

高非线性色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析

李绪友 许振龙* 凌卫伟 郭 慧 王岁儿

(哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 提出了一种新型结构的光子晶体光纤(PCF),利用全矢量有限元方法对其色散和非线性特性进行了数值分析。通过优化结构参数,得到了三种在不同波段具有较高非线性的近零色散平坦、宽带色散平坦甚至色散超平坦的光子晶体光纤,并给出了这种微结构 PCF 预制棒的制备方法。这些新型光纤在全光格式转化、超连续谱产生、光波长转换等领域具有良好的应用前景。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;全矢量有限元方法;附加微孔;色散平坦

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0505003

Numerical Simulation and Analysis of Photonic Crystal Fibers with High Nonlinearity and Flattened Chromatic Dispersion

Li Xuyou Xu Zhenlong Ling Weiwei Guo Hui Wang Suier

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A novel structure of photonic crystal fiber (PCF) is proposed, and the dispersion and nonlinear properties of the PCF are analyzed numerically based on full vector finite element method. Three PCFs with high linearity and nearly-zero flattened dispersion or broadband flattened even ultra-flattened dispersion in different wave bands are obtained by optimizing the structure parameters, and the method is presented to fabricate the microstructured fiber preform as well. These novel PCFs proposed have bright prospects of applications in all-optical format conversion, super-continuum generation and optical wavelength conversion, and other fields.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; full vector finite element method; additional micro-holes; dispersion flattened

OCIS codes 060.2270; 060.5295; 060.4370; 060.2400

1 引言

光子晶体光纤(PCF)又名微结构光纤或多孔光纤,是一种在光子带隙理论上发展起来的新型光纤^[1],由于结构设计的灵活性和独特的光学特性,自从 20 世纪末问世以来就得到了广泛的关注。通过调节包层与纤芯的结构,可以使光子晶体光纤具有无限单模传输、高双折射、高非线性及可调的色散特性等^[2-3]。具有高非线性宽带色散平坦特性的光子晶体光纤在全光格式转化、超连续谱产生和波长转换等^[4-6]方面有重要的应用。

到目前为止,已经提出了许多 PCF 结构来研究其色散和非线性特性。2012 年,徐惠真等^[7]设计了三种具有高非线性低色散斜率和低限制损耗的全固

PCF,零色散点恰好在 1.55 μm 波长处的 PCF 非线性系数达到 $31.5 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$;2013 年,王丹等^[8]提出了包层分布着三层大小不一气孔的 PCF 结构,在 900 nm 的超宽波长范围内保持低平色散并具有三个零色散点;马依拉木·木斯得克等^[9]设计了一种八边形实心光子晶体光纤,具有高非线性低限制损耗特性,在波长 1.55 μm 处非线性系数达到 $37.6 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$;简多等^[10]通过研究发现,相对四角晶格结构,具有三角晶格结构的光子晶体光纤更适用于研究高非线性和色散平坦特性。目前为止,大多数光子晶体光纤纤芯结构都是六边形(H-PCF)、四边形^[11]、八边形^[12],这些结构显示了各自的优越性。但是,杨汉瑞等^[13]提出了五角芯型光子

收稿日期:2013-11-07;收到修改稿日期:2013-12-10

作者简介:李绪友(1964—),男,博士,教授,主要从事光纤陀螺、光纤测量技术等方面的研究。

E-mail: lixuyou@hrbeu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: xzlsdlg@163.com

晶体光纤(Q-PCF),纤芯周围气孔成五边形排列,该PCF具有良好的双折射、模场面积的特性,且结构更简单,为PCFs的设计提供了新思路。

本文提出了在五角芯型PCF的最内层气孔间添加附加微孔的结构,利用全矢量有限元分析法(FEM)^[14]研究了最内层气孔及附加微孔孔径变化对色散特性及非线性特性的影响,并通过优化结构设计出了三种在不同波段具有较高非线性的近零色散平坦、宽带色散平坦甚至色散超平坦的单模光子晶体光纤结构,并给出了预制棒的制备方法。这为光学参量放大和超连续谱产生等方面提供了一种新的方法。

