

## 一种宽带近零色散微结构光纤的设计与研究

王丹

(晋中学院物理与电子工程学院, 山西 晋中 030600)

**摘要** 提出了一种近零色散平坦微结构光纤(MF)。运用有限元法(FEM),研究了空气孔直径和间隔对光纤色散特性的影响。通过控制空气孔间距和孔直径,可以实现宽波段内的低平色散传输和大的模场面积。当空气孔直径  $d=0.73\ \mu\text{m}$ ,空气孔间距  $\Lambda=2.2\ \mu\text{m}$  时,在  $1.22\sim 1.80\ \mu\text{m}$  约  $600\ \text{nm}$  的波长范围内,光纤的色散系数  $D$  的值仅介于  $\pm 1\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  之间,且有三个零色散波长  $1.26, 1.51$  和  $1.76\ \mu\text{m}$ ;当  $d=0.73\ \mu\text{m}, \Lambda=2.3\ \mu\text{m}$  时,在  $1.20\sim 1.65\ \mu\text{m}$  约  $400\ \text{nm}$  的波长范围内,  $D$  的值仅介于  $-2\sim 4\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  之间,且有一个零色散波长  $1.24\ \mu\text{m}$  等。

**关键词** 光纤光学;有限元法;平坦色散;微结构光纤

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.090604

## Microstructured Fiber with Closing-Zero Dispersion in Wide Wavelength Range

Wang Dan

(School of Physics and Electronics Engineering, Jinzhong University, Jinzhong, Shanxi 030600, China)

**Abstract** A microstructured fiber (MF) with closing-zero flattened dispersion is proposed. The effect of air hole diameter and hole-pitch on dispersion of fiber is analyzed by the finite element method (FEM). By optimizing the air hole diameter and hole-pitch, closing-zero flattened dispersion and large mode area can be realized in a very wide scope of wavelength. When the air hole diameter  $d=0.73\ \mu\text{m}$  and the air hole-pitch  $\Lambda=2.2\ \mu\text{m}$ , the wavelength is from  $1.22\ \mu\text{m}$  to  $1.80\ \mu\text{m}$ , the dispersion parameter is only within  $\pm 1\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  in a  $600\ \text{nm}$  wavelength range, and three zero dispersion wavelength with  $1.26, 1.51$  and  $1.76\ \mu\text{m}$  can be achieved. When  $d=0.73\ \mu\text{m}, \Lambda=2.3\ \mu\text{m}$ , and the wavelength is from  $1.20\ \mu\text{m}$  to  $1.65\ \mu\text{m}$ , the dispersion parameter is within  $-2\sim 4\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  in a  $400\ \text{nm}$  wavelength range, and one zero dispersion wavelength with  $1.24\ \mu\text{m}$  can be achieved.

**Key words** fiber optics; finite element method; flattened dispersion; microstructured fiber

**OCIS codes** 060.2270; 060.2330; 060.4510; 060.5295

### 1 引言

现代光通信系统中,光纤的近零色散值和宽带超平坦色散特性是非常关键的,比如为了减小四波混频效应,要求光纤在工作波长处具有较低的色散值;波分复用(WDM)技术为维持不同波长的信道有一致的色散响应,要求光纤具有宽带的超平色散特性<sup>[1]</sup>。

微结构光纤(MF)又被称为光子晶体光纤(PCF)或者多孔光纤(HF)。理论计算和实验研究发现:通过对光子晶体光纤结构的设计,可以获得许多与传统光纤不同的特性,如可控的色散特性<sup>[2]</sup>、高的非线性效应<sup>[3]</sup>等。到目前为止已提出一些新颖结构:多数 PCF<sup>[4~7]</sup>设计平坦色散的方法是改变一层或几层空气孔的直径或者逐层改变空气孔的直径;或者将某些层的圆形空气孔用椭圆空气孔替代<sup>[1]</sup>,以实现平坦的色散等,但结构制备的难度都较大。

