

文章编号: 0258-7025(2010)04-1068-05

八边形双包层光子晶体光纤色散特性分析

侯 宇¹ 周桂耀^{1,2} 侯蓝田^{1,2} 姜凌红¹

(¹ 燕山大学红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004
² 燕山大学亚稳材料制备技术与科学重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 提出了一种八边形双包层结构的光子晶体光纤(PCF), 并利用多极法对其色散特性进行数值模拟和分析。分析结果表明, 内包层空气孔直径 d_1 和空气孔间距 Λ 的改变对八边形双包层光子晶体光纤的色散特性影响较大, 且色散曲线随 d_1/Λ 的减小趋向平坦; 而外包层空气孔直径 d_2 的改变对其影响相对较小, 同时, 与 d_2 的数值变化密切相关, 当 d_2 与 d_1 相接近平坦时, 色散特性受其影响较大, 当 d_2 大于 d_1 的 2 倍时, 它的改变几乎不再影响光纤的色散特性。由此在 1500 nm 附近设计一种近零色散平坦光子晶体光纤。该理论结果对制备基于大功率激光用的掺杂光子晶体光纤和提高激光输出质量具有一定的借鉴作用。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 平坦色散; 多极法; 色散斜率

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.1068

Analysis of Dispersion Properties of Octagonal Structural Photonic Crystal Fiber with Double Cladding

Hou Yu¹ Zhou Guiyao^{1,2} Hou Lantian^{1,2} Jiang Linghong¹

¹ Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China
² Key Laboratory of Metastable Material Science & Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract The paper proposes octagonal structural photonic crystal fiber (PCF) with double cladding and simulated numerically its dispersion properties by the multipole method. The result shows that the dispersion properties of the octagonal structural photonic crystal fiber have large differentiation by changing Λ or d_1 . But they change slowly by changing d_2 , while they are dependent on the value of d_2 . When d_2 is small, the dispersion properties change with d_2 , but when it is larger than twice of d_1 , the dispersion properties will no longer change. According to this characteristic, a nearly zero dispersion flattened photonic crystal fiber at 1500 nm is designed. The result has good effect on preparing the doping photonic crystal fiber which is used in the high power laser and improving the laser output quality.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; flattened dispersion; multipole method; dispersion slope

1 引 言

双包层光子晶体光纤(PCF)^[1]作为高功率光纤激光器的理想介质, 具有抽运效率高、散热性能好, 特别是其模场面积和色散特性灵活可调的优点, 从而极大地提高了输出的激光质量。双包层光子晶体光纤通常由纤芯、内包层、外包层和保护层组成。抽

运光被耦合到内包层中, 所产生的激光通过纤芯经过多次振荡和放大, 从而获得大功率的单模激光输出。随着光纤激光器^[2]和光纤放大器的不断发展, 这种基于包层抽运技术的双包层光子晶体光纤引起广大科研工作者的极大兴趣。

与传统单包层光纤相比, 双包层光子晶体光纤

收稿日期: 2009-06-04; 收到修改稿日期: 2009-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(60637010)资助课题。

作者简介: 侯 宇(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤特性分析方面的研究。E-mail: 198468hy@163.com

导师简介: 周桂耀(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光子晶体光纤制备方面的研究。

E-mail: zguyao@163.com

的优点主要有以下几方面:1)提高了抽运光的耦合效率,降低了耦合难度;2)提高了可入纤的抽运功率从而可得到大的输出功率;3)对抽运光的单模特性不再要求,扩大了抽运光源的可选范围;4)具有独特的色散特性,易于调节。

