

文章编号: 0253-2239(2010)s100203

低色散高非线性四波混频用光子晶体光纤的优化设计

张亚妮^{1,2}

¹ 宝鸡文理学院物理与信息技术系, 陕西 宝鸡 721007
² 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 优化设计了一种四波混频用低色散高非线性光子晶体光纤, 该光纤纤芯缺失一根空气柱, 包层沿光纤长度方向排布为压缩六角点阵椭圆空气孔。采用全矢量有限元法, 对其色散和非线性系数进行了数值模拟。结果发现, 通过优化调整光纤结构参数, 即改变六角点阵压缩比 ξ 、相对孔间隔 f 和空气孔椭圆率 η , 该光纤从波长 1.43 μm 到 1.80 μm 接近 370 nm 波段范围内总色散介于 $\pm 2.5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 非线性系数接近 $150 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 。该光纤所呈现的超低平坦色散高非线性效应对四波混频具有重要应用价值。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 光纤表征; 光纤设计与制备; 四波混频

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201030.s100203

Design and Optimization of Low-Dispersion High-Nonlinear Photonic Crystal Fiber for Four-Wave Mixing

Zhang Yani^{1,2}

¹ Department of Physics and Information Technology, Baoji College of Arts and Science, Baoji, Shaanxi 721007, China
² State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract A novel type of photonic crystal fiber (PCF) with low dispersion and high nonlinearity for four-wave mixing is proposed. This kind of fiber is composed of a solid silica core and a cladding with squeezed-hexagonal-lattice elliptical air-hole along the fiber length. Its dispersion and nonlinearity coefficient are investigated simultaneously by using full vectorial finite element method. Numerical results show that proposed highly-nonlinear low-dispersion fiber has the total dispersion as low as $\pm 2.5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ over ultra-broad wavelength range from 1.43 μm to 1.8 μm by adjusting the structure parameters of photonic crystal fiber, such as the hexagonal squeezing ratio, the relative air hole size and the air hole ellipticity, and the corresponding nonlinearity coefficient is about $150 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ at 1.55 μm . The proposed PCF with low ultra-flattened dispersion, high nonlinearity and high birefringence can have important applications on the four-wave mixing.

Key words fiber optics; photonic crystal fibers; fiber characterization; fiber design and fabrication; four-wave mixing

OCIS codes 060.2310; 060.5295; 060.2270; 060.2280; 190.4380

1 引言

四波混频(FWM)作为光纤中观察到的一种基本非线性光学现象^[1~3], 已在参量放大、波长转换等方面得到很好的应用^[4~6]。FWM的产生效率与

材料的色散及非线性系数有关^[7]。对于光纤而言, 其色散主要取决于光纤的群速色散, 与光纤的结构参数相关^[6, 8]。

近年来, 光子晶体光纤(PCF)由于具有独一无

收稿日期: 2010-05-25; 收到修改稿日期: 2010-07-12

基金项目: 中国博士后科学基金(20080431258)、中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验开放基金(SKLS200913)和宝鸡文理学院重点科研项目(ZK0841)资助课题。

作者简介: 张亚妮(1966—), 女, 博士, 教授, 主要从事光波导理论与光纤中的非线性效应方面的研究。

E-mail: zhangyn@opt.ac.cn

二的光学特性而备受关注^[9~12]。与普通光纤相比, PCF 提供的小纤芯面积与色散特征强烈依赖于光纤结构, 通过调整光纤结构参数, 可以设计出以低功率在较短距离内诱导明显 FWM 效应的 PCF。文献[6]和[12]分别给出了普通光纤与 PCF 的色散参数随波长的变化关系, 其中商用 PCF 的色散在 1.48~1.64 μm 波段呈现超低平坦色散, 且非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 接近于 $11 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$, 比普通单模光纤的 $\gamma(\lambda) = 1.3 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 高将近一个数量级^[6]。因此, 具有高非线性系数色散可调的 PCF 将在包括 FWM 在内的系列非线性效应研究方面有着极好的应用前景。^[13~16]

一般, PCF 的色散参数 $D(\lambda)$ 和非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 很容易通过调整光纤的结构参数, 如孔间隔和空气孔的排布方式等进行控制^[17~19]。本文设计了一种新型结构 PCF, 光纤包层采用压缩六角点阵椭圆孔排布方式, 中心缺失一根空气柱形成纤芯。采用全矢量有限元法 (FV-FEM)^[20], 对其色散特性和非线性系数进行研究。

