

一种超宽带低色散多孔光纤的数值研究

王 丹¹ 郑 义²

(¹ 晋中学院物理与电子工程学院, 山西 晋中 030600)
² 北京交通大学激光研究所, 北京 100044)

摘要 设计了一种新型多孔光纤, 利用有限元法数值模拟了结构参数变化对其色散系数、模场面积、非线性系数的影响。研究表明, 该种光纤不仅结构简单, 而且具有非常优越的色散性能。经过合理优化, 设计了在 900 nm 的超宽波长范围内保持低平色散并具有三个零色散点($\lambda = 1.0 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.53 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.81 \mu\text{m}$)的多孔光纤。该结果对新型光纤的设计具有一定的指导意义。

关键词 光纤光学; 多孔光纤; 有限元法; 平坦色散; 零色散

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0806005

Numerical Investigation of a Ultra-Broadband Low-Dispersion Holey Fiber

Wang Dan¹ Zheng Yi²

(¹ School of Physics and Electronics Engineering, Jinzhong University, Jinzhong, Shanxi 030600, China)
² Institute of Laser, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract Using the finite element method, the dispersion property, mode area and nonlinear coefficient are numerically simulated by artificially choosing the parameters of the proposed novel holey fiber. The results show that the novel fiber not only has a relatively simple structure, but also has better dispersion property. By optimizing the structure parameters, a flattened dispersion holey fiber with three zero-dispersion wavelengths ($\lambda = 1.0 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.53 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.81 \mu\text{m}$) in the 900 nm wavelength range has been designed. These results can be used to guide the design of novel holey fiber.

Key words fiber optics; holey fiber; finite element method; flattened dispersion; zero-dispersion

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.4005; 060.4510; 060.5295

1 引 言

在长距离大容量高速率光纤通信系统中, 光纤色散引起的脉冲展宽成为其主要限制^[1]; 波分复用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坦色散特性等, 也就是说, 不论在线性或非线性光学领域, 都是希望光纤色散在应用波长窗口内大小合理且平坦。近年来, 多孔光纤(HF)[或称微结构光纤(MOF)]^[2], 因可以获得常规光纤所没有的独特的光学特性^[3-4]和灵活的设计使其在光通信、非线性光学等领域有着巨大的潜在的应用前景。到目前为止, 已提出一些具有低平

色散特性的 MOF, 如武劲青等^[5]设计的方形渐变 HF; 刘洁等^[6]提出的多包层光子晶体光纤; 侯宇等^[7-8]提出的八边形光子晶体光纤等。这些光纤通常将包层孔设计为规则的三角阵列, 或者空气孔层数太多, 或者改变的空气孔个数较多, 或者结构复杂难于制备, 或者色散曲线尽管较为平坦但色散值较大。

为寻求结构较为简单、制备工艺相对成熟而又能获得低平色散的微结构光纤, 本文经过数值模拟分析, 提出了一种导光性能很好的新型多孔光纤, 虽然该光纤横截面折射率分布近似一些已提出的色散

收稿日期: 2013-02-23; 收到修改稿日期: 2013-04-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60637010)

作者简介: 王 丹(1975—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事光纤光学、微结构光纤等方面的研究。E-mail: danw66@126.com

补偿光纤结构,但只要设计合理,完全可以获得色散平坦。

2 理论基础

对光子晶体光纤来说,材料折射率的差别一般较大,要精确、快速地计算其传输特性,就要采用全矢量方法^[9-10]。其中有限元法(FEM)^[11-12]是用有限个单元将连续体离散化,通过对有限个单元作分片插值求解各种物理问题的一种高效能的数值计算方法,用它分析光波导的模场具有较高的计算精度。其基本求解过程如下:从麦克斯韦方程出发得到光纤所遵从的本征值方程:

$$\nabla \times (\epsilon_r^{-1} \nabla \times \mathbf{H}) = (\omega/c)^2 \mu \mathbf{H}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{H} 是磁场强度, c 是真空中光速, ω 是光波角频率, ϵ_r 和 μ 分别是介质的相对介电常数和磁导率。根据需要建立模型;设定材料折射率、所要计算的波长及边界条件;然后将待解区域进行分割,离散成有限个元素的集合,二维问题一般采用三角形单元或矩形单元即对所计算的区域网格化;在每个小区域求解(1)式;最后求解和后处理。