传统的双包层光子晶体光纤大多是六边形结构的,虽然六边形结构的空气孔排布有利于优化色散曲线^[3],但其基模限制损耗在理论范围内已很难降低。八边形结构的空气孔排布却有利于降低这种损耗,因此,能够大大提高光纤的可应用性。在低损耗的前提下对于八边形结构的色散曲线的优化正是本文讨论的重点,通过分析内包层空气孔直径 d_1 , 孔间距 Λ 和外包层空气孔直径 d_2 对色散特性的影响,设计了一种八边形双包层结构的色散平坦光子晶体光纤,该光纤不但有优越的色散特性,在制备工艺上也非常简单,易于实现。

2 理论基础

根据多极法^[4,5],模场可以展开成 Bessel 函数的形式,其电场纵向分量在极坐标系下可以表示为

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m^{(l)} J_m(k_{\perp}^i r_l) \exp(im\phi_l) \exp(i\beta z), \quad (1)$$

在第 l 个空气孔近邻的介质中,其电场纵向分量可以表示成

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [b_m^{(l)} J_m(k_{\perp}^e r_l) + c_m^{(l)} H_m^1(k_{\perp}^e r_l)] \times \exp(im\phi_l) \exp(i\beta z), \quad (2)$$

(1)和(2)式中 $k_{\perp}^i = (k_0^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}$, $k_{\perp}^e = (k_0^2 n_e^2 - \beta^2)^{1/2}$, 空气的折射率 $n_i = 1$, n_e 为石英折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间的波数,同理可得磁场分量的表达式。

在空气孔的边界面上,利用电磁场的边界条件,可以得到关于 $a_m^{(l)}$, $b_m^{(l)}$ 和 $c_m^{(l)}$ 的表达式,进一步通过 $n_{\text{eff}} = \beta/k$, 求得光子晶体光纤的基模有效折射率 n_{eff} 。

进而可求得 PCF 的色散系数

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}[n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2}, \quad (3)$$

式中 λ 为在光纤中传输光的波长, c 为真空中的光速。在这里没有像计算传统光纤色散那样,将光纤色散分成几部分来考虑,(3)式已经把材料色散和波导色散包含在里面,所以根据(3)式可以直接求得光纤的总色散随入射光波长的变化关系。

为了进一步观察色散的变化规律,对色散求一阶导数,这样就得到了色散斜率

$$D_{\text{slope}} = \frac{dD}{d\lambda}. \quad (4)$$

3 八边形双包层光子晶体光纤的设计和数值分析

八边形双包层光子晶体光纤结构如图 1 所示,其中内包层为 3 层小空气孔,外包层为 2 层大空气孔。结构参数分别为:内包层空气孔直径 $d_1 = 0.58 \mu\text{m}$, 空气孔间距 $\Lambda = 1.89 \mu\text{m}$, 外包层空气孔直径 $d_2 = 0.78 \mu\text{m}$ 。这种结构成八边形对称,可以看作许多顶角为 45° 的等腰三角形单元绕纤芯周期性排布组合而成。与传统的六边形双包层光子晶体光纤相比,其模场形状具有更加理想的效果,接近于圆形;且在相同填充率和空气孔间距时,八边形光子晶体光纤的单模运转区域要比六边形的宽,易于进行色散补偿^[6,7]。

