

一种新型微结构光纤的设计与数值研究

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 提出了一种新型双包层结构的微结构光纤(MOF),利用有限元法对其模场面积、损耗及色散系数随波长的变化规律进行了数值模拟与分析,并在相同条件下与传统的双包层 MOF 作了比较。结果表明,该种光纤不但结构新颖,而且较传统光纤有更优异的色散性能。通过合理优化,设计了几种在 500 nm 波长范围内保持低平色散和较大模场面积的新型双包层 MOF。这种光纤结构的提出对以后的理论研究和工艺制备具有一定的参考意义。

关键词 光纤光学;平坦色散;有限元法;微结构光纤;光子晶体光纤

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0806003

Design and Numerical Investigation of a Novel Microstructured Optical 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 (FEM), the mode area, confinement loss and dispersion property of a novel microstructured optical fiber (MOF) with double-cladding structure are numerically simulated, analyzed and compared with those of traditional MOF. Results show that the fiber not only has a novel structure but also has better dispersion performance than the traditional photonic crystal fiber. Through rational optimization, several flat dispersion MOFs with large mode area in the 500 nm wavelength range are designed. The novel fiber proposed will have some reference value to the subsequent theoretical study and manufacture.

Key words fiber optics; flattened dispersion; finite element method; microstructured optical fiber; photonic crystal fiber

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.4005; 060.4510; 060.5295

1 引 言

微结构光纤(MOF),又称光子晶体光纤^[1]或多孔光纤,因其独特的光学特性^[2,3]和灵活的设计成为近年来的热门研究课题。大模面积且具有色散平坦特性的微结构光纤在超连续谱产生、密集波分复用系统和波长转换等方面有着极其重要的应用。

传统的色散平坦光纤大多是单包层结构^[4~6]和渐变结构^[7],即便是双包层结构的^[8~11],也大多局限于正六边形或正八边形结构,形式较单一,改变的空气孔个数较多。本文提出一种新型双包层微结构光纤,当外包层参数固定后,仅需调节内包层结构参

数,就可以获得较大的模场面积,并在很宽的波长范围内保持低平色散。

2 有限元法与结构分析

对微结构光纤来说,材料折射率的差别一般较大,要准确计算其传播特性,必须采用全矢量方法。目前有多极法(MPM)^[12]、频域有限差分法(FDFD)^[13]和有限元法(FEM)^[14,15]等。这些方法中,FEM是一种将连续体离散化为若干个有限大小的单元体的集合,以求解连续体物理学问题的高效数值计算方法,用它分析光波导的模场具有较高

收稿日期: 2012-01-09; 收到修改稿日期: 2012-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(60978028)和山西省教育厅项目(晋教高字[2009]19号)资助课题。

作者简介: 王 丹(1975—),女,硕士,讲师,主要从事光纤光学和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: danw66@126.com

的计算精度。其建模和计算过程大致如下:1)建立所需模型;2)设定材料折射率、所要计算的波长及边界条件;3)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;4)求解和解后处理。

单模光纤的色散主要用色散系数 $D(\lambda)$ 来表示,一般包括材料色散和波导色散两部分。材料色散 $D_m(\lambda)$ 可以利用 Sellmeier 公式^[16] 得到,波导色散

$$D_w(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为模式的有效折射率。总色散表示为

$$D(\lambda) = D_w(\lambda) + D_m(\lambda). \quad (2)$$

对于模场面积,可以通过求解有效模面积求得,其公式如下:

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

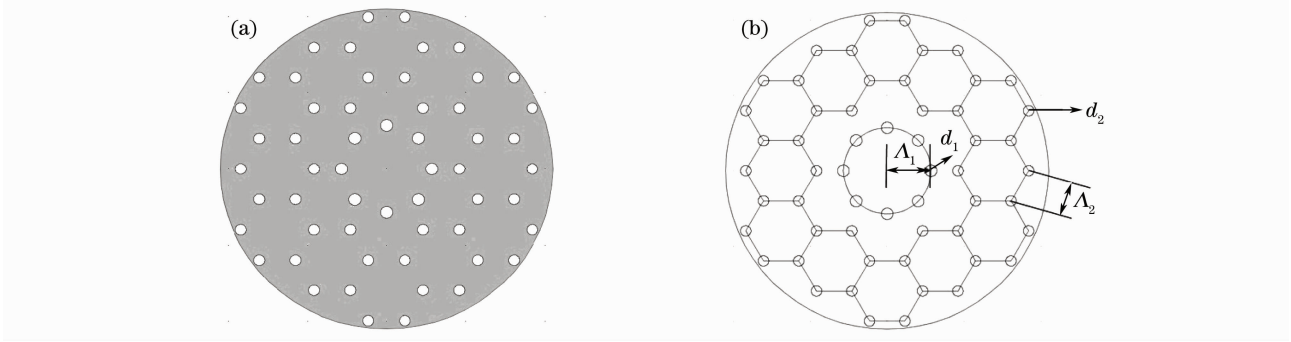


图 1 新型双包层微结构光纤的横截面。(a)示意图;(b)结构参数

Fig. 1 Transverse cross section of novel microstructured optical fiber with double cladding structure. (a) Schematic; (b) structural parameters

3 数值结果和讨论

3.1 所提出的光纤与传统光纤特性对比

为了体现所提出光纤的优越性,在相同参数条

式中 $|E|^2$ 是光纤横截面的强度分布^[17]。

光纤的限制损耗 (CL) 是衡量纤芯对光场局域能力的大小,对一定的模式,限制损耗(其单位为 dB/m)对应其有效折射率的虚部,表达式为

$$L = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6. \quad (4)$$

有了上面的分析结果,下面将有限元法应用于所提出的双包层 MOF 的计算中。其截面示意图如图 1(a) 所示,黑色部分为石英,白色部分为空气孔,内包层由一圈呈圆形分布的空气孔组成,外包层由一圈呈正六边形分布的空气孔组成。内包层空气孔中心距光纤中心的距离为 Δ_1 、直径为 d_1 ;外包层正六边形的相邻两空气孔中心间的距离为 Δ_2 ,空气孔直径为 d_2 ,各个空气孔之间的关系及结构参数如图 1(b) 所示。

件下分别对新型双包层光纤和传统双包层 MOF(内包层空气孔呈圆形分布,外包层为正六边形分布, $\Delta_1, \Delta_2, d_1, d_2$ 意义和新提出的光纤相同)的色散特