2 研究方法 with 结构模型

本文利用全矢量有限元方法进行研究。全矢量有限元法的优点在于可以有效地识别光纤中的传输模式,对不同光子晶体光纤的模型进行网格化处理,求解精度高,适于研究各种复杂结构的光子晶体光纤。

灵活的结构设计使光子晶体光纤具有众多奇异的特性,其中色散特性是一个十分重要的特性。按照色散产生的主要原因,光纤的色散可以分为:模式色散、材料色散 D_m 和波导色散 D_w 。对于可以轻易做到单模传输的光子晶体光纤而言,不存在模式色散;材料色散是由光纤材料的折射率随光波长变化引起的;波导色散又称结构色散,是由光纤结构决定的色散,其中光纤横截面尺寸起主要作用。

单模光子晶体光纤色散由材料色散与波导色散组成,即 $D=D_m+D_w$,具有特定结构的光子晶体光纤在一定波长范围内可以具有正负相反的 D_m 与 D_w ,因而可以用来实现色散平坦、色散补偿、近零色散位移等^[6,9],可应用在密集波分复用和孤子传输

等系统中。

材料色散系数可表示为

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{core}}}{d\lambda^2}, \quad (1)$$

式中 λ 为入射光波长; $c=3\times 10^8$ m/s为光在真空中的传播速度; n_{core} 为纤芯材料折射率,可由Sellmeier方程求得。具有相同基底材料的光子晶体光纤具有相同的材料色散。

波导色散系数可表示为

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

式中 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为有效折射率的实部。

非线性是光纤的另外一种重要特性,包括受激布里渊散射、受激拉曼散射和四波混频等。非线性系数可表示为

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

式中 n_2 为石英材料的非线性折射率,取值 3.0×10^{-20} $\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$; A_{eff} 为光纤有效模场面积。

由(3)式可知,非线性系数 γ 与光纤有限模场面 A_{eff} 成反比,因此可以通过调节光纤结构参数减小有效模式面积来获得较高的非线性系数。

常见的六边形纤芯光子晶体光纤与本文提出的光子晶体光纤横截面如图1所示。光纤的横截面包括纤芯和包层两部分,基底材质为纯石英,包层是由圆形空气孔构成的三角晶格结构,纤芯为最内层空气孔围成的区域。结构参量如下:最内层空气孔孔径为 d_1 ,最内层空气孔间附加微孔孔径为 d_2 ,其余空气孔孔径为 d_3 ,空气孔间距为 Λ 。包层空气孔折射率设为1,基底材料折射率设为1.45。

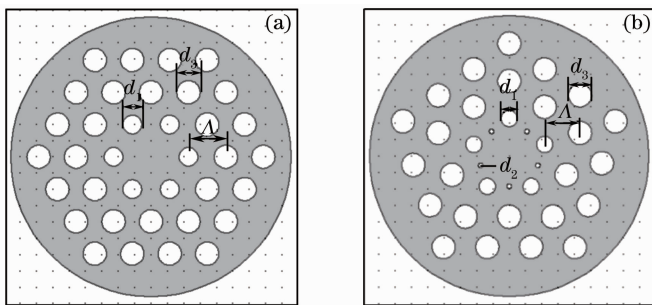


图1 (a) H-PCF截面图;(b) 本文提出的PCF结构截面图

Fig. 1 (a) Cross section of H-PCF; (b) cross section of PCF proposed in this paper

3 数值分析

为了分析图1(b)所示结构光子晶体光纤的色

散与非线性特性,进行了大量的仿真实验和计算,对比研究了图1中两种光纤在相同结构参数下的色散

系数、有效模场面积及非线性系数；分别研究了图 1 (b)中 d_1, d_2 对色散、非线性特性的影响。以下设定 $d_3=1 \mu\text{m}, \Lambda=1.6 \mu\text{m}$ 。

