

超平坦色散和低损耗的高非线性光子晶体光纤

张少华¹ 姚建铨¹ 陆颖¹ 徐德刚¹ 李敬辉²¹天津大学精仪学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)
²天津大学仁爱学院计算机科学与技术系, 天津 301636

摘要 设计了一种新型的光子晶体光纤(PCF),使其能同时实现高非线性,超平坦色散和低损耗。通过基于全矢量有限元算法的模拟软件 COMSOL,分析加了各向异性完美匹配层的八层空气孔光子晶体光纤的有效模场面积,色散特性以及光纤的限制损耗。数值模拟结果指出在波长 1.55 μm 处可获得 $36.2 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的高非线性系数。在 1.37~1.70 μm 共 330 nm 波长范围内,光子晶体光纤的色散值可达到 $(0.3 \pm 0.3) \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,同时限制损耗在 1.37~1.62 μm 波长范围始终低于 0.1 dB/km。

关键词 非线性光学;光子晶体光纤;高非线性;超平坦色散;低损耗

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.120605

Highly Nonlinear Photonic Crystal Fibers with Ultra-flattened Chromatic Dispersion and Low Confinement Loss

Zhang Shaohua¹ Yao Jianquan¹ Lu Ying¹ Xu Degang¹ Li Jinghui²

¹Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
²Department of Computer Science and Technology, College of RenAi, Tianjin University, Tianjin 301636, China

Abstract A novel design of Photonic Crystal Fiber (PCF) was present in order to simultaneously achieve high nonlinearity, ultra-flattened dispersion, and low confinement loss. The software COMSOL based on finite element method with anisotropic perfectly matched layers is used to analyze the effective mode area, dispersion properties, and confinement loss of PCF with eight-ring air holes. Numerical results show that a small effective mode area corresponding to a high nonlinear coefficient of the order $36.2 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ at 1.55 μm wavelength is obtained. Moreover, ultra-flattened dispersion of $(0.3 \pm 0.3) \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ is also obtained over 330 nm bandwidth from 1.37 μm to 1.70 μm with low confinement losses less than 0.1 dB/km within the band of 1.37 μm to 1.62 μm .

Key words nonlinear optics; photonic crystal fibers; high nonlinearity; ultra-flattened dispersion; low confinement loss

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.2330

1 引言

目前,折射率引导型光子晶体光纤(PCF)(也称作空气孔光纤)引起了人们越来越多的关注。由于空气孔光纤的周期性排列的包层中包含了微米量级的空气孔,这样就增强了设计的灵活性,从而实现对光子晶体光纤的非线性、色散和限制损耗的有效控制^[1~6]。拥有这些优越特性的光子晶体光纤可以应用到很多方面,譬如:通信系统,光学参量放大,全光信号处理,在红外波段产生超连续谱以及四波混频效应^[7~11]。为了实

收稿日期: 2011-06-30; 收到修改稿日期: 2011-08-17; 网络出版日期: 2011-10-13

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)资助课题。

作者简介: 张少华(1986—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤性能及其应用等方面的研究。

E-mail: shz19860603@sina.com

导师简介: 姚建铨(1939—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事光电子方面的研究。E-mail: jqyao@tju.edu.cn

现高非线性的光子晶体光纤(HNL-PCF),目前已经有了一些相关的研究和报道。首先,具有相同空气孔孔径的光子晶体光纤可以实现高非线性,然而这类型光子晶体光纤由于其小的纤芯和大的空气孔孔径,导致零色散波段向短波长移动,从而很难在通信波段发挥作用^[12]。鉴于上述情况,Saitoh等^[13,14]提出了渐变的空气孔孔径模型,分别获得了 $30 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $44 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的高非线性系数,大大地提高了光子晶体光纤的非线性。但是,四层或五层渐变的空气孔孔径给设计和加工带来了额外的困难,可能会限制这类型光纤在实际中的应用。上面提到的是一些六角形排列的圆形空气孔光子晶体光纤,Razzak等^[9,15]提出了八角形排列的光子晶体光纤,分别获得了 $27 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $35 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的高非线性系数;Zhang等^[16]设计了具有椭圆形空气孔的压缩光子晶体光纤,并且在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处实现了 $150 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的高非线性系数,但是该种光子晶体光纤色散很不平坦,而且需要20层空气孔来降低其限制损耗,这给实际加工带来了很大的困难。