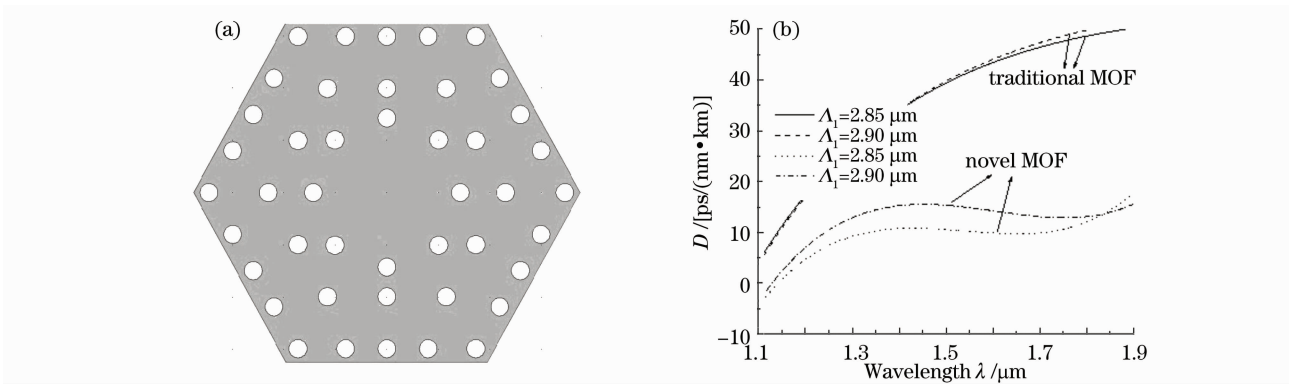


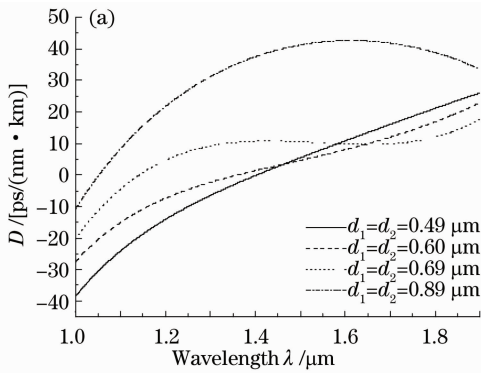
图 2 (a)传统双包层微结构光纤的横截面和(b)同参数条件下的色散系数比较

Fig. 2 (a) Transverse cross section of traditional microstructured optical fiber and (b) comparison of dispersion coefficient with same parameters

性进行了计算和比较。图 2(a)是传统双包层 MOF 的横截面示意图,图 2(b)是 $d_1 = d_2 = 0.69 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$,两种光纤的 Λ_1 分别等于 $2.85 \mu\text{m}$ 和 $2.9 \mu\text{m}$ 的情况下计算出的色散系数随波长的变化曲线。结果发现,在相同参数条件下,传统光纤的色散曲线较新型光纤更为陡峭且色散值远大于后者,因此后者较前者更容易获得低平色散。

3.2 内、外包层空气孔直径相同时,其变化对色散系数的影响

固定内包层空气孔距光纤中心的距离 $\Lambda_1 = 2.85 \mu\text{m}$ 和外包层正六边形的孔间距 $\Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$,且使内、外包层空气孔直径一致,即 $d_1 = d_2$,而不断改变 d_1, d_2 的取值。如图 3(a)所示,空气孔直径的



改变对该双包层 MOF 的色散有较强的影响;但有一些过渡平坦曲线,如图 3(b),当 $d_1 = d_2 = 0.69 \mu\text{m}$ 时,在 $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 的超宽波长范围内,其色散值 $D_{\text{max}} - D_{\text{min}} < 2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。综上所述可知,同时改变内外包层空气孔大小虽然可以获得平坦的色散曲线,但其对色散曲线影响较大,若要得到更为平坦且色散值小的曲线,就要固定内包层或外包层,通过改变某一包层空气孔的间隔和直径来获取。下面固定外包层正六边形相邻两空气孔的间隔 Λ_2 和直径 d_2 不变,仅改变内包层呈圆形分布的空气孔的直径 d_1 和其距光纤中心的距离 Λ_1 ,来调整色散曲线,从而设计出大模面积宽带低平色散双包层 MOF。

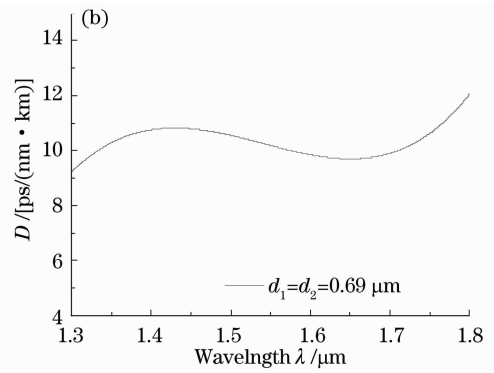


图 3 $\Lambda_1 = 2.85 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$ 时,光纤在(a) $d_1 = d_2$ 和(b) $d_1 = d_2 = 0.69 \mu\text{m}$ 的情况下总色散随波长的变化关系
Fig. 3 Variation of dispersion with wavelength when $\Lambda_1 = 2.85 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$. (a) $d_1 = d_2$; (b) $d_1 = d_2 = 0.69 \mu\text{m}$