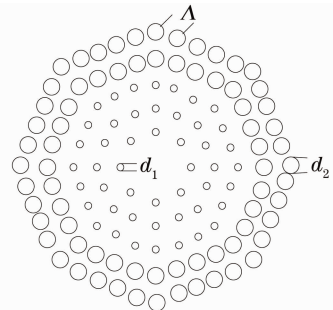


图 1 八边形双包层 PCF 的端面图

Fig. 1 Cross section of double-cladding octagonal structural PCF

3.1 内包层孔径 d_1 的改变对于色散特性的影响

当固定 $\Lambda = 1.89 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.96 \mu\text{m}$, 只改变内包层直径 d_1 的取值时,色散曲线在波长为 $1.1 \sim 1.4 \mu\text{m}$ 之间变得陡峭,而在波长大于 $1.4 \mu\text{m}$ 时色散曲线又趋于平坦,色散曲线的最高点和最低点逐渐向长波长方向移动,如图 2(a)所示;当 $d_1/\Lambda = 0.305$ 时色散曲线最为平坦,且具有双零色散特性。4 条色散曲线整体成阶梯状分布,表明改变内包层空气孔直径 d_1 对八边形双包层光子晶体光纤的色散有较强的影响。由图 2(b)可知,色散斜率^[8,9]也是由陡峭变为平坦并随着 d_1/Λ 的增大逐渐趋向零点,这正好与色散曲线相吻合,且在 $1.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 之间图形变化明显,这正是由内包层空气孔直径 d_1 的变化引起的。

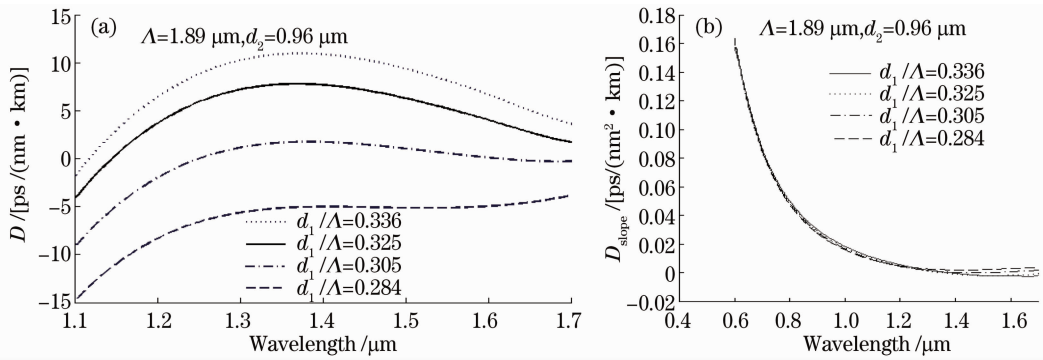


图 2 $d_1/\Lambda=0.336, 0.325, 0.305, 0.284$ 时, 基模色散系数(a)和色散斜率(b)随波长的变化

Fig. 2 When $d_1/\Lambda=0.336, 0.325, 0.305, 0.284$, the simulated results about dispersion coefficient of the fundamental mode. (a) and the dispersion slope (b) as a function of wavelength

3.2 色散随孔间距 Λ 的变化关系

当 $d_1 = 0.60 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.96 \mu\text{m}$, $\Lambda = 1.89, 1.53, 1.30 \mu\text{m}$ 时, 色散曲线在短波长方向变得极为陡峭, 且随着 Λ 的值由小变大而逐渐趋于平坦, 零色散点也随之向长波长方向移动, 如图 3(a) 所示。与图 2(a) 中的色散曲线相比, 改变孔间距时曲线变

化更加明显, 说明无论是改变孔间距 Λ 还是改变内包层孔径 d_1 都能对八边形双包层光子晶体光纤的色散特性产生较大影响, 且改变孔间距 Λ 产生的变化更为明显。同时两种方法都能使其零色散点向长波长方向移动, 即光纤的色散平坦区域向长波长方向移动。

