

# 1.55 $\mu\text{m}$ 波长处具有高非线性低限制损耗的八边形 实心光子晶体光纤

马依拉木·木斯得克 姚建铨 陆颖

(天津大学精仪学院激光与光电子研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 为了得到高非线性低损耗光子晶体光纤, 设计了八角格子圆形空气孔组成的光子晶体光纤结构。利用全矢量有限元法并结合完美匹配层吸收边界条件, 对该光子晶体光纤的纤芯材料折射率、非线性系数和限制损耗进行了数值模拟。数值模拟结果表明, 该光纤呈现高非线性、低损耗和较好的模场约束能力。调整光纤参数为  $d_1 = 0.77 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 0.86 \mu\text{m}$  时可以得到更好的结果, 在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处获得高的非线性系数  $37.6 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  和低限制损耗  $0.7 \times 10^{-17} \text{ dB/km}$ 。

**关键词** 光子晶体光纤; 有效模面积; 模场分布; 高非线性; 低限制损耗

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.040601

## Solid-Core Octagonal Photonic Crystal Fiber with High Nonlinearity and Low Confinement Loss at 1.55 $\mu\text{m}$ Wavelength

Mayilamu · Musideke Yao Jianquan Lu Ying

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** Aiming at the requirements of high nonlinearity with low confinement loss of photonic crystal fiber (PCF), we design an octagonal circular-air-holes structure of PCF. Based on full vector finite element method with the boundary condition of perfectly matched layers, its effective index, nonlinear coefficient and confinement loss are numerically investigated. The numerical results indicate that the proposed fiber shows higher nonlinearity, lower confinement loss and stronger confinement ability of mode-field profile. A better result can be gotten when adjusting the parameters of PCF with  $d_1 = 0.77 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 0.86 \mu\text{m}$ . The high nonlinear coefficient of  $37.6 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  and low confinement loss of  $0.7 \times 10^{-17} \text{ dB/km}$  are found at  $1.55 \mu\text{m}$  wavelength.

**Key words** photonic crystal fiber; effective mode area; mode-field profile; high nonlinearity; low confinement loss

**OCIS codes** 060.4370; 190.4370; 060.2310

## 1 引言

光子晶体光纤(PCF)自问世以来, 由于具有单模传输<sup>[1]</sup>、可调色散<sup>[2]</sup>、大模场面积(LAM)<sup>[3]</sup>、高双折射<sup>[4]</sup>和低损耗<sup>[5]</sup>等传统光纤所不具备的独有特性, 吸引了越来越多研究小组的兴趣。在各种光子晶体光纤中, 高非线性光子晶体光纤(HNPCF)是发展最成熟、应用最广泛的一种类型, 目前已应用于光通信<sup>[6]</sup>、非线性光学<sup>[7,8]</sup>、传感技术<sup>[9]</sup>、光开关<sup>[10~12]</sup>和超连续谱产生<sup>[13,14]</sup>等领域。PCF的非线性系数可以达到普通光纤的几十倍, 因此利用HNPCF可以获得小巧、紧凑的光通信器件, 从而提高系统的稳定性和可靠性。随着光纤拉制技术的改进, 考虑到空气孔排列的可控性, 研究人员根据需要设计了不同排列的PCF, 如六边形排列<sup>[15]</sup>、四方排列<sup>[16]</sup>和八边形

**收稿日期**: 2012-11-20; **收到修改稿日期**: 2013-01-05; **网络出版日期**: 2012-03-08

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB327801)资助课题。

**作者简介**: 马依拉木·木斯得克(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事激光器 and 光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: mahira\_laser@yahoo.cn