3.3 内包层参数 Λ_1 的改变对色散特性的影响

固定外包层正六边形的孔间距 $\Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$,且使内、外包层空气孔直径一致,即 $d_1 = d_2 = 0.69 \mu\text{m}$,只改变内包层空气孔距光纤中心的距离 Λ_1 的取值。如图 4 所示,随着 Λ_1 的减小,色散曲线在波长为 $1.0 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 之间虽然仍很陡峭,但在波长大于 $1.3 \mu\text{m}$ 时色散曲线又趋于平坦,且平坦波段逐渐向短波长方向移动; Λ_1 越小,色散曲线愈加平坦,且在同一波长下,色散值越小;色散曲线在大于 $1.3 \mu\text{m}$ 时有较大变化,说明改变内包层空气孔距光纤中心的距离 Λ_1 对该双包层 MOF 的色散有较强的影响,但都有一个超平坦波段。

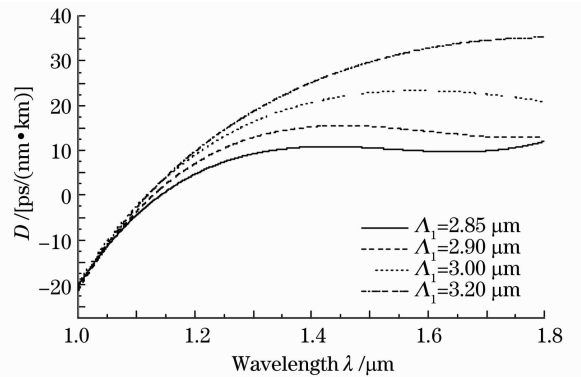


图 4 $d_1 = d_2 = 0.69 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$ 时,光纤在 Λ_1 不同的情况下总色散随波长的变化关系
Fig. 4 Variation of dispersion with wavelength when $d_1 = d_2 = 0.69 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$ and different values are chosen for Λ_1

3.4 内包层空气孔直径 d_1 的改变对色散系数的影响

保持外包层空气孔的位置及直径不变,固定内包层空气孔距光纤中心的距离 Λ_1 ,只改变内包层空气孔直径,即固定内包层孔间距 $\Lambda_1 = 2.85 \mu\text{m}$,外包层空气孔直径 $d_2 = 0.69 \mu\text{m}$,外包层空气孔间距 $\Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$,只改变内包层空气孔直径 d_1 。如图 5(a)所

示,每条色散曲线都有一个几乎达 500 nm 的超平坦波段且色散值都较小;随着 d_1 的增加,色散平坦波段左移且色散值变小。改变内包层空气孔直径 d_1 对此新型双包层 MOF 的色散也有影响。图 5(b), (c)分别是 $\Lambda_1 = 2.85 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.74, 0.76 \mu\text{m}$ 时的

色散曲线放大图,分别在 $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 和 $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波长范围内保持非常平坦的色散,其色散值 $D_{\text{max}} - D_{\text{min}}$ 的起伏仅为 $1 \sim 2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。图 5(d)

给出了 $\Lambda_1 = 2.85 \mu\text{m}, \Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}, d_1 = 0.74 \mu\text{m}$ 和 $d_2 = 0.69 \mu\text{m}$ 时,光纤在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处的基模模场分布图。