基于上述情况,本文提出了一种新颖的光子晶体光纤,能够同时获得高非线性、超平坦色散和低的限制损耗。

2 设计原理与理论分析

图1给出了光子晶体光纤的断面截面图,该图详细地描述了获得八层高非线性光子晶体光纤的过程。本设计最根本的出发点在于先设计等间距的八层空气孔圆环,然后将每层圆环上的空气孔沿该圆环的内接六边形的每条边对应地做镜像对称,这样就将圆环上的空气孔对称到里面来,从而得到要求的光子晶体光纤。这种光子晶体光纤可以很好地控制光纤的波导色散与材料色散的匹配,从而在很长的波段范围内很好地实现超平坦零色散特性。除此之外,该光子晶体光纤可以实现小模场面积,进而实现高非线性,同时还可以很好地控制限制损耗,不影响信号在光子晶体光纤中的传输。图2给出了模拟计算用的光子晶体光纤的横截面图。其中第1层空气孔的直径为 d_1 ,第2层为 d_2 ,其他层为 d ,空气孔间距为 Λ 。

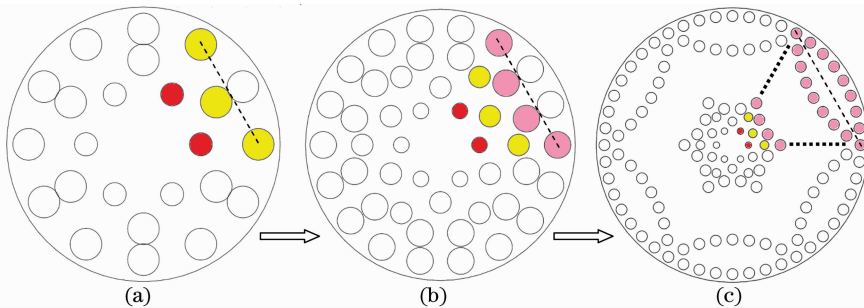


图1 获得八层高非线性光子晶体光纤的过程。描述的是(a)两层,(b)三层和(c)八层光子晶体光纤的过程

Fig.1 Procedure of achieving eight-ring HNL-PCF cladding. It shows the process of obtaining (a) two-ring (b) three-ring, and (c) eight-ring cladding

总的来说,光子晶体光纤的色散由材料色散和波导色散两部分组成,具体的表达式为^[17]

$$D = D_m(\lambda) + D_w(\lambda). \quad (1)$$

通过塞尔迈耶尔公式 $n_1^2 = 1 + \sum_i \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i^2}$,结合公式

$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_1}{\partial \lambda^2}$,可以通过Matlab程序对塞尔迈耶尔公式求二阶导即可计算出光子晶体光纤的材料色散

$D_m(\lambda)$ 。根据基模的有效折射率,可以计算出光子晶体光纤的波导色散 $D_w(\lambda)$,具体计算公式为^[17]

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

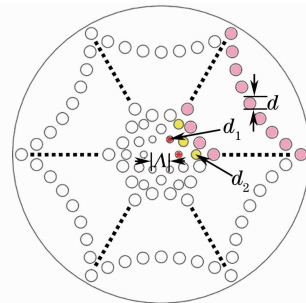


图2 模拟计算用的光子晶体光纤的横截面图

Fig.2 Cross section of the proposed PCF that we simulate in this letter

式中 $\text{Re } n_{\text{eff}}$ 是基模有效折射率 n_{eff} 的实部。一旦基模的有效折射率 n_{eff} 被求解出来,就可以获得光子晶体光纤的波导色散 $D_w(\lambda)$ 。同时,光子晶体光纤的非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 和限制损耗 α 也可以根据基模的有效折射率求解出来。具体计算公式为^[17]