2 设计原理与理论模型

新设计的 PCF 端面结构如图 1 所示, 光纤包层沿长度方向按压缩六角点阵排布着均匀椭圆孔, 纤芯缺失一根椭圆空气柱形成导光区。采用 x, y 轴方向的孔间隔 Λ_x, Λ_y 和 x, y 轴方向孔直径 a, b 表征光纤结构, 这样超格子计算的基本点阵矢量表示为

$$\vec{a}_1 = \Lambda_x \hat{x}, \quad \vec{a}_2 = \frac{\Lambda_x}{2} \hat{x} + \Lambda_y \hat{y}, \quad (1)$$

式中 \hat{x} 和 \hat{y} 为单位矢量。同时, 引入六角点阵压缩比 ξ , 相对孔间隔 f 和空气孔椭圆率 η 表征 PCF 的不对称程度, 并分别被定义为 $\xi = \Lambda_y / \Lambda_x$, $f = b / \Lambda_x$ 和 $\eta = b / a$ 。为了避免相邻空气孔沿 x 或 y 方向叠加, 这三个参数之间应该满足

$$f < \min(\sqrt{\eta^2 + 4\xi^2} / 2, \eta). \quad (2)$$

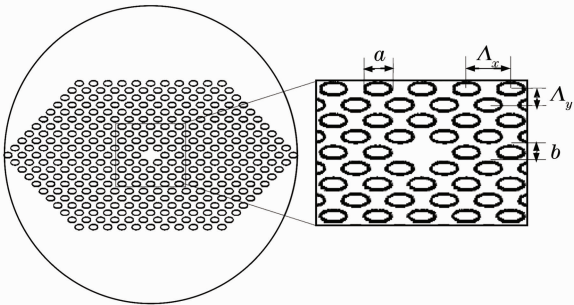


图 1 新设计 PCF 端面结构示意图及芯部放大图

Fig. 1 Schematic cross-section of the proposed PCF and magnified of the core region

考虑到这种结构 PCF 在工艺上的制造难度, 规

定孔的椭圆度和 PCF 的六角点阵压缩均沿 y 方向, 即六角点阵压缩比 ξ 和空气孔椭圆率 η 应满足 $\xi = \eta\sqrt{3}/2$, 这样容易实现(2)式要求的 $f < \eta$ 。

一般, PCF 的波导色散 $D_w(\lambda)$ 与基模有效折射率 n_{eff} 有关, 可表示为^[21~24]

$$D_w(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 |\text{Re}(n_{\text{eff}})|}{\partial \lambda^2}, \quad (3)$$

式中 c 为真空中的光速, λ 为光波长。因此, 一旦基模有效折射率 n_{eff} 被获得, 很容易求出 PCF 的波导色散 $D_w(\lambda)$ 。

这里, 采用 FV-FEM 精确预测 PCF 的基模有效折射率。根据麦克斯韦方程, 有限元分析法的基本方程为

$$\nabla \times (\boldsymbol{\mu}_r^{-1} \nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \boldsymbol{\epsilon}_r \vec{E} = 0, \quad (4)$$

式中 k_0 是自由空间波数, \vec{E} 表示电场强度, $\boldsymbol{\epsilon}_r$ 和 $\boldsymbol{\mu}_r$ 分别为介质相对介电常数和相对磁导率张量。采用 FV-FEM 分析 PCF 时, 为了精确模拟空气孔边界, 常选取曲线混合边界或节点为模拟元胞^[20], 将光纤端面分成许多曲线混合元胞, 应用(4)式到这些元胞, 则可以得到本征值方程

$$\mathbf{K}\mathbf{E} = k_0^2 n_{\text{eff}}^2 \mathbf{M}\mathbf{E}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{K} 和 \mathbf{M} 是有限元矩阵, \mathbf{E} 是由边界和节点组成的离散化电场强度矢量。利用各向异性完美匹配层 (PML) 作为吸收边界条件可以计算约束损耗。同时, 根据 \mathbf{K} 和 \mathbf{M} 的稀疏矩阵属性对本征值方程进行求解, 进而得到基模有效折射率 n_{eff} 。