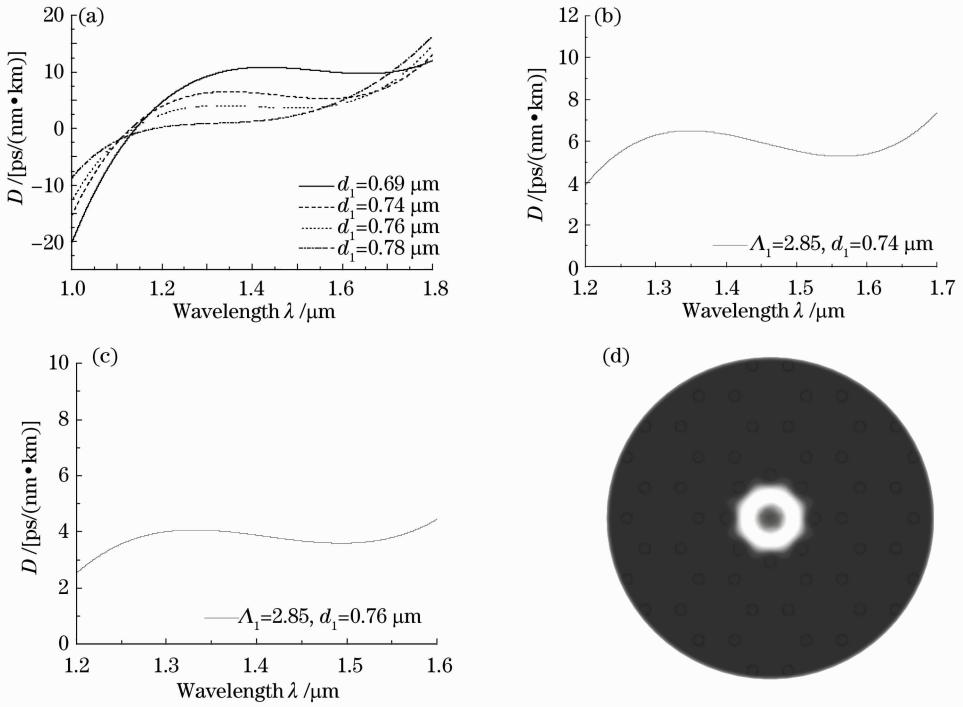


图 5 (a),(b),(c) d_1 不同时总色散随波长的变化关系; (d) $d_1 = 0.74 \mu\text{m}$ 时,光纤在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处的基模模场分布图。 $\Lambda_1 = 2.85 \mu\text{m}, d_2 = 0.69 \mu\text{m}, \Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$

Fig. 5 (a), (b), (c) Variation of dispersion with wavelength and different values are chosen for d_1 ; (d) mode field distribution map of the fundamental mode at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}, d_1 = 0.74 \mu\text{m}, \Lambda_1 = 2.85 \mu\text{m}, d_2 = 0.69 \mu\text{m}, \Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$

3.5 空气孔直径 d_1 的改变对有效模面积和损耗的影响

图 6(a)是固定内包层孔间距 $\Lambda_1 = 2.85 \mu\text{m}$,外包层空气孔直径 $d_2 = 0.69 \mu\text{m}$,外包层空气孔间距 $\Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$,内包层空气孔直径 d_1 对有效模面积的影响。可以看出,对每一个光纤结构来说,有效模面积都随波长的增加而增加;对于同一波长, d_1 越

大,模场面积就越大。图 6(b)是在图 6(a)的结构参数条件下计算出的 d_1 改变时光纤损耗随波长的变化曲线。 d_1 越大,随着波长的增大损耗越小;对每一结构参数下的光纤,其损耗都随波长的增加而增加;当 $d_1 = 0.78 \mu\text{m}$ 时,在近乎 300 nm 的波长范围内损耗保持不变。与图 5 综合分析可知,色散值越低越平坦的光纤结构,其模场面积就越大,损耗越小