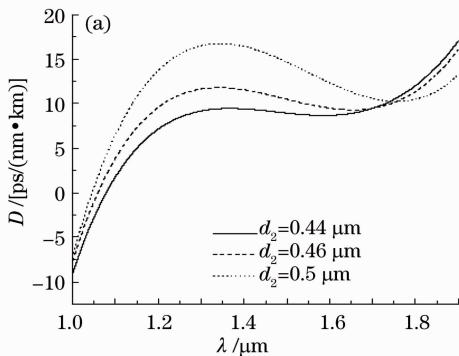
HF的总色散用色散系数 $D(\lambda)$ 来表示,一般等于材料色散 $D_m(\lambda)$ 和波导色散 $D_w(\lambda)$ 两部分之和^[13]。 $D_w(\lambda)$ 取决于光纤的波导结构,由(2)式决定:

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

式中 n_{eff} 为模式的有效折射率, λ 为光纤中传输光的波长,有效模面积 A_{eff} 也是一个非常重要的参数,其大小决定了光纤非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 的大小,分别为

$$A_{\text{eff}} = \left(\iint_{\text{S}} |E|^2 dx dy \right)^2 / \iint_{\text{S}} |E|^4 dx dy, \quad (3)$$

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



式中 $|E|^2$ 是光纤横截面的强度分布^[14-15], $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ 为材料的非线性折射率系数。

所提出光纤的截面示意图如图1所示。它是由纯石英材料构成的,在其包层中沿整个光纤长度方向分布着三层大小不一且呈正六边形的空气洞,任何两相邻空气孔中心点的距离 Δ 都一样,从纤芯开始每层空气孔的直径分别用 d_1, d_2, d_3 来表示。

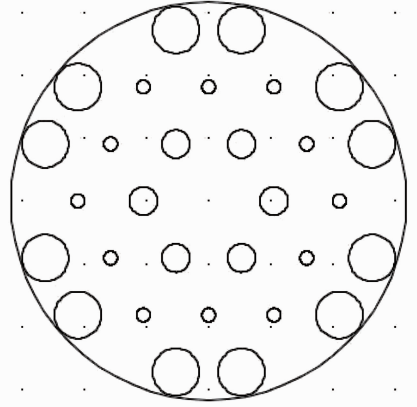


图1 新型多孔光纤的横截面

Fig. 1 Transverse cross section of the novel hole fiber

3 数值结果和讨论

3.1 第二层空气孔直径 d_2 变化对色散系数的影响

首先,固定包层空气孔间距 $\Delta = 2.3 \mu\text{m}$, 第一层空气孔直径 $d_1 = 0.9 \mu\text{m}$, 第三层空气孔直径 $d_3 = 1.5 \mu\text{m}$, 改变第二层空气孔直径 d_2 的大小,得到的色散 D 随波长 λ 的变化关系如图2所示。图2(a)体现了当 d_2 分别等于 $0.44, 0.46, 0.5 \mu\text{m}$ 时的色散变化情况,可以看出,在此参数条件下,所提出的光纤具有超宽带低色散平坦的特性,随着空气孔直径的减小,色散值越小,在某些波段愈加平坦,且平坦波段左移;反之,随着 d_2 的不断增大,色散值增

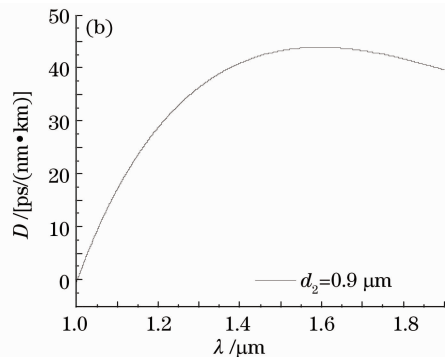


图2 当 $\Delta = 2.3 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.9 \mu\text{m}$, $d_3 = 1.5 \mu\text{m}$ 第二层空气孔直径 d_2 取不同值时,总色散 D 随波长 λ 的变化关系
Fig. 2 Variation of dispersion with wavelength when $\Delta = 2.3 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.9 \mu\text{m}$, $d_3 = 1.5 \mu\text{m}$ and different values are chosen for d_2