**导师简介**: 姚建铨(1939—), 男, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子方面的研究。

E-mail: jqyao@tju.edu.cn

排列<sup>[17]</sup> PCF 等,这些结构显示了其各自的优越性。为了实现 HN-PCF,目前已经有了—些相关的研究和报道。在 1.55  $\mu\text{m}$  波长处,2004 年 Saitoh 等<sup>[18]</sup>提出了渐变的空气孔孔径模型,获得了  $30 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  的高非线性系数,大大提高了光子晶体光纤的非线性。2007 年,吴铭等<sup>[15]</sup>获得了  $31.67 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  的高非线性系数;2008 年,Razzak 等<sup>[19]</sup>获得了  $27 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  的高非线性系数;2011 年,张少华等<sup>[6]</sup>获得了  $36.2 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  的高非线性系数。光子晶体的制备有一定的难度,因为光子晶体的晶格尺度和光的波长具有相同的数量级,例如:对于光通信波段(波长 1.55  $\mu\text{m}$ ),要求光子晶体的晶格在 0.5  $\mu\text{m}$  左右。近年来,在人们不断探索和试验的过程中,出现了许多可行的人工制备方法,如介质棒堆积、精密机械钻孔、胶体颗粒自组织生长、胶体溶液自组织生长和半导体工艺等。用这些方法,通过人工地控制光子晶体中介电材料之间介电常数的配比和光子晶体的周期性微结构,可以制备出带有各种带隙的光子晶体。本文通过调整 PCF 的结构参数,优化设计了一种八边形排列的光子晶体光纤,能够同时得到高非线性和低损耗。

由于复杂的光线结构,不同的数值模拟方法已被用来研究光纤的不同性质,如有限元法、改进的有效折射率法、时域有限差分法、平面波展开法和多级法等。在这些方法中,有限元法因为在宽波长范围内需要的计算时间和计算内存较少并能提供准确的计算结果而最适合计算非线性系数和损耗。

本文在不同光纤结构下利用有限元法对 PCF 的非线性系数和低损耗进行数值模拟。仿真结果表明,这种光纤能得到高非线性系数和较低的损耗。

## 2 光子晶体光纤结构

图 1 给出了包层为 4 圈的高非线性八边形光子晶体光纤(HN-OPCF)的横截面图。石英玻璃作为光纤结构的背景材料( $n=1.45$ ),包层是由八角格子空气孔排列组成的。空气孔间距为  $\Lambda$ (相邻的两个空气孔的中心间距),最外层空气孔的直径为  $d$ ,第三层和第二层的空气孔直径为  $d_2$ ,最内层的空气孔直径为  $d_1$ 。图 1 给出了空间间距  $\Lambda=1.5 \mu\text{m}$ ,空气孔直径  $d=1.05 \mu\text{m}$ , $d_1=0.75 \mu\text{m}$ , $d_2=0.84 \mu\text{m}$  的 HN-OPCF,将该结构称作 HN-OPCF1。为了提高非线性系数和减小限制损耗,保持空间间距不变( $\Lambda=1.5 \mu\text{m}$ )将第三层、第二层和最内层的空气孔直径分布变为  $d_2=0.86 \mu\text{m}$ , $d_1=0.77 \mu\text{m}$ ,此结构称为 HN-OPCF2。

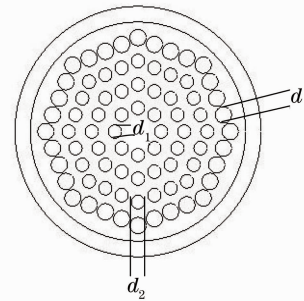


图 1 HN-OPCF 横截面图

Fig. 1 Transverse section of the proposed HN-OPCF with

## 3 基本理论

为了对新设计光纤进行数值模拟,采用有限元法<sup>[20]</sup>并结合完美匹配层吸收边界条件。根据 Maxwell 方程,有限元法的基本方程为

$$\nabla \times (|\mu_r|^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

式中  $E$  为电场强度, $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  分别为介质相对介电常数和相对磁导率。采用有限元法分析光子晶体光纤时,为了精确模拟空气孔边界,常选取线混合边界或节点为模拟元胞,将光纤端面分成很多元胞,利用(1)式对这些元胞进行求解,可以得到元胞的本征值方程,即

$$\mathbf{K}\mathbf{E} = k_0^2 n_{\text{eff}}^2 \mathbf{M}\mathbf{E}, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{K}$  和  $\mathbf{M}$  为有限元矩阵, $\mathbf{E}$  是由边界和节点组成的离散化电场强度矢量, $n_{\text{eff}}$  为有效折射率。根据  $\mathbf{K}$  和  $\mathbf{M}$  的稀疏矩阵属性对本征值方程进行求解,得到所设计光纤的基膜有效折射率  $n_{\text{eff}}$ 。