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

$$\alpha = 8.686 \times \text{Im}(k_0 n_{\text{eff}}), \quad (4)$$

式中石英材料的非线性折射率 $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, A_{eff} 是有效模场面积,可由公式求得^[17]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E^2| dx dy \right)^2}{\iint |E|^4 dx dy}. \quad (5)$$

本文主要采用了基于全矢量有限元算法的 COMSOL Multiphysics 软件中的 RF 模块来对所提出的光子晶体光纤进行建模仿真。RF 模块可用于一般电磁波领域内求解电磁问题,比如射频和微波,光学和光子学,可以有效地求解光的传播问题,如时谐分析、特征频率/特征模式分析等。通过添加各向异性的完美匹配层,即在所设计的模型周围添加方形完美匹配层,在 COMSOL 求解域设定中对不同区域的吸收系数(在 x 方向吸收或在 y 方向吸收)的设置,便可实现各向异性的完美匹配层^[19],进而 COMSOL 可以求解各种复杂模式的有效折射率 n_{eff} ,分析模场特性。基于图 2 所设计的光子晶体光纤的模型结构,运用 COMSOL 软件,系统地分析了色散参数 $D(\lambda)$,非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 以及限制损耗 α 与波长 λ 之间的关系。

3 模拟结果与讨论

首先,详细讨论了色散参数 $D(\lambda)$ 与光子晶体光纤第 1 层空气孔孔径 d_1 的关系,在确定的孔间距 $\Lambda = 0.84 \mu\text{m}$,以及其他空气孔孔径 $d_2/\Lambda = 0.58$, $d/\Lambda = 0.68$ 情况下,如图 3 所示。当将第 1 层空气孔孔径 d_1 从 0.3Λ 以步长 0.01Λ 逐渐减小到 0.25Λ 时,在波长 $1.35 \sim 1.75 \mu\text{m}$ 范围内,色散参数 $D(\lambda)$ 按同样的色散斜率逐渐增大。考虑到第 1 层空气孔孔径 d_1 对光子晶体光纤的色散有很大的影响,而且在 $d_1 = 0.26\Lambda$ 时,在短波长范围内是正色散,而在长波长范围内是负色散,且都靠近零色散,而其他 d_1 值对应的色散则是单一的正色散或负色散,于是当研究其他参量对光子晶体光纤的色散特性的影响时,暂时取 $d_1 = 0.26\Lambda$ 。

其次,讨论了色散参数 $D(\lambda)$ 与光子晶体光纤第 2 层空气孔孔径 d_2 的关系,在确定的孔间距 $\Lambda = 0.84 \mu\text{m}$,以及其他空气孔孔径 $d_1/\Lambda = 0.26$, $d/\Lambda = 0.68$ 情况下,数值结果如图 4 所示。从图 4 看出,随着第 2 层空气孔孔径 d_2 的减小,色散参数 $D(\lambda)$ 不仅在短波长范围内增大,在长波长范围内也有所增大(除 $d_2/\Lambda = 0.58$ 外),而且在长波长范围内色散变化的幅度要大于短波长处。根据上述讨论所得的规律,逐渐调整光子晶体光纤的设计参数,将 d_2/Λ 在 $0.55 \sim 0.56$ 之间做微调,虽然也有一些色散相对平坦的零色散曲线,但色散平坦的波长范围(约 200 nm)或者是色散的靠近零色散程度 [$\pm 1 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$] 不够完美,鉴于这种情况,就尝试着在 d_2/Λ 为 $0.560 \sim 0.565$ 之间做微调,最终得到了最优化设计参量 $\Lambda = 0.84 \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda = 0.26$, $d_2/\Lambda = 0.561$ 以及 $d/\Lambda = 0.68$,按这种参量设计光子晶体光纤,可以在 $1.37 \sim 1.70 \mu\text{m}$ 波长范围内得到超平坦零色散 (0.3 ± 0.3) $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,这个色散特性结果要超过其他文献报道。除此之外,按最优化参量设计的光子晶体光纤的有效模场面积 A_{eff} 和限制损耗 α 与波长之间的关系如图 5 所示。从图 5 中可以看出,光子晶体光纤的有效模场面积 A_{eff} 和限制损耗 α 都随着波长的增加而增大,其中波长 $1.35 \mu\text{m}$ 和 $1.70 \mu\text{m}$ 处的有效模场面积为 $2.58 \mu\text{m}^2$ 和 $3.15 \mu\text{m}^2$,对应的非线性系数分别为 $40.8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $33.4 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,两者相差不大且都高于 $30 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,说明在