一般而言, PCF 的总色散 $D(\lambda)$ 等于波导色散 $D_w(\lambda)$ 和材料色散 $D_m(\lambda)$ 之和^[24], 即

$$D(\lambda) = D_w(\lambda) + D_m(\lambda), \quad (6)$$

式中 $D_w(\lambda)$ 取决于光纤的波导结构。对于 PCF 而言, 通过人为改变光纤包层的结构参数很容易调节波导色散 $D_w(\lambda)$, 材料色散 $D_m(\lambda)$ 可以通过塞耳迈耶尔 (Sellmeier) 公式求出^[25]。

同时, PCF 的非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 被定义为^[19]

$$\gamma(\lambda) = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (7)$$

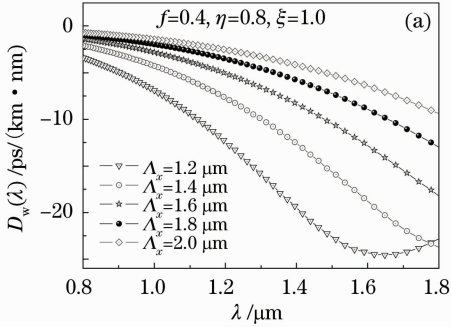
式中 $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 是石英材料的非线性双折射率, A_{eff} 是有效模面积, 可表示为^[24]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E|^4 dx dy}. \quad (8)$$

为了使所设计光纤在较宽的波长范围内实现色散和非线性系数调控效应, 采用 FV-FEM 数值分析得到该光纤色散和非线性系数与光纤结构参数之间的关系。

3 结果与讨论

首先, 选取相对孔间隔 $f=0.4$, 孔椭圆率 $\eta=0.8$ 和六角点阵压缩比 $\xi=1.0$ 不变, x 方向孔间隔 Λ_x 从 $1.2 \mu\text{m}$ 变化到 $2.0 \mu\text{m}$, 变化步长取 $0.2 \mu\text{m}$ 时, 研究了波导色散 $D_w(\lambda)$ 和非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 对 Λ_x 的依赖关系。图 2 给出了 Λ_x 取不同值时, $D_w(\lambda)$ 和 $\gamma(\lambda)$ 随波长的变化曲线。从图 2(a) 可以看出, 随着波长的变化, $D_w(\lambda)$ 先逐渐减小到一最小值, 然后又缓慢增加; 同时, 随着 Λ_x 的增大,



$D_w(\lambda)$ 逐渐增大, 进而致使最小色散波长发生红移。因此, 该光纤在通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近呈现负色散参数和负色散斜率, 体现出极好的色散补偿特性。

由图 2(b) 可知, 随着波长的增加, $\gamma(\lambda)$ 逐渐减小; 同时, Λ_x 的增加致使 $\gamma(\lambda)$ 的减小趋势减缓; 因此, $\Lambda_x=1.2 \mu\text{m}$ 时, $\gamma(\lambda)$ 在通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 是最小的。为了获得较大的非线性系数, 同时兼顾色散补偿特性, 选取 $\Lambda_x=1.8 \mu\text{m}$ 。

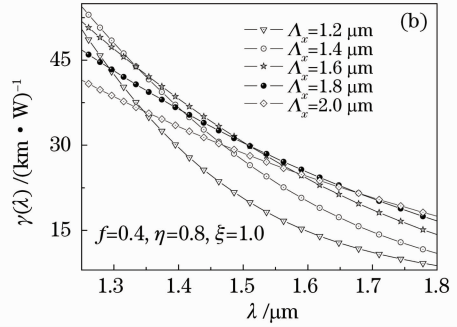


图 2 Λ_x 取不同值时波导色散 $D_w(\lambda)$ 和非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 随波长的变化。(a) $D_w(\lambda)$; (b) $\gamma(\lambda)$

Fig. 2 When Λ_x is different, waveguide dispersion $D_w(\lambda)$ and nonlinearity coefficient $\gamma(\lambda)$ versus wavelength.