光子晶体光纤的非线性系数表示为<sup>[21,22]</sup>

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

式中  $n_2$  为背景材料石英的非线性折射率, $n_2=3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ , $\omega_0$  为角频率, $c$  为真空中的光速, $\lambda$  为波长, $A_{\text{eff}}$  为光纤基膜的有效面积。有效面积是光子晶体光纤特性中的一个重要物理量,可以作为非线性特性的指

标之一,因为有效模场面积的大小将直接影响非线性效应。光纤基模的  $A_{\text{eff}}$  定义为<sup>[23,24]</sup>

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

式中  $\mathbf{E}$  为横电场矢量,  $S$  为光纤的横截面。

损耗是光子晶体光纤实用化的另一个重要参量,降低损耗是光子晶体光纤制备的首要问题。限制损耗是指限制纤芯范围的光信号能力。由于限制损耗,光信号将随着传播距离被削弱。限制损耗由基模有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的虚部来计算并表示为<sup>[25]</sup>

$$L_c = \frac{40\pi}{\lambda \ln 10} \text{Im } n_{\text{eff}} = 8.686 \text{Im } n_{\text{eff}}, \quad (5)$$

式中  $\text{Im } n_{\text{eff}}$  是有效折射率的虚部,  $L_c$  的单位为 dB/m。

## 4 结果与讨论

利用有限元法分析所设计的光子晶体光纤的特征并用 Matlab 软件处理数据。波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时,不同光子晶体光纤结构(HN-OPCF1 和 HN-OPCF2)的基模模场分布的二维,三维图分别如图 2(a),(b)所示。从图中可以看到两种光纤的基模模场分布基本上集中在光纤中心,也就是说 PCF 对光波有很好的限制作用。对比两个基模模场分布可以看出增加  $d_2$  和  $d_1$  模场分布更集中。

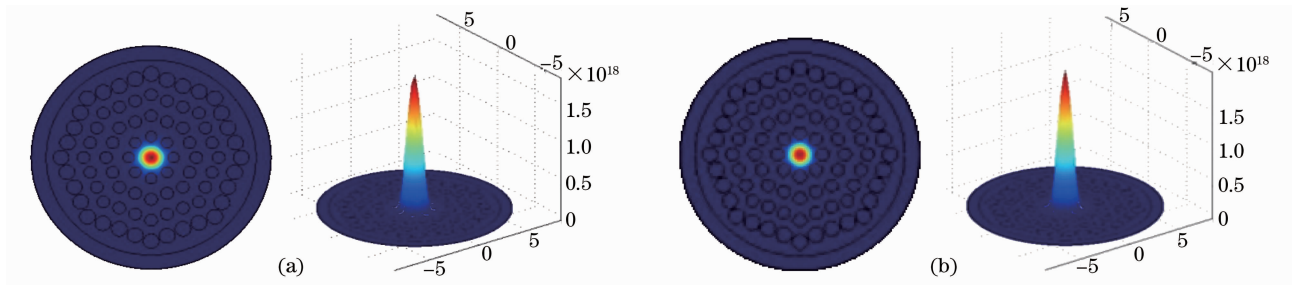


图 2 不同结构光子晶体光纤的模场分布。(a)  $d_1=0.75 \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.84 \mu\text{m}$ ; (b)  $d_1=0.77 \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.86 \mu\text{m}$

Fig. 2 Mode field profile under different structures of photonic crystal fiber.