加,色散变化幅度较大。图 2(b)为 $d_2=0.9 \mu\text{m}$ 时的色散曲线,可以看出当第一、二层空气孔直径相同时,平坦波段右移且色散值较大,显然这不是想要的结果。综上可知,当 $d_1=d_2$ 时不能得到通信波段所需的平坦色散,只有在 $d_2<d_1$ 且合适的条件下才能获得更为平坦且色散值小的曲线。下面选取 $d_1=0.9 \mu\text{m}$, $d_2=0.44 \mu\text{m}$, $d_3=1.5 \mu\text{m}$, $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$ 这一结构参数,来不断调整色散曲线,使其更加符合实际需要。

3.2 空气孔间隔 Λ 改变对色散特性的影响

固定 $d_1=0.9 \mu\text{m}$, $d_2=0.44 \mu\text{m}$, $d_3=1.5 \mu\text{m}$, 改变空气孔间隔 Λ , 得到如图 3 所示的色散曲线。从图 3(a) 可以看出, 不管是哪一种结构参数, 色散值都是很小的; 随 Λ 的减小, 色散曲线在波长为 $1.0\sim 1.3 \mu\text{m}$ 之间虽然较为陡峭, 但值较小且零色散点逐渐左移; 在波长大于 $1.3 \mu\text{m}$ 时色散曲线变化较大, 随着 Λ 的减小, 色散值逐渐减小, 在某些波长处接近零色散。

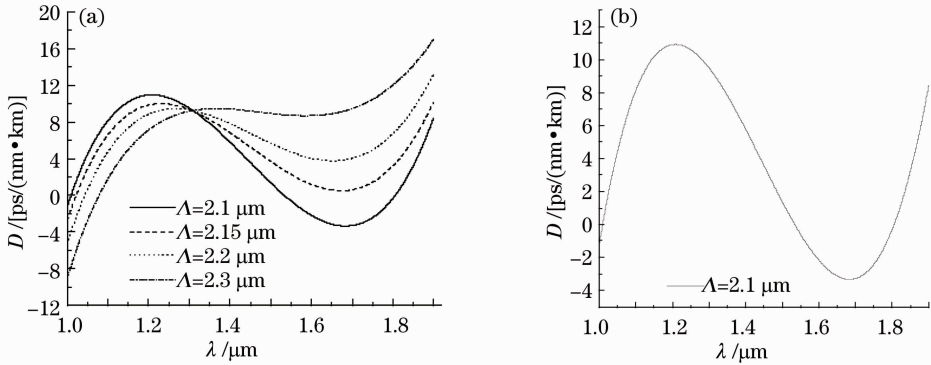


图 3 当 $d_1=0.9 \mu\text{m}$, $d_2=0.44 \mu\text{m}$, $d_3=1.5 \mu\text{m}$, 空气孔间隔 Λ 改变时总色散 D 随波长 λ 的变化关系
Fig. 3 Variation of dispersion with wavelength when $d_1=0.9 \mu\text{m}$, $d_2=0.44 \mu\text{m}$, $d_3=1.5 \mu\text{m}$ and different values are chosen for Λ

3.3 超宽带低色散多孔光纤的优化设计

经过进一步优化设计,得到了如图 3(b)所示的色散曲线: 该种光纤 ($\Lambda=2.1 \mu\text{m}$, $d_1=0.9 \mu\text{m}$, $d_2=0.44 \mu\text{m}$, $d_3=1.5 \mu\text{m}$) 结构在 $1.0\sim 1.9 \mu\text{m}$ 的超宽波长范围内保持低色散并同时具有三个零色散点 ($\lambda=1.0 \mu\text{m}$, $\lambda=1.53 \mu\text{m}$, $\lambda=1.81 \mu\text{m}$)。