(a) $D_w(\lambda)$; (b) $\gamma(\lambda)$

其次, 选取 $\Lambda_x=1.8 \mu\text{m}$, $\eta=0.8$ 和 $f=0.4$ 不变, 六角对称压缩比 ξ 从 1.0 变化到 0.4 , 变化步长取 0.2 时, 得到 $D_w(\lambda)$ 和 $\gamma(\lambda)$ 随波长的变化关系如图 3 所示。类似于图 2, 从图 3(a) 可以得到, 该光纤在通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近亦呈现负色散参数和负色散斜率, 且波导色散随波长增加而逐渐减小; 同时, 随着六角对称压缩比 ξ 的减小(即 PCF

不对称性的增加), 波导色散 $D_w(\lambda)$ 亦逐渐减小; 当六角对称压缩比 ξ 逐渐增大(即 PCF 不对称性降低), $D_w(\lambda)$ 随波长的下降趋势趋于平缓。另外, 图 3(b) 表明, 随着六角对称压缩比 ξ 的减小(即 PCF 不对称性的增加), 非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 逐渐增加。同理, 为了获得较大的非线性系数, 同时兼顾色散补偿特性, 这里选取 $\xi=0.4$ 。

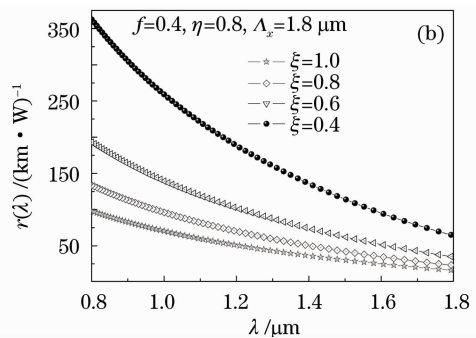
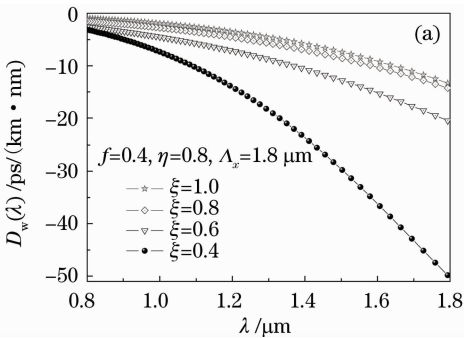


图 3 ξ 取不同值时波导色散 $D_w(\lambda)$ 和非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 随波长的变化。(a) $D_w(\lambda)$; (b) $\gamma(\lambda)$

Fig. 3 When ξ is different, waveguide dispersion $D_w(\lambda)$ and nonlinearity coefficient $\gamma(\lambda)$ versus wavelength.

(a) $D_w(\lambda)$; (b) $\gamma(\lambda)$

再次, 选取 $\xi=0.4$, $\eta=0.8$ 和 $\Lambda_x=1.8 \mu\text{m}$ 不变, 相对孔间隔 f 取不同值时, 波导色散 $D_w(\lambda)$ 和非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 随波长的变化如图 4 所示。从 4(a) 可以明显看出, 当 f 分别取 $0.35, 0.4, 0.45$ 时, 对应的三条色散曲线非常靠近且随波长的变化规律极为

相似, 即随着波长的增加, 波导色散 $D_w(\lambda)$ 呈现下降趋势; 而图 4(b) 则表明, 三条非线性系数曲线近似平行, 并随波长增加而逐渐减小, 当相对孔间隔 f 增大时, 非线性系数也相应增大。同理, 根据图 4(b), 为了在通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近获得较大的非线性系

数, 应选取相对空气孔间隔 $f = 0.45$

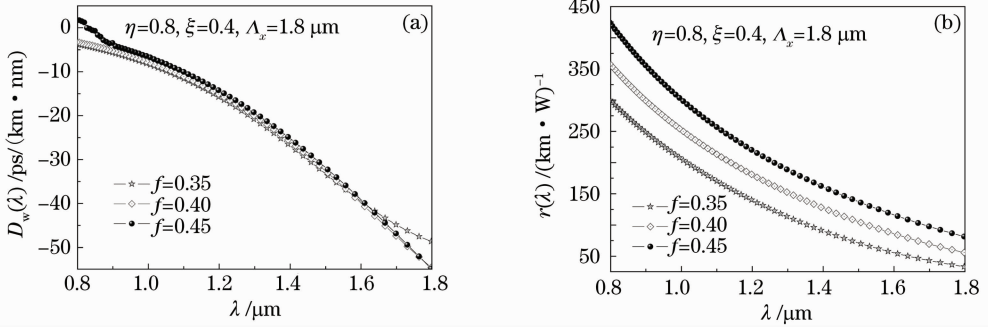


图 4 f 取不同值时波导色散 $D_w(\lambda)$ 和非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 随波长的变化. (a) $D_w(\lambda)$; (b) $\gamma(\lambda)$

Fig. 4 When f is different, waveguide dispersion $D_w(\lambda)$ and nonlinearity coefficient $\gamma(\lambda)$ versus wavelength.