(a)  $d_1=0.75 \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.84 \mu\text{m}$ ; (b)  $d_1=0.77 \mu\text{m}$ ,  $d_2=0.86 \mu\text{m}$

利用有限元法分析了有效折射率和波长的关系,如图 3 所示。从图中可以看出,光纤的有效折射率随着波长的增加而减小且对于一个给定的波长,HN-OPCF1 的有效折射率大于 HN-OPCF2。这里有效折射率减小的原因是通过增加  $d_1, d_2$  增加了空气孔的占空比。

图 4 给出了两种不同结构光纤的有效模场面积,从图中可以看到,光纤的有效模场面积随着波长的增加而增加(基本上是线性趋势)。但同样的操作波长下,有效模场面积随着空气孔的变大而减小。OPCF1 的有

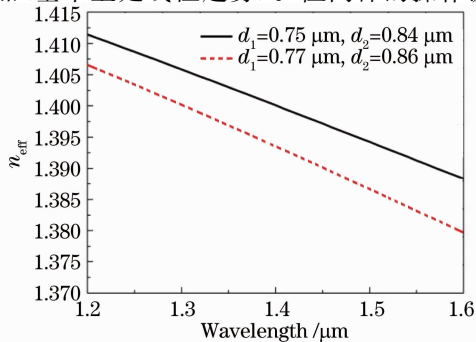


图 3 有效折射率和波长的关系

Fig. 3 Relation between the effective refractive index and wavelength

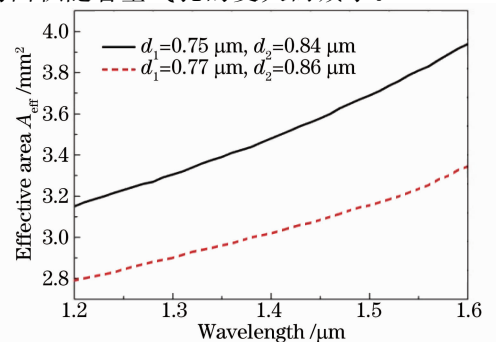


图 4 有效模场面积和波长的关系

Fig. 4 Relation between the effective mode-field area and wavelength

效模场面积大于 OPCF2 的有效模场面积。在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , OPCF1 和 OPCF2 的有效模场面积分别为  $3.81 \mu\text{m}^2$  和  $3.235 \mu\text{m}^2$ 。这说明  $d_1$  和  $d_2$  是影响有效模场面积的重要因素。

图 5 给出了非线性系数随着波长的变化曲线,非线性系数  $\gamma$  用方程(3)求得。从图中可以看到非线性系数随着波长的增加而减小,这是因为有效模场面积随波长增加且与非线性系数成反比。在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处,当  $d_1 = 0.75 \mu\text{m}, d_2 = 0.84 \mu\text{m}$  时  $\gamma = 31.9 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ ; 当  $d_1 = 0.77 \mu\text{m}, d_2 = 0.86 \mu\text{m}$  时  $\gamma = 37.6 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 。此外,这些非线性系数大于普通光纤的非线性系数,可以用于光学系统尤其是光纤通讯网络。

为了分析限制损耗随结构参数的变化规律,用(5)式计算了空气孔  $d_1, d_2$  不同时基模的限制损耗,得到的结果如图 6 所示。从图中可以看出,限制损耗随着波长的增加而增加,当包层空气孔的占空比变大时,限制损耗变小。这是因为,当空气孔的占空比变大时,较大的空气孔更容易阻止光能的泄漏,也会使限制损耗变小。在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处,当  $d_1 = 0.75 \mu\text{m}, d_2 = 0.84 \mu\text{m}$  时,限制损耗为  $1.5 \times 10^{-17} \text{ dB/km}$ ; 当  $d_1 = 0.77 \mu\text{m}, d_2 = 0.86 \mu\text{m}$  时,限制损耗为  $0.7 \times 10^{-17} \text{ dB/km}$ 。这对于信号传输是很有利的。