首先对比研究六边形纤芯 PCF 与五角芯型 PCF 的色散系数、有效模场面积及非线性系数, 设定结构参数 $d_1=0.6 \mu\text{m}, d_2=0$ 两者色散系数、有效模场面积随波长变化对比如图 2 所示。

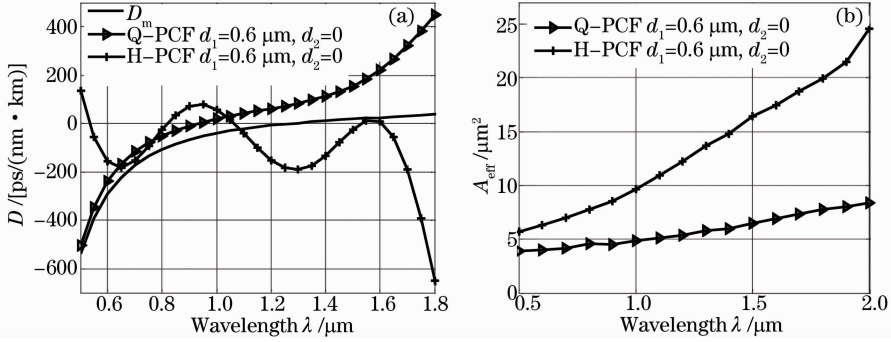


图 2 相同结构参数下 Q-PCF 与 H-PCF 特性。(a) 色散系数曲线；(b) 有效模场面积曲线

Fig. 2 Properties of Q-PCF and H-PCF with the same structure parameters. (a) Curves of dispersion coefficient; (b) curves of effective mode field area

3.1 d_1 对光纤特性的影响

为了研究参量 d_1 对光纤特性的影响, 设定 $d_2=0.2 \mu\text{m}, d_3=1.0 \mu\text{m}, \Lambda=1.6 \mu\text{m}$ 。 d_1 分别取 $0.6 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 时的色散系数、有效模场面积随波长

由图 2 可以看出, 相同的结构参数下, 在 $0.5 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 波长范围内, 五角芯型 PCF 具有比六边形纤芯 PCF 更为平坦的低色散特性和更小的模场面积, 因而 Q-PCF 具有更高的非线性系数。 这为设计具有低色散平坦和较高非线性 PCF 提供了一种新的方法。 将对以 Q-PCF 为基础的新结构的色散、有效模场面积及非线性特性进行分析。

变化的情况如图 3 所示。

图 3(a)、(b) 可知, 对于 d_1 分别取 $0.6, 0.7, 0.8 \mu\text{m}$ 三种结构的 PCF, 在 $1 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 波长范围内, 均具有较为平坦的色散特性; 而在 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$