(a) $D_w(\lambda)$; (b) $\gamma(\lambda)$

最后, 选取 $f=0.45, \xi=0.4$ 和 $\Lambda_x=1.8 \mu\text{m}$, 改变空气孔椭圆率 η 时, 进一步分析得到波导色散 $D_w(\lambda)$ 和非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 对波长的依赖关系如图 5 所示. 从图 5(a) 可以看出, $\eta=0.8$ 时的 $D_w(\lambda)$ 比 $\eta=0.6$ 时要大. 而图 5(b) 则说明当空气孔椭圆率 η 减小时, 非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 将增加. 同理, 为了使设

计光纤获得相对较好的非线性系数和最优化的色散补偿效果, 可以选取 $\eta=0.8$. 因此, 为了在光通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 获得较大的非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 和较低的超平坦色散, 该紧密六角点阵椭圆空气孔 PCF 结构参数可被优化设计为 $f=0.45, \xi=0.4, \eta=0.8$ 和 $\Lambda_x=1.8 \mu\text{m}$.

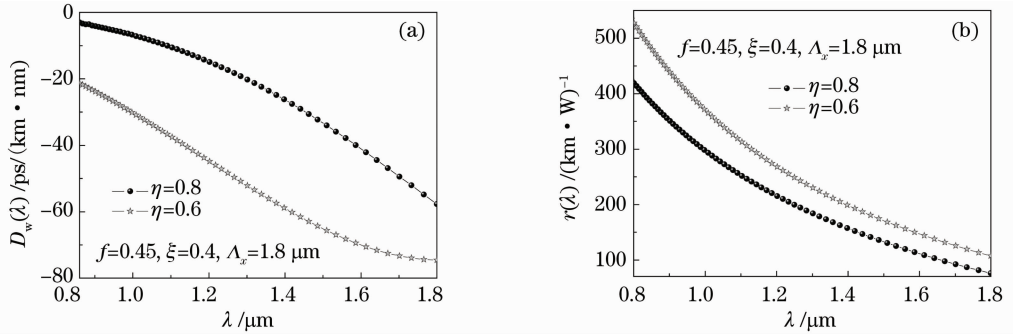


图 5 η 取不同值时波导色散 $D_w(\lambda)$ 和非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 随波长的变化. (a) $D_w(\lambda)$; (b) $\gamma(\lambda)$

Fig. 5 When η is different, waveguide dispersion $D_w(\lambda)$ and nonlinearity coefficient $\gamma(\lambda)$ versus wavelength.

(a) $D_w(\lambda)$; (b) $\gamma(\lambda)$

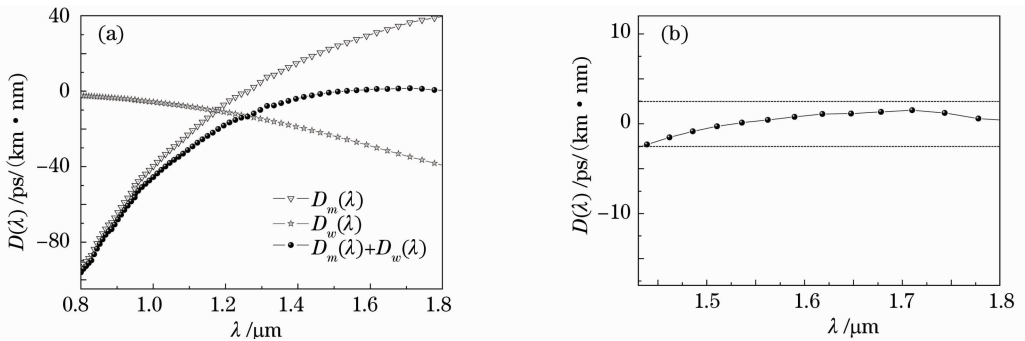


图 6 当光纤参数取 $f=0.45, \xi=0.4, \eta=0.8$ 和 $\Lambda_x=1.2 \mu\text{m}$ 时, 总色散随波长的变化.