**收稿日期**: 2011-03-18; **收到修改稿日期**: 2011-04-18; **网络出版日期**: 2011-07-25

**基金项目**: 国家自然科学基金面上项目(60978028),山西省普通本科高等教学改革项目(晋教高字[2009]19号)和晋中学院教改资助项目(JG20090104, JG20090119, JG20090205)资助课题。

**作者简介**: 王丹(1975—),女,硕士,讲师,主要从事光纤光学、微结构光纤和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: danw66@126.com

本文提出了一种仅由纯石英和空气孔组成的微结构光纤,其制备工艺相对简单;与其他结构的光纤相比,其模场形状具有更加理想的效果,接近于圆形;还满足超宽带可达 600 nm 的低平色散和大的模场面积等优点。这种 PCF 能广泛应用在 WDM 通信系统和孤子传输系统及超连续谱产生等领域。

为了精确地分析、预测光子晶体光纤的传输特性,人们发展了许多理论分析方法,如平面波展开法(PWM)、时域有限差分法(FDTD)和有限元法(FEM)等。这些理论模型方法是研究微结构光纤的基本工具。

本文采用全矢量有限元法<sup>[1]</sup>对所提出的近零色散平坦微结构光纤进行数值分析,计算了空气孔间距及直径对光纤色散特性和模场面积的影响,得出了在不同空气孔间距  $\Lambda$ 、空气孔直径  $d$  条件下的色散系数  $D$  随波长  $\lambda$  的变化关系。

## 2 理论模型

提出了一种具有大模场面积和超宽带低平色散的微结构光纤,其截面示意图如图 1 所示,由纯石英和空气孔组成。该种光纤的包层空气孔直径为  $d$ ,每层上的空气孔中心点到光纤中心点的距离相同,分别为  $\Lambda$ 、 $2\Lambda$ 、 $3\Lambda$  和  $4\Lambda$ ,且每层空气洞的数量是该层数的 6 倍。其制备工艺相对简单,易于实现。

本文运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、模场面积和非线性系数进行数值分析。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以计算任意光纤的模式场。

光子晶体光纤色散的可调性取决于包层空气孔直径和空气孔间距的灵活设计。对于具有轴对称性的单模光纤来说,其色散主要是材料色散和波导色散。材料色散是由于石英的折射率对波长的依赖性所引起的,可表示为

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_m}{d\lambda^2}, \quad (1)$$

文中计算考虑了这一色散。(1)式中  $D_m(\lambda)$  可由 Sellmeier 方程<sup>[8]</sup> 计算。波导色散  $D_w(\lambda)$  与光纤的包层结构参数密切相关,可表示为

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

式中  $n_{\text{eff}}$  为模式的有效折射率。所以光子晶体光纤的总色散可表示为

$$D(\lambda) \approx D_w(\lambda) + D_m(\lambda). \quad (3)$$

光子晶体光纤的非线性系数为

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

式中  $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ , 是石英的非线性折射率系数,  $A_{\text{eff}}$  是光纤基模的有效面积<sup>[9]</sup>,  $\lambda$  为波长。

## 3 数值结果与讨论

影响光纤结构的参数主要有两个,即光纤包层空气孔直径  $d$  和空气孔间距  $\Lambda$ 。用固定一个参数改变另一个参数的方法,来研究两个参数对光纤色散系数的影响,分别如图 2 和图 3 所示。

图 2 是保持  $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$  不变,  $d = 0.71, 0.73, 0.76, 0.83$  和  $0.94 \mu\text{m}$  时的色散  $D$  随波长的变化曲线。可以看出,对于确定的  $\Lambda$ ,孔直径  $d$  越小: 1) 在某一固定波长下,其色散值越小; 2) 色散曲线愈加平坦,且在某些波长范围内几乎零色散; 3) 每条曲线都只有一个零色散点,且零色散点右移。

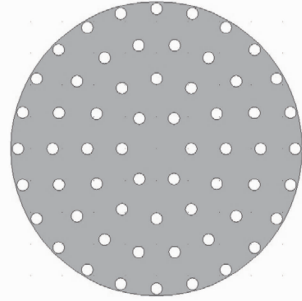


图 1 近零平坦色散微结构光纤的横截面  
Fig. 1 Transverse cross section of MF with closing-zero flattened dispersion

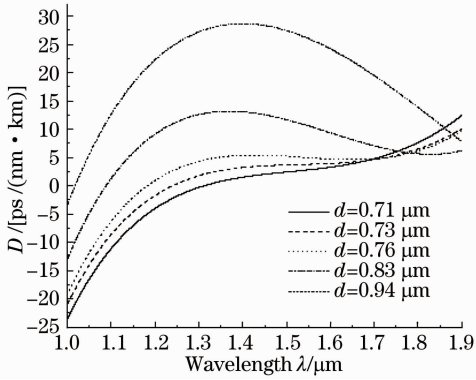


图2 保持  $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$  不变,  $d$  不同时色散系数随波长的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of dispersion versus wavelength with  $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$  and different  $d$  values