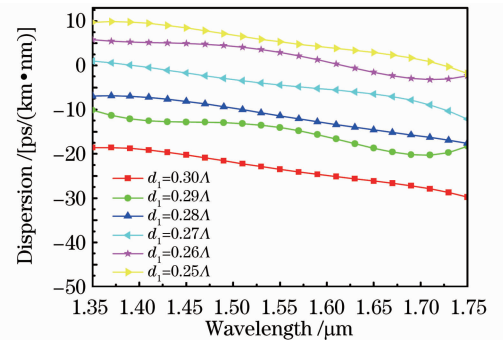


图 3 在 $d_2/\Lambda = 0.58$, $d/\Lambda = 0.68$ 和 $\Lambda = 0.84 \mu\text{m}$ 条件下,不同 d_1 值对应的色散参量值
Fig. 3 Dispersion parameter of the PCF with $d_2/\Lambda = 0.58$, $d/\Lambda = 0.68$, and hole pitch $\Lambda = 0.84 \mu\text{m}$ for different d_1

1.35~1.70 μm 的波长区间都能保持高非线性;限制损耗(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1.35~1.50 μm 的波长区间始终小于0.01 dB/km,这已远远小于传统的双包层光纤的限制损耗。结果表明,在1.55 μm 波长处,光子晶体光纤的有效模场面积为2.91 μm^2 ,进而得到相应的非线性系数为36.2 $\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。同时,在1.37 μm 到1.62 μm 这段超平坦零色散波长范围内,限制损耗始终低于0.1 dB/km,这对于信号传输是很有利的。

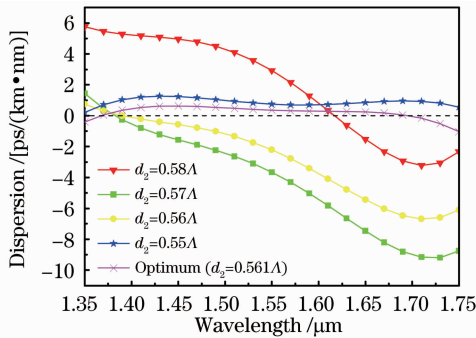


图4 在 $d_1/\Lambda = 0.26$, $d/\Lambda = 0.68$ 和 $\Lambda = 0.84 \mu\text{m}$ 条件下,不同 d_2 值对应的色散参量值

Fig. 4 Dispersion parameter of the PCF with $d_1/\Lambda = 0.26$, $d/\Lambda = 0.68$, and hole pitch $\Lambda = 0.84 \mu\text{m}$ for different d_2

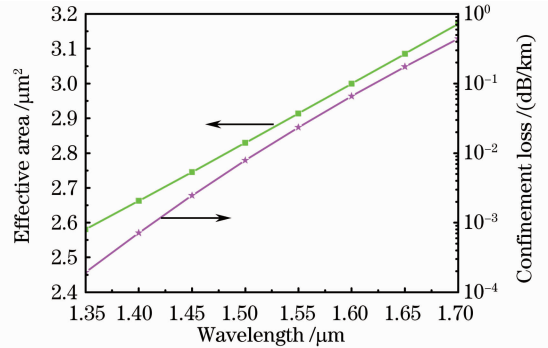


图5 最优化参量设计的光子晶体光纤的有效模场面积 A_{eff} 和限制损耗 α 与波长之间的关系

Fig. 5 Effective area and confinement loss curves as a function of wavelength corresponding to the optimum design parameters