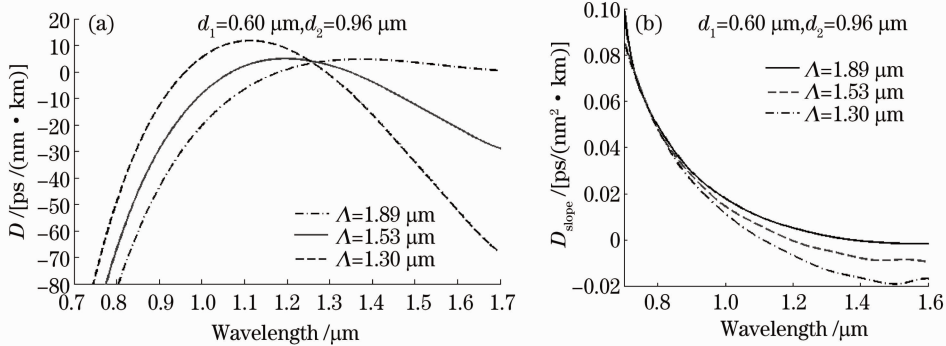


图 3 当 $\Lambda=1.89, 1.53, 1.30 \mu\text{m}$ 时基模色散系数(a)和色散斜率(b)随波长的变化

Fig. 3 When $\Lambda=1.89, 1.53, 1.30 \mu\text{m}$, the simulated results about dispersion coefficient of the fundamental mode (a) and the dispersion slope (b) as a function of wavelength

从图 3(b) 可知, 色散斜率的变化也较为明显, 保持内包层孔径 d_1 不变, 随着孔间距的减小, 其对应的色散斜率也逐渐减小。其中当 $\Lambda = 1.53 \mu\text{m}$ 时, 色散曲线最为平坦, 色散斜率的绝对值最小, 且为负值, 这有利于对光纤进行色散补偿。

3.3 外包层孔径 d_2 的改变对于色散特性的影响

图 4(a) 为孔间距 $\Lambda = 1.89 \mu\text{m}$ 和内包层孔径 $d_1 = 0.58 \mu\text{m}$ 不变时, 色散曲线随外包层孔径 d_2 变化的曲线图。从图中可以看到, 色散曲线在 d_2 值较小时(与 d_1 相差不多), 色散曲线变化比较明显, 最高点和最低点同时向长波长方向移动。但随着 d_2 值

的增大, 色散曲线的变化变得比较平缓, 4 条曲线纵向间距逐渐减小, 即对色散曲线的影响变小, 当它增大到一定程度, 大约为内包层孔径的 2 倍时, 外包层孔径 d_2 的变化对色散特性的影响将趋于稳定。

图 4(b) 为所对应的色散斜率随波长的变化图, 从图中也可以看到, 4 条曲线基本重合, 色散斜率的绝对值也相差很小, 这也说明外包层孔径 d_2 的变化对色散特性的影响是逐渐减弱的, 这为以后设计双包层光子晶体光纤提供了一定便利, 只要设计好内包层的形状和结构参数, 再匹配上合适的外包层即可。

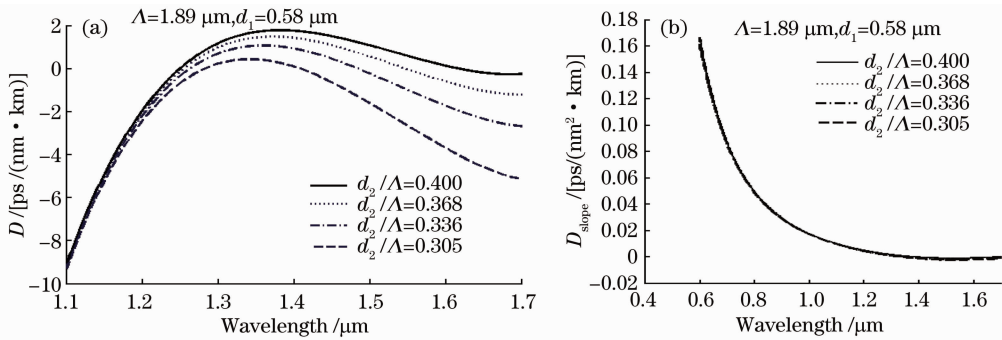


图4 $d_2/\Lambda=0.400, 0.368, 0.336, 0.305$ 时基模色散系数(a)和色散斜率(b)随波长的变化

Fig. 4 When $d_2/\Lambda=0.400, 0.368, 0.336, 0.305$, the simulated results about dispersion coefficient of the fundamental mode (a) and the dispersion slope (b) as a function of wavelength