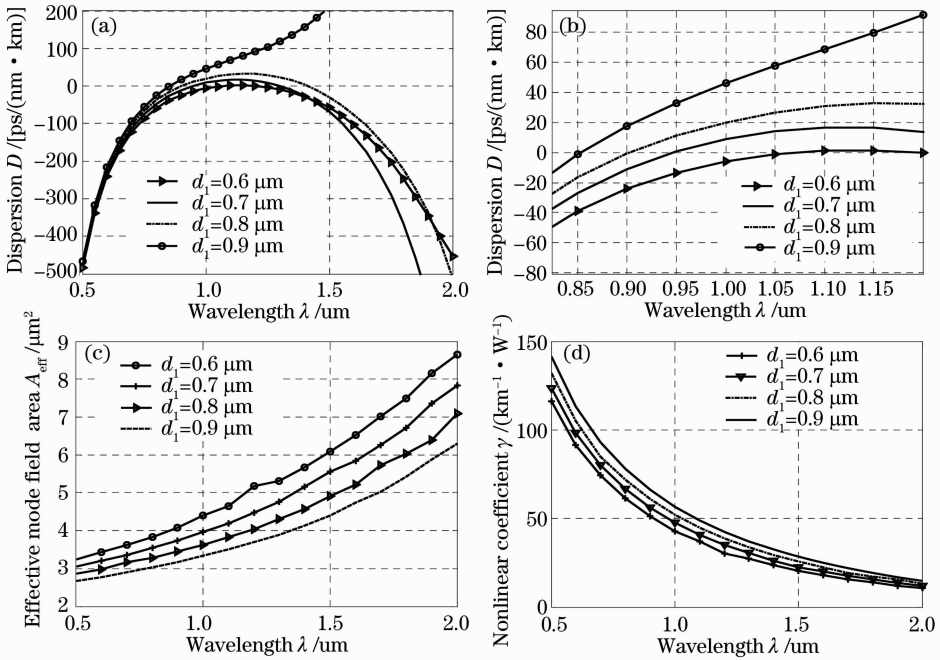


图 3 d_1 对光纤特性的影响。(a) 色散系数随波长变化曲线；(b) $0.7 \sim 1 \mu\text{m}$ 波长范围色散系数随波长变化曲线；(c) 有效模场面积随波长变化曲线；(d) 非线性系数随波长变化曲线

Fig. 3 Influence of d_1 on the properties of PCFs. (a) Variation of dispersion coefficient with wavelength; (b) variation of dispersion coefficient with wavelength ranges from $0.7 \mu\text{m}$ to $1 \mu\text{m}$; (c) variation of effective mode field area with wavelength; (d) variation of nonlinear coefficient with wavelength

波长范围内,三种结构的 PCF 光纤色散系数随波长的增大而增大,且具有很大的正色散斜率,而在同一波长处,色散斜率随 d_1 的增大而增大,零色散波长向短波长方向移动;在波长大于 $1.5 \mu\text{m}$ 时,三种结构的 PCF 光纤色散随波长的增大而减小,且均具有很大的负色散斜率,而在同一波长处,负色散斜率的绝对值随 d_1 的增大而增大。而当 d_1 取 $0.9 \mu\text{m}$ 时,色散迅速单调增大,这说明不能通过一味增大 d_1 来改善光纤的色散特性。在同一波长处,光纤色散系数随最内层空气孔孔径 d_1 的增大而增大。

从能量传输的角度来说,随着 d_1 的增大,芯区面积不断减小,光集中在更小的区域内传输,面积的数值甚至可以小于波长的数值,因此色散不断增大。从有效折射率角度来说,随着 d_1 的增大, n_{eff} 不断下降,而色散系数是关于 n_{eff} 的函数,从色散的物理公式可以推导出,在其他参数不变的条件随折射率的减小色散系数整体增大^[2]。当 d_1 取值 $0.9 \mu\text{m}$ 时,模场面积更小,部分能量扩散到包层中,甚至出现不能稳定单模传输的情况,这一现象在长波长更为明显,其色散迅速增大。

由图 3(c)、(d)可知,对于特定结构的 PCF,有效模场面积随波长的增大而增大,非线性系数随波长的增大而减小。这是因为 PCF 纤芯与包层空气孔之间存在高折射率差,从而对其中的光波具有很强的模场限制作用,而随着波长的增大,光向光纤包层扩散,有效模场面积不断增大,从而非线性系数不断减小。在特定波长处,有效模场面积随 d_1 的增大而减小,非线性系数随 d_1 的增大而增大,这是因为随着 d_1 的增大,纤芯被挤压,有效模场面积减小,光更多的聚集在纤芯中传输,从而非线性系数不断增大。

可见最内层空气孔孔径 d_1 对 PCF 的色散特性

及非线性有很大的影响,通过改变最内层空气孔 d_1 的孔径,可以设计出从可见到近红外具有双零色散波长的 PCF,在指定波长处具有较低平坦色散的 PCF,同时具有较大的非线性系数。