(a) $D(\lambda), D_w(\lambda)$ 和 $D_m(\lambda)$ 随波长变化; (b) 从波长 1.43 到 $1.8 \mu\text{m}$ 波段的 $D(\lambda)$

Fig. 6 $f=0.45, \xi=0.4, \eta=0.8$ and $\Lambda_x=1.2 \mu\text{m}$, dispersion curves versus wavelength for the optimized PCF.

(a) $D(\lambda), D_w(\lambda)$ and $D_m(\lambda)$ versus wavelength; (b) $D(\lambda)$ versus wavelength in a range from 1.43 to $1.8 \mu\text{m}$

由图 2~5 可知, 所设计光纤的波导色散在光波导通信波段为负值, 说明通过调整光纤结构参数,

可以实现色散补偿,使得零色散波长发生红移。首先,根据 Sellmeier 公式计算材料色散 $D_m(\lambda)$;其次,根据光纤结构参数设计波导色散 $D_w(\lambda)$ 并描绘 $D_m(\lambda)$ 和 $D_w(\lambda)$ 随波长变化关系曲线,如图 6(a)所示;最后,根据(6)式计算总色散 $D(\lambda)$ 。分析图 2~5,可以得到当 PCF 的结构参数为 $f=0.45$, $\xi=0.4$, $\eta=0.8$ 和 $\Lambda_x=1.8 \mu\text{m}$ 时,该光纤呈现最佳色散曲线并具有最好的色散补偿性能,且在光波导通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近为零色散。同时,图 6(b)给出了该光纤总色散在 C 波段的放大图,可以看出,从波长 $1.43 \mu\text{m}$ 到 $1.8 \mu\text{m}$ 接近 370 nm 的波段范围内其总色散介于 $\pm 2.5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,呈现色散平坦特性,且该色散平坦特性与文献[12]报道的商业高非线性 PCF 的色散特性极为相似。然而,优化设计的 PCF 的非线性系数 $\gamma(\lambda)$ 接近 $150 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$,几乎比商业高非线性 PCF 的非线性系数高 15 倍。因此,优化设计的 PCF 所呈现的高非线性超低平坦色散特性将对研究开发包括 FWM 在内的非线性效应具有非常重要的应用价值。

4 结 论

通过调整 PCF 的结构参数,设计了一种高非线性低色散 PCF,该光纤具有椭圆孔紧密六角点阵结构,中心缺失一个空气孔形成全内反射导光芯区。采用 FV-FEM,对其非线性系数和波导色散参数进行了数值模拟研究。分析发现,通过调整 PCF 的结构参数,如六角点阵压缩比 ξ 、相对孔间隔 f 和空气孔椭圆率 η ,可以设计改变该光纤的高非线性低色散工作波长。当结构参数被优化为 $f=0.45$, $\xi=0.4$, $\eta=0.8$ 和 $\Lambda_x=1.8 \mu\text{m}$ 时,该光纤从波长 $1.43 \mu\text{m}$ 到 $1.8 \mu\text{m}$ 约 370 nm 波段范围内呈现接近 $\pm 2.5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 的低超平坦色散和高非线性效应,在光波导通信波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处非线性系数高达 $150 (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 。进一步研究表明,该光纤具有单模高双折射效应,在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处双折射接近 2.5×10^{-3} 。因此,该光纤集高非线性、低超平坦色散、高双折射和单模特性等多种特性于一体,将在多波长 FWM、色散补偿、宽带超连续谱产生、可调波长转换器以及超短脉冲光孤子传输等方面具有重要的应用价值^[26~28]。