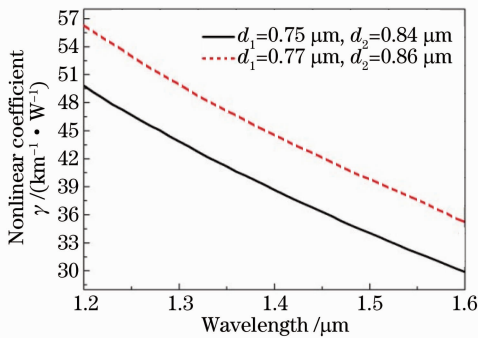


图 5 非线性系数和波长的关系

Fig. 5 Relation between the nonlinear coefficient and wavelength

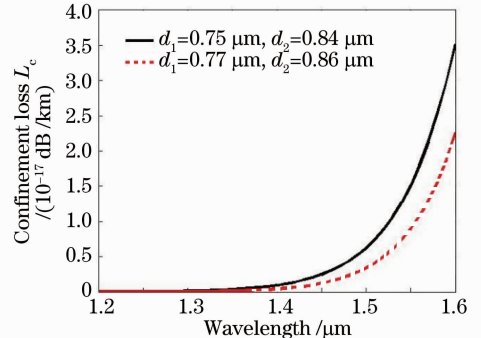


图 6 限制损耗和波长的关系

Fig. 6 Relation between the confinement loss and wavelength

## 5 结 论

设计了一种新型光子晶体光纤结构,该光纤由 4 圈大小不同的八角格子圆形空气孔组成。利用全矢量有限元法并结合完美匹配层吸收边界条件,对该光子晶体光纤的纤芯材料折射率、非线性系数和限制损耗进行了数据模拟。分析了波长与结构参数对这些光纤特性的影响。数据模拟结果表明,该光纤呈现高非线性、低损耗和较好的模场约束能力。调整光纤参数为  $d_1 = 0.77 \mu\text{m}, d_2 = 0.86 \mu\text{m}$  时得到更好的结果,在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处的非线性系数为  $\gamma = 37.6 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ ,限制损耗为  $0.7 \times 10^{-17} \text{ dB/km}$ 。本文构造的 PCF 在非线性和基模模场、低损耗等方面具有优越的特性。这种光纤可以用于非线性光学、传感技术、光开关和超连续谱产生等领域。

## 参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. J. St. Russell. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
  - 2 W. H. Reeves, J. C. Knight, P. J. St. Russell *et al.*. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(14): 609~613
  - 3 N. A. Mortensen, M. D. Nielsen, J. R. Folkenberg *et al.*. Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6): 393~395
  - 4 A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth *et al.*. Highly birefringent photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18): 1325~1327
  - 5 Ming Chen, Shizhong Xie. New nonlinear and dispersion flattened photonic crystal fiber with low confinement loss[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(8): 2073~2076
  - 6 Zhang Shaohua, Yao Jianquan, Lu Ying *et al.*. Highly nonlinear photonic crystal fibers with ultra-flattened chromatic dispersion and low confinement loss[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(12): 120605
- 张少华,姚建铨,陆颖等.李敬辉超平坦色散和低损耗的高非线性光子晶体光纤[J].激光与光电子学进展,2011,