图 4 给出了该种光纤在 $\lambda=1.0 \mu\text{m}$ [见图 4(a)] 和 $\lambda=1.8 \mu\text{m}$ [见图 4(b)] 的磁场能量分布等位图。可以看出, 能量及场主要分布于芯区, 随着波长的增

大会向包层泄露, 而随波长减小几乎全会集于芯区, 保持了无限单模传输特性和优异的导光性能。

图 5(a) 是该种光纤的有效模面积 A_{eff} 随 λ 的变化情况, 可以看出, 有效模面积不仅较大而且随波长的增加而增加。图 5(b) 是其非线性系数 γ 随 λ 的变化曲线。可以明显看出, γ 随 λ 的增加而逐渐减小甚至接近于零, 尤其在 $\lambda=1.53 \mu\text{m}$ 和 $\lambda=1.81 \mu\text{m}$ 这两个零色散点既具有大的模场面积又保持了低非线性, 这为实现大模面积的单模光纤提供了一条重要的途径。

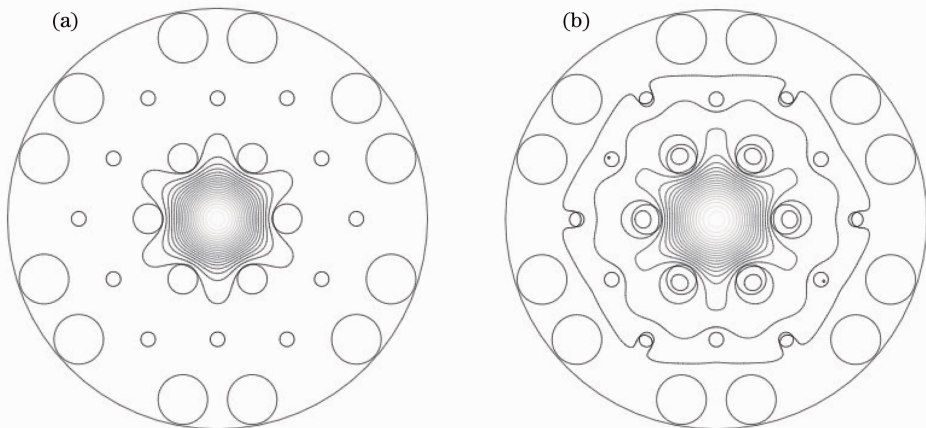


图 4 所设计的多孔光纤在 (a) $\lambda=1.0 \mu\text{m}$ 和 (b) $\lambda=1.8 \mu\text{m}$ 的磁场能量分布等位图
Fig. 4 Mode field distribution maps of the designed fiber at (a) $\lambda=1.0 \mu\text{m}$ and (b) $\lambda=1.8 \mu\text{m}$

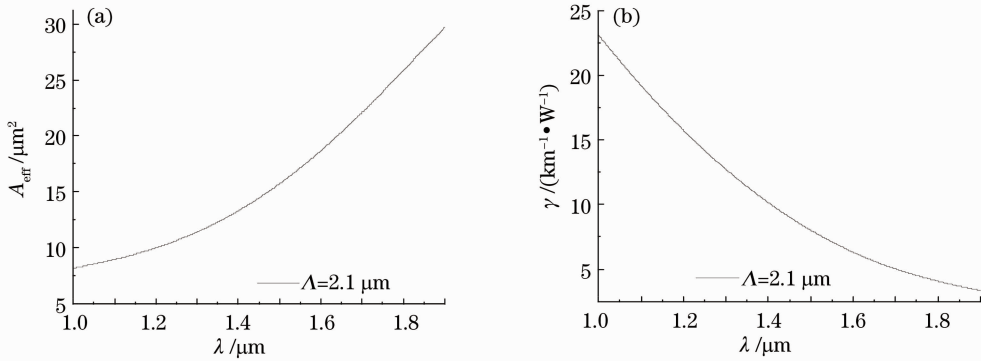


图 5 所设计多孔光纤(a)有效模面积 A_{eff} 和(b)非线性系数 γ 随波长 λ 的变化关系

Fig. 5 Variation of (a) mode area A_{eff} and (b) nonlinear coefficient γ with wavelength λ