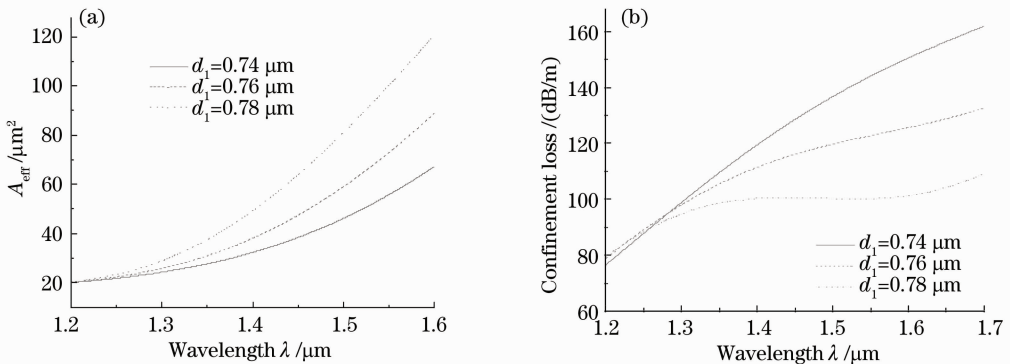


图 6 $\Lambda_1 = 2.85 \mu\text{m}, \Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}, d_2 = 0.69 \mu\text{m}$, d_1 不同时,(a)有效模面积和(b)损耗随波长的变化关系

Fig. 6 Variation of (a) mode area and (b) confinement loss with wavelength when $\Lambda_1 = 2.85 \mu\text{m}, \Lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}, d_2 = 0.69 \mu\text{m}$ and different values are chosen for d_1

且在较宽的波带范围内为恒定值。

4 结 论

提出了一种新型双包层微结构光纤,借助有限元法,对其总色散、损耗和有效模面积进行了数值计算和分析,结果发现:固定外包层结构参数,内包层空气孔中心距光纤中心的距离 Δ_1 及空气孔直径 d_1 的变化对色散曲线都有影响。经过优化,设计了当 $\Delta_2 = 2.3 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.69 \mu\text{m}$, $\Delta_1 = 2.85 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.69, 0.74, 0.76, 0.78 \mu\text{m}$ 时,在达 500 nm 的宽波带范围内色散值较小且保持非常平坦的几种大模场面积 MOF。此种光纤除对以后的理论研究和工艺制备具有一定的参考意义外,还有望在超连续谱产生、密集波分复用系统等方面做出贡献。

参 考 文 献

- 1 Philip Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 2 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica-single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 3 R. K. Sinha, S. K. Varshney. Dispersion characteristics of photonic crystal fiber[J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2003, **37**(2): 129~132
- 4 Dai Nengli, Li Yang, Peng Jinggang *et al.*. Development of dispersion-flattened photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 010602
戴能利, 李洋, 彭景刚等. 色散平坦光子晶体光纤的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(1): 010602
- 5 Liu Zhaolun, Liu Xiaodong, Li Shuguang *et al.*. Design and optimization of photonic crystal fiber with flat chromatic dispersion and large mode area [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(6): 725~732
刘兆伦, 刘晓东, 李曙光等. 大模面积色散平坦光子晶体光纤的优化设计 [J]. *半导体光电*, 2006, **27**(6): 725~732
- 6 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
- 7 Wu Jingqing, 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, 周国生等. 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
- 8 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
- 9 Wang Dan, Zheng Yi. Numerical simulation and analysis of double cladding photonic crystal fiber with flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806010
王丹, 郑义. 双包层色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806010
- 10 N. Florous, K. Saitoh, M. Koshiba. 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 transmission platforms [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2): 901~913
- 11 J. Wang, C. Jiang, W. Hua *et al.*. Modified design of photonic crystal fibers with flattened dispersion [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2006, **38**(3): 169~172
- 12 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
- 13 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
- 14 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
- 15 Li Shuting. The Numerical Simulation of Photonic Crystal Fiber [D]. Xi'an: Northwest University, 2008. 22~25
李书婷. 光子晶体光纤的数值模拟 [D]. 西安: 西北大学, 2008. 22~25
- 16 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
- 17 Zhou Peng, You Haiyang, Wang Songyou *et al.*. Effect of the inserted metal layer on the characteristic of light transmission of one-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(10): 2276~2280
周鹏, 游海洋, 王松有等. 金属插层对一维光子晶体中光传输特性的影响 [J]. *物理学报*, 2002, **51**(10): 2276~2280

栏目编辑: 谢婧