参 考 文 献

1 H. Takesue, K. Inoue. Generation of polarization-entangled

- photon pairs and violation of Bell's inequality using spontaneous four-wave mixing in a fiber loop[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **70**(3): 031802. 1~4
- 2 B. Khubchandani, P. N. Guzdar, R. Roy. Influence of stochasticity on multiple four-wave-mixing processes in an optical fiber[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(6): 066609. 1~8
- 3 Q. Lin, F. Yaman, G. P. Agrawal. Photon-pair generation in optical fibers through four-wave mixing: role of raman scattering and pump polarization[J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(2): 023803. 1~20
- 4 J. Fulconis, O. Alibart, J. L. O'Brien *et al.*. Nonclassical interference and entanglement generation using a photonic crystal fiber pair photon source[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(12): 120501. 1~4
- 5 T. Ozeki. High-fidelity transmission of quantum polarization states through birefringent optical fibers[J]. *Phys. Rev. A*, 2006, **74**(2): 024302. 1~3
- 6 C. J. McKinstrie, S. Radic, M. G. Raymer *et al.*. Unimpaird phase-sensitive amplification by vector four-wave mixing near the zero-dispersion frequency [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 2178~2189
- 7 Liu Xueming, Zhou Xiaoqun, Lu Chao. Multiple four wave mixing self stability in optical fibers[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **72**(1): 013811. 1~9
- 8 C. Lesvigne, V. Couderc, A. Tonello *et al.*. Visible supercontinuum generation controlled by intermodal four-wave mixing in microstructured fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2173~2175
- 9 D. Elser, U. L. Andersen, A. Korn *et al.*. Reduction of guided acousticwave brillouin scattering in photonic crystal fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(13): 133901. 1~4
- 10 A. B. Fedotov, A. A. Voronin, E. E. Serebryannikov *et al.*. Multifrequency third-harmonic generation by red-shifting solitons in a multimode photonic-crystal fiber[J]. *Phys. Rev. E*, 2007, **75**(1): 016614. 1~7
- 11 P. Dupriez, F. Poletti, P. Horak *et al.*. Efficient white light generation in secondary cores of holey fibers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 3729~3736
- 12 Liu Xueming. Theory and experiments for multiple four-wave mixing processes with multifrequency pumps in optical fibers[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(4): 043818. 1~10
- 13 T. M. Monro, H. Ebendorff-Heidepriem. Progress in microstructured optical fibers [J]. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2006, **36**(4): 467~495
- 14 Wang Qiuguo, Yang Bojun, Zhang Lan *et al.*. Experiment study of wavelength conversion in a dispersion-flattened photonic crystal fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **5**(9): 538~539
- 15 Liu Xueming, Zhou Xiaoqun, Tang Xiufeng *et al.*. Switchable and tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser with fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(8): 1626~1628
- 16 Liu Xueming, Yang Xiufeng, Lu Fuyun *et al.*. Stable and uniform dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(1): 142~147
- 17 W. H. Reeves, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(14): 609~613
- 18 L. P. Shen, W. P. Huang, S. S. Jian. Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation [J]. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 2003, **15**(4): 540~542
- 19 F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri *et al.*. Tailoring of flattened dispersion in highly nonlinear photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1065~1067
- 20 M. Koshiba, Y. Tsuji. Curvilinear hybrid edge/nodal elements

- with triangular shape for guided-wave problems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(5): 737~740
- 21 Zhang Yani. Design of low-loss single-polarization single-mode photonic-crystal fiber based on polymer[J]. *J. Mod. Opt.*, 2008, **55**(12): 3563~3571
- 22 Zhang Yani, Miao Runcai, Ren Liyong *et al.*. Polarization properties of elliptical core non-hexagonal symmetry polymer photonic crystal fibre [J]. *Chin. Phys.*, 2007, **16**(6): 1719~1725
- 23 Zhang Yani, Ren Liyong, Li kang *et al.*. Guiding mode in elliptical core microstructured polymer optical fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **5**(4): 194~196
- 24 Zhang Yani. High birefringence tunable effect of microstructured polymer optical fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 5729~5734
- 张亚妮. 微结构聚合物光纤中的双折射可调效应研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(9): 5729~5734
- 25 K. Saitoh, M. Koshiba. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(8): 843~852
- 26 S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt *et al.*. Supercontinuum generation by stimulated raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 753~764
- 27 K. K. Chow, C. Shu, C. Lin *et al.*. Polarization insensitive widely tunable wavelength converter based on four-wave mixing in a dispersion flattened nonlinear photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 624~626
- 28 Jia Liang, Zhang Fan, Li Ming *et al.*. Numerical analysis for four-wave mixing based wavelength conversion of differential phase-shift keying signals[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(10): 617~620