4 结 论

提出了一种具有简单结构的新型多孔光纤,以石英为基材,借助有限元法,对其总色散、模场、有效模面积和非线性系数进行了数值计算和分析,结果发现空气孔间隔和第二层空气孔直径都会影响到光纤的色散值,只要结构参数选择适当,就可以实现超宽带低平色散和大模面积等特性。由此设计了当 $\Lambda = 2.1 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.9 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.44 \mu\text{m}$, $d_3 = 1.5 \mu\text{m}$ 时,在 $1.0 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 的超宽波长范围内保持低色散且具有三个零色散点 ($\lambda = 1.0 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.53 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.81 \mu\text{m}$) 的 HF。这种 MOF 结构简单易于制备,可对新型光纤的设计起一定的指导意义。

参 考 文 献

- Yuan Rong. Dispersion and dispersion slop compensation [J]. Optical Communication Technology, 2002, 26(5): 4-9.
原 荣. 色散补偿技术及其进展[J]. 光通信技术, 2002, 26(5): 4-9.
- Philip Russell. Photonic crystal fibers [J]. Science, 2003, 299(17): 358-362.
- Guan Shouhua, Yu Qingxu, Zheng Jianzhou. Study on the extreme characteristics of dispersion of photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0806001.
关寿华, 于清旭, 郑建洲. 光子晶体光纤的色散极值特性的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0806001.
- Jonathan C Knight. Photonic crystal fibers [J]. Nature, 2003, 424(6950): 847-851.
- 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. 方形渐变空气孔微结构光纤的色散特性分析[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 174-178.
- 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.
- 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. 八边形双层光子晶体光纤色散特性分析[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1068-1072.

- Chen Juan, Ge Wenping, Wang Xiaowei. Design of a novel octagonal photonic crystal fiber with flat dispersion and high nonlinearity [J]. Laser Technology, 2012, 36(4): 480-484.
陈 娟, 葛文萍, 王晓薇. 八边形低色散高非线性光子晶体光纤的设计[J]. 激光技术, 2012, 36(4): 480-484.
- Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. A vectorial analysis on the dispersion of PCF's fundamental mode [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(6): 1873-1879.
李曙光, 刘晓东, 侯蓝田. 一种晶体光纤基模色散特性的矢量法分析[J]. 物理学报, 2004, 53(6): 1873-1879.
- Wang Dan, Xue Wenrui, Zhou Guosheng. Analysis of dispersion properties in dispersion-compensating fiber based on circle dual-concentric-core microstructured optical fiber [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2006, 12(2): 102-108.
王 丹, 薛文瑞, 周国生. 圆形双芯微结构色散补偿光纤的色散特性分析[J]. 量子光学学报, 2006, 12(2): 102-108.
- Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng. Analysis of the microstructure fiber by the finite element method [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(11): 1337-1342.
胡明列, 王清月, 栗岩峰. 微结构光纤的有限元分析算法[J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1337-1342.
- Li Yuhe, Fan Wandu, Sheng Qiuqin. Dispersion properties of dual-core photonic crystal fiber with quasi-lattice [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0205005.
李羽赫, 范万德, 盛秋琴. 双芯准晶格光子晶体光纤的色散特性[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0205005.
- Zhang Yani. Design and optimization of low-loss low-nonlinear high negative-dispersion photonic crystal fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(8): 084213.
张亚妮. 低损耗低非线性高负色散光子晶体光纤的优化设计[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 084213.
- N G R Broderick, T M Monroe, P J Bennett, *et al.*. Nonlinearity in holey fibers: measurement and future opportunities [J]. Opt Lett, 1999, 24(20): 1395-1397.
- 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.