4 1550 nm 附近色散平坦八边形双包层光子晶体光纤的设计

由第3节的分析可知,可以通过调节八边形双包层光子晶体光纤的内包层孔径 d_1 和孔间距 Λ 来设计出不同波段具有平坦色散特性的光子晶体光纤。同时由于八边形结构自身的空气孔排布特点,可以严格地控制其限制损耗(即由于结构参数的设计而造成的损耗)。通过多极法模拟,图5给出了所设计的光纤色散曲线图,结构参数为:内包层孔径 $d_1=0.55 \mu\text{m}$,外包层孔径 $d_2=1.18 \mu\text{m}$,空气孔间距 $\Lambda=1.70 \mu\text{m}$ 。其在 $1.4\sim 1.7 \mu\text{m}$ 的波长区间,色散图形平坦^[10,11],且具有双零色散的特点^[12,13],2个零色散点与只有1个零色散点情况不同,具有2个零色散点的光子晶体光纤由于相位匹配条件而在长波长和短波长处产生非孤子辐射,从而使得超短脉冲的光谱能量能够展宽到3个倍频程,也能够优化超连续光谱的产生和抑制孤子的自频移现象^[14],而且该色散曲线图中的1个零色散点恰好在1550 nm附近。图6为八边形双包层光子晶体光纤

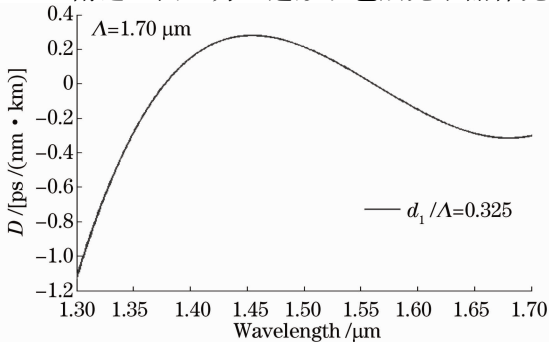


图5 基模色散系数随波长的变化关系

Fig. 5 Simulated results about dispersion coefficient of the fundamental mode as a function of wavelength

限制损耗随波长变化的曲线图。从图中可以看出,在 $1.3\sim 1.4 \mu\text{m}$ 的波长区间,限制损耗几乎为0(这不包括在拉制过程或使用过程中造成的损耗,只是由于结构参数的设定引起的损耗值),在波长大于 $1.4 \mu\text{m}$ 时损耗曲线有所上扬,在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处最大约为 0.04 dB/km ,这已远远小于传统的双包层光纤的限制损耗。

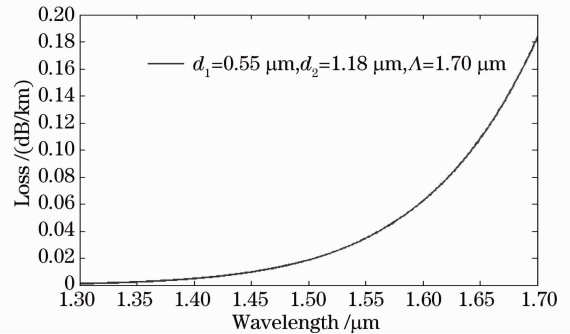


图6 限制损耗随波长的变化关系

Fig. 6 Simulated results about the loss of the PCF as a function of wavelength

5 结 论

对于八边形双包层光子晶体光纤,内包层空气孔直径 d_1 ,孔间距 Λ 对其色散曲线影响明显,可以通过调节取值来获取期望的色散特性。而外包层空气孔直径 d_2 对色散特性的影响取决于它的大小和空气孔的层数^[15],以5层为例,当 d_2 与 d_1 相差较小时,色散特性受其影响,但变化相对平缓;而当 d_2 增大到一定程度,大约为内包层空气孔直径的2倍时,其对色散特性的影响也就趋于稳定,色散曲线不再随其变化而发生大的波动。根据这一结构特点设计了一种在1550 nm附近色散近零平坦的八边形双包层光子晶体光纤,在 $1.3\sim 1.7 \mu\text{m}$ 的波长区间还