- 48(12): 120605
- 7 Cui Liang, Li Xiaoying, Zhao Ningbo. Dispersion property measurement of photonic crystal fiber by using spontaneous four wave mixing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0118002  
崔亮, 李小英, 赵宁波. 利用自发四波混频测量光子晶体光纤色散[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0118002
- 8 Zhao Junfa, Yang Xiufeng, Li Yuan *et al.*. Stimulated Brillouin scattering slow light in photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2437~2440  
赵军发, 杨秀峰, 李元等. 光子晶体光纤中受激布里渊散射慢光研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2437~2440
- 9 Chen Yixin, Zhao Chunliu, Liu Xing *et al.*. Research and development of optical fiber sensors based on photonic crystal fiber loop mirrors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(1): 010005  
陈益新, 赵春柳, 刘星等. 基于光子晶体光纤环境的光纤传感器的研究及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(1): 010005
- 10 Yang Guangqiang, Zhang Xia, Ren Xiaomin *et al.*. Experimental research on all-optical switch based on photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1650~1653  
杨广强, 张霞, 任晓敏等. 基于光子晶体光纤的全光开关实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(12): 1650~1653
- 11 Yang Hui, Wang Zhiyong, Zhang Wei *et al.*. Properties of all-optical switch based on two-dimensional nonlinear photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1016003  
杨辉, 王智勇, 张伟等. 基于二维非线性光子晶体的全光开关特性[J]. 光学学报, 2012, **32**(10): 1016003
- 12 Li Shaohui, Yang Aiyong, Cui Jianmin *et al.*. A study on all-optical switch using nonlinear optical loop mirror based on photonic crystal fiber[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, **29**(2): 137~141  
李少晖, 杨爱英, 崔建民等. 基于光子晶体光纤非线性环路镜光开关的研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, **29**(2): 137~141
- 13 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin *et al.*. Dual-wavelength pumped supercontinuum generation in tapered photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0206001  
奚小明, 陈子伦, 孙桂林等. 双波长抽运拉锥光子晶体光纤产生超连续谱研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0206001
- 14 Liu Weihua, Song Xiaozhong, Wang Yishan *et al.*. Experimental research of supercontinuum generation by femtosecond pulse in highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 917~922  
刘卫华, 宋啸中, 王屹山等. 飞秒激光脉冲高非线性光子晶体光纤中产生超连续谱的实验研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(2): 917~922
- 15 Wu Ming, Liu Hairong, Huang Dexiu. Analysis of nonlinear coefficient of highly nonlinear photonic crystal fibers[J]. *Study on Optical Communications*, 2007, **33**(5): 44~47  
吴铭, 刘海荣, 黄德修. 高非线性光子晶体光纤非线性系数的分析[J]. 光通信研究, 2007, **33**(5): 44~47
- 16 A. H. Bouk, A. Cucinotta, F. Poli *et al.*. Dispersion properties of square-lattice photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5): 941~946
- 17 Chen Jing, Tan Xiaoling. Study on the mode and dispersion properties of octagonal photonic crystal fibers[J]. *Study on Optical Communications*, 2009, **35**(2): 46~49  
陈静, 谭晓玲. 八角格子光子晶体光纤模式和色散特性研究[J]. 光通信研究, 2009, **35**(2): 46~49
- 18 K. Saitoh, M. Koshiba. Highly nonlinear dispersion-flattened photonic crystal fibers for supercontinuum generation in a telecommunication window[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(10): 2027~2032
- 19 S. M. Abdur Razzak, Yoshinori Namihira. Proposal for highly nonlinear dispersion-flattened octagonal photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(4): 249~251
- 20 F. Brechet, J. Marcou, D. Pagnoux *et al.*. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers, by the finite element method[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2000, **6**(2): 181~191
- 21 Shuqin Lou, Hong Fang, Honglei Li. Design of broadband nearly-zero flattened dispersion highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 821~823
- 22 Wu Ming, Liu Hairong, Huang Dexiu. Dispersion Property in Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber[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
- 23 Niels Asger Mortensen. Effective area of photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7): 341~348
- 24 Wang Wei, Yang Bo, Song Hongru *et al.*. Characteristic analyses of high birefringence and two zero dispersion points photonic crystal fiber with octagonal lattices[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(14): 144601  
王伟, 杨博, 宋鸿儒等. 八边形高双折射双零色散点光子晶体光纤特性分析[J]. 物理学报, 2012, **61**(14): 144601
- 25 Yoshinori Namihira, Jingjing Liu, Taito Koga *et al.*. Design of highly nonlinear octagonal photonic crystal fiber with near-zero flattened dispersion at 1.31  $\mu\text{m}$  waveband[J]. *Opt. Rev.*, 2011, **18**(6): 436~440