Q N. A new method that study electromagnetic waves transfer in stratified medium [J]. *Laser Journal* , 2009 , 30 ( 3 ): 14-15 ( in Chinese ).
- [4] WANG R X , DOU C Sh , YU X Ch. Numerical study on a femtosecond laser pulse in photonic crystal fiber [J]. *Laser Technology* , 2006 , 30( 5 ): 555-557( in Chinese ).
- [5] DONG J J , ZHANG X L , WANG Y , *et al.* Extinction ratio characteristics of wavelength converters based on single-port-coupled SOA [J]. *Laser Technology* , 2001 , 25( 1 ): 14-17( in Chinese ).
- [6] LI Sh G , LIU X D , HOU L T. Photonic crystal fiber waveguide mode and dispersion property [J]. *Physics* , 2003 , 53( 11 ): 2811-2817( in Chinese ).
- [7] ALBERT F , ENRIQUE S , JUAN J M , *et al.* Vector description of higher order modes in photonic crystal fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America* 2000 A17( 7 ): 1333-1340.
- [8] BROENG J , MOGILEVSTEV D , BARKOU S E. Photonic crystal fibers: a new class of optical waveguides [J]. *Optical Fiber Technology* , 1999 , 5( 3 ): 305-330.
- [9] KOSHIBA M. Full vector analysis of photonic crystal fibers using the finite element method [J]. *IEICE Transactions on Electronics* , 2002 , E85-C( 4 ): 881-888.
- [10] HU M L , WANG Q Y , LI Y F. Microstructure fiber finite element analysis method [J]. *Chinese Journal of Lasers* , 2004 , 31 ( 11 ): 1337-1342( in Chinese ).
- [11] FLOUROUS N , SAITOH K , KOSHIBA M. The role of artificial defects for engineering large effective mode area , flat chromatic dispersion , and low leakage losses in photonic crystal fibers towards high speed reconfigurable [J]. *Optics Express* , 2006 , 14( 2 ): 901-913.
- [12] SAITOH K , FLOUROUS N , KOSHIBA M. Theoretical realization of holey fiber with flat chromatic dispersion and large mode area: an intriguing defect approach [J]. *Optics Letters* 2006 31( 1 ): 26-28.
- [13] GUAN Ch Y. Photonic crystal fiber properties and structural design [D]. Harbin: Harbin Engineering University , 2004: 56-61 ( in Chinese ).

( 上接第 113 页)