4 结 论

本文提出的新型的光子晶体光纤设计结构,同时具有高非线性、超平坦零色散以及低限制损耗等特性。通过数值模拟结果得出,在1.55 μm 波长处可获得36.2 $\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的高非线性系数;同时,在1.37~1.70 μm 这330 nm波长范围内,可实现(0.3 \pm 0.3) ps/(nm \cdot km)的超平坦零色散,而且限制损耗在1.37~1.62 μm 波长范围内始终低于0.1 dB/km。本文提出的高非线性光子晶体光纤在通信系统和非线性光学(如四波混频)等诸多领域中有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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
- 3 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
- 4 Cui Yanling, Hou Lantian. Dispersion characteristic of a new hybrid cladding photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2571~2576
崔艳玲, 侯蓝田. 一种新型混合双包层光子晶体光纤的色散特性研究[J]. 物理学报, 2010, **59**(4): 2571~2576
- 5 Chen Jing, Tan Xiaoling. Study on the mode and dispersion properties of octagonal photonic crystal fibers[J]. *Study on Optical Communications*, 2009, **35**(2): 47~49
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): 47~49
- 6 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
- 7 C. J. McKinstrie, S. Radic, M. G. Raymer *et al.*. Unimpaired phase-sensitive amplification by vector four-wave mixing near the zero-dispersion frequency[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 2178~2189

- 8 S. M. Abdur Razzak, Yoshinori Namihira. Tailoring dispersion and confinement losses of photonic crystal fibers using hybrid cladding[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(13): 1909~1914
- 9 S. M. Abdur Razzak, Yoshinori Namihira. Proposal for highly nonlinear dispersion-flattened octagonal photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2008, **20**(4): 249~251
- 10 Zhang Shiqiang, Li Xiao, Xu Xiaojun *et al.*. Experimental study of supercontinuum generation by hundred nanosecond pulse in highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 75~78
张世强, 李霄, 许晓军等. 百纳秒激光脉冲在高非线性光子晶体光纤中产生超连续谱的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 75~78
- 11 Zhang Guang, Liu Xiaofeng, Chen Qingxi *et al.*. Optical sensing based on photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 41~46
张光, 刘小峰, 陈庆希等. 基于光子晶体光纤的光学传感[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 41~46
- 12 V. Finazzi, T. M. Monro, D. J. Richardson. Small-core silica holey fibers: nonlinearity and confinement loss trade-offs [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(7): 1427~1436
- 13 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
- 14 F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri *et al.*. Tailoring of flattened dispersion in highly nonlinear photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1065~1067
- 15 S. M. Abdur Razzak, Yoshinori Namihira, Tatsuya Kinjo *et al.*. Design of highly nonlinear birefringent photonic crystal fibers with ultra-flattened chromatic dispersion[J]. *Appl. Phys. Express*, 2008, **1**(6): 062006
- 16 Y. N. Zhang, L. Y. Ren, Y. K. Gong *et al.*. Design and optimization of highly nonlinear low-dispersion crystal fiber with high birefringence for four-wave mixing[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(16): 3208~3214
- 17 Y. M. Wang, X. Zhang, X. M. Ren *et al.*. Design and analysis of a dispersion flattened and highly nonlinear photonic crystal fiber with ultralow confinement loss[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(3): 292~297
- 18 G. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 2nd ed. Maryland Heights: Academic Press, 1995
- 19 K. Saitoh, M. Koshiba, T. Hasegawa *et al.*. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(8): 843~852