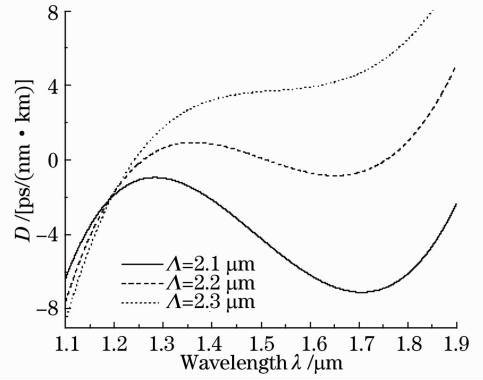


图3 保持  $d=0.73 \mu\text{m}$  不变,  $\Lambda$  不同时色散系数随波长的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of dispersion with wavelength with  $d=0.73 \mu\text{m}$  and different  $\Lambda$  values

图3是  $d=0.73 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda$  为  $2.1, 2.2$  和  $2.3 \mu\text{m}$  时的色散  $D$  随波长的变化关系。可以看出,对于确定的  $d$ , 孔间距  $\Lambda$  越小: 1) 波长大于  $1.2 \mu\text{m}$  时对于某一固定波长, 其色散值越小; 波长小于  $1.2 \mu\text{m}$  时对于某一固定波长, 其色散值越大; 2)  $\Lambda$  为  $2.2 \mu\text{m}$  和  $2.3 \mu\text{m}$  时, 既有正色散、零色散还有负色散;  $\Lambda$  为  $2.1 \mu\text{m}$  时, 只有负色散; 3) 每条曲线都有超平坦波段。

把图3中的两个结构的色散曲线图放大, 如图4(a)、(b)所示, 当  $d=0.73 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$  时, 在  $1.20\sim 1.65 \mu\text{m}$  范围内,  $D$  的值仅介于  $-2\sim 4 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  之间, 且有1个零色散波长  $1.24 \mu\text{m}$ ; 当  $d=0.73 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda=2.2 \mu\text{m}$  时, 在  $1.22\sim 1.80 \mu\text{m}$  范围内,  $D$  的值仅介于  $\pm 1 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  之间, 且有3个零色散波长  $1.26, 1.51$  和  $1.76 \mu\text{m}$ 。

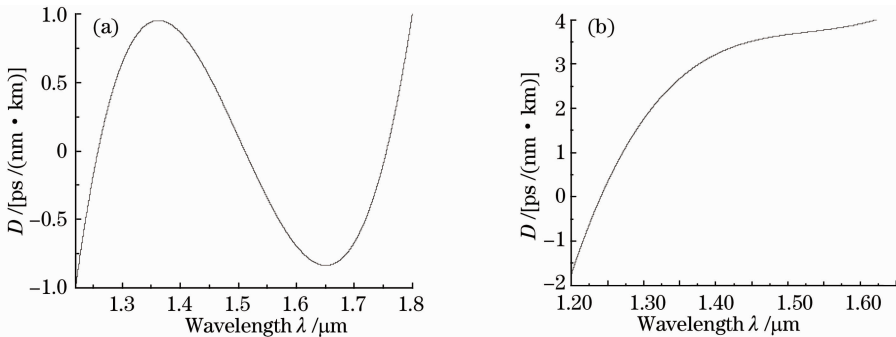


图4  $d=0.73 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda$  为  $2.2 \mu\text{m}$ (a)和  $2.3 \mu\text{m}$ (b)时的色散曲线放大图

Fig. 4 Magnified curves for dispersion parameter with  $d=0.73 \mu\text{m}$  and  $\Lambda=2.2 \mu\text{m}$  (a) and  $2.3 \mu\text{m}$  (b)