具有双零色散的特性,且由于八边形结构的独特空气孔排布,使得其限制损耗得到了很好的控制,在 $1.3\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 的波长区间,损耗很小。

参 考 文 献

- 1 Li Jinyan, Li Shiyu, Li Haiqing *et al.*. Research of microstructure double-cladding ytterbium doped fiber[J]. *Study on Optical Communications*, 2005, **25**(1): 47~50
李进延,李诗愈,李海清等. 微结构掺镱双包层光纤的研究[J]. 光通信研究, 2005, **25**(1): 47~50
- 2 Th. Weber, W. Lüthy, H. P. Weber *et al.*. A longitudinal and side-pumped single transverse mode double-clad fiber laser with a special silicone coating[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**: 99~104
- 3 Wang Wei, Hou Lantian, Zhou Guiyao. Design of low loss nearly zero dispersion flattened photonic crystal fiber with double cladding[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(5): 054204
- 4 T. P. White, B. T. Kuhlmey, R. C. McPhedran *et al.*. Multipole method for microstructured optical fibers. I. formulation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2322~2330
- 5 Li Qiuju, Fan Haitao, Tang Rongxia *et al.*. The study of relationship between dispersion property and structure of photonic crystal fibers[J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(4): 52~53
李秋菊,范海涛,唐容霞等. 光子晶体光纤色散特性与结构关系的研究[J]. 激光杂志, 2007, **28**(4): 52~53
- 6 S. M. Abdur Razzak, Yoshinori Namihira. Proposal for highly nonlinear dispersion-flattened octagonal photonic crystal fibers [J]. *IEEE J. Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(4): 249~251
- 7 Tan Xiaoling, Geng Youfu, Wang Peng *et al.*. Propagation properties of the octagonal photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(5): 729~733
谭晓玲,耿优福,王 鹏等. 八角格子光子晶体光纤的传输特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 729~733
- 8 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
- 9 Wei Dongbin, Zhou Guiyao, Zhao Xingtao *et al.*. A new analysis method of multi-cladding photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(5): 3011~3015
魏东宾,周桂耀,赵兴涛等. 一种新型的多包层光子晶体光纤的分析方法[J]. 物理学报, 2008, **57**(5): 3011~3015
- 10 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
- 11 Su Yanfeng, Hu Minglie, Wang Qingyue. Calculation and design of photonic crystal fibers with zero-dispersion wavelength at 800 nm. [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 427~430
粟岩锋,胡明列,王清月. 800 nm处为零色散的光子晶体光纤的计算[J]. 中国激光, 2003, **30**(5): 427~430
- 12 Qiu Juncai, Liu Hankui, Tian Xiaoxing *et al.*. Numerical analysis of ultra-flatten and near-zero dispersion for photonic crystal fibers[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(3): 407~410
邱俊才,刘汉奎,田小兴等. 近零超平坦色散光子晶体光纤的数值分析[J]. 半导体光电, 2008, **29**(3): 407~410
- 13 Liu Zhaolun, Wang Wei, Hou Lantian *et al.*. Modified design and characteristics analysis of broadband flat-dispersion photonic crystal fiber[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **25**(1): 104~107
刘兆伦,王 伟,侯蓝田等. 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, **25**(1): 104~107
- 14 R. K. Sinha, Shailendra K. Varshney. Dispersion properties of photonic crystal fibers[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, **37**(2): 129~132
- 15 Du Hailong, Zheng Yi, Li Kun *et al.*. Analysis of dispersion properties of photonic crystal fibers by multipole method[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(2): 161~164
杜海龙,郑 义,李 坤等. 光子晶体光纤色散特性的多极法研究[J]. 激光与红外, 2008, **38**(2): 161~164