当然如前所述, 还能够设计出更加近零平坦色散的光子晶体光纤和色散值为负的色散补偿光纤等。

从以上各个参量对色散特性的影响规律能够看出: 计算时在选取的结构参量范围及计算的波长范围内, 合理调节  $d$  和  $\Lambda$ , 就可以在所要的波长范围获得超低超平色散。之所以能够获得低平色散是因为: 对图1所示的微结构光纤, 在短波长处, 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; 而在长波长处, 有效模面积增大, 色散特性不仅受内层空气孔而且也受外层空气孔的影响, 因此产生了一定波长范围内的低平色散。

图5是  $d=0.73 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda=2.2 \mu\text{m}$  时的有效模面积  $A_{\text{eff}}$  和非线性系数  $\gamma$  随波长的变化关系, 在  $1.55 \mu\text{m}$  处光纤的  $A_{\text{eff}} \approx 31.2 \mu\text{m}^2$ ,  $\gamma \approx 4 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

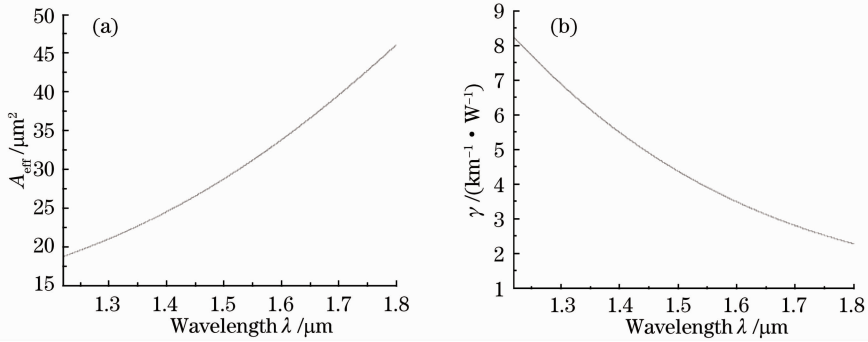


图 5  $d=0.73 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda$  为  $2.2 \mu\text{m}$  时的有效模面积(a)和非线性系数(b)

Fig. 5 (a) Effective mode areas versus wavelength and (b) nonlinear coefficient versus wavelength when  $d=0.73 \mu\text{m}$  and  $\Lambda=2.2 \mu\text{m}$

## 4 结 论

介绍了光子晶体光纤色散产生的原理及计算方法,数值模拟了光纤的孔间距和孔直径分别变化时色散系数随波长的改变情况,并对结果进行了分析。在此基础上,设计了一种具有 3 个零色散点  $1.26, 1.51$  和  $1.76 \mu\text{m}$  且在  $1.22 \sim 1.80 \mu\text{m}$  波长范围内色散系数  $D$  的值仅介于  $\pm 1 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  之间的超低超平色散的微结构光纤,平坦的波段宽度达到了  $600 \text{ nm}$ 。当然还能够设计出更接近零平坦色散的光子晶体光纤和色散值为负的色散补偿光纤等。

## 参 考 文 献

- Liu Zhaolun, Wang Wei, Zhao Xingtao *et al.*. Modified design and characteristics analysis of broadband flat dispersion photonic crystal fiber[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(1): 104~107  
刘兆伦, 王伟, 赵兴涛等. 宽带色散平坦光子晶体光纤的优化设计与特性分析[J]. 半导体光电, 2007, **28**(1): 104~107
- Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. Numerical simulation and analysis on photonic crystal fiber 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
- 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
- Yuan Jinhui, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Investigation of a step-structure photonic crystal fiber with flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1167~1171  
苑金辉, 侯蓝田, 周桂耀等. 一种阶梯结构的色散平坦光子晶体光纤的研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1167~1171
- 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
- Hou Yu, Zhou Guiyao, Hou Lantian *et al.*. Analysis of dispersion properties of octagonal structural photonic crystal fiber with double cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1068~1072  
侯宇, 周桂耀, 侯蓝田等. 八边形双包层光子晶体光纤色散特性分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(4): 1068~1072
- Guo Yuan, Ruan Shuangchen. Analysis on the dispersion properties of photonic crystal fiber with an air-hole defect core [J]. *J. Shenzhen University Science and Engineering*, 2010, **27**(4): 386~390
- Wu Chongqin. Optical Waveguide Theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000  
吴重庆. 光波导理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000
- Wu Ming, Liu Hairong, Huang Dexiu. A novel photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 539~542  
吴铭, 刘海荣, 黄德修. 高非线性光子晶体光纤色散特性的研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 539~542