3.2 d_2 对光纤特性的影响

为了研究参量 d_2 对光纤特性的影响,设定 $d_1 = 0.6 \mu\text{m}$, d_2 分别取 $0.1, 0.2, 0.3, 0.4 \mu\text{m}$ 时的光纤特性随波长变化的情况如图 4 所示。

由图 4(a)可知,在保持 d_1, Λ, d_3 不变的情况下,附加微孔孔径 d_2 对光纤色散特性有很大的影响。在 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 短波长范围内,光纤色散系数差异不大;在 $1.0 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 波长范围内,当 d_2 取值 $0.1, 0.3 \mu\text{m}$ 时,光纤色散更加平坦,其中当 d_2 取值 $0.3 \mu\text{m}$ 时,光纤在 $1 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 宽带范围内色散平坦;在大于 $1.5 \mu\text{m}$ 波长范围内, d_2 取值 $0.2 \mu\text{m}$ 时,PCF 具有较大的负斜率色散, d_2 取值 $0.4 \mu\text{m}$ 时,PCF 具有较大的正斜率色散。 d_2 取值 $0.1, 0.2 \mu\text{m}$ 时,对色散影响作用与 d_1 取值 $0.6, 0.7, 0.8 \mu\text{m}$ 是类似的, d_2 取值 $0.3, 0.4 \mu\text{m}$ 时对色散影响作用与 d_1 取值 $0.9 \mu\text{m}$ 是类似的。

由图 4(b)、(c)可知, d_2 对有效模场面积的影响与 d_1 相似,对于特定结构的 PCF,有效模场面积随波长的增大而增大,因而非线性系数随波长的增大而减小;在特定波长处,有限模场面积随 d_2 的增大而减小,因此,非线性系数随 d_2 的增大而增大。这是因为 d_2 所处的位置对于芯区来说与 d_1 相似,它们对光纤有效模场面积、非线性的影响是相似的。

可以看出,在最内层气孔间添加微孔并适当调节微孔的孔径可以获得低平坦色散,并且可以有效地减小有限模场面积,增大非线性。

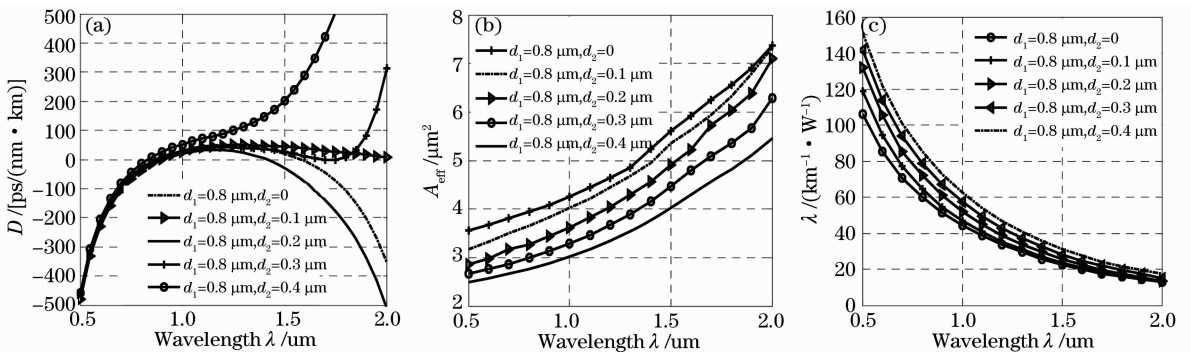


图 4 d_2 对光纤特性的影响。(a) 色散系数随波长变化曲线; (b) 有效模场面积随波长变化曲线; (c) 非线性系数随波长变化曲线

Fig. 4 Influence of d_2 to the properties of PCFs. (a) Variation of dispersion coefficient with wavelength; (b) variation of effective mode field area with wavelength; (c) variation of nonlinear coefficient with wavelength

4 优化设计

由以上的数值分析可知,调整最内层气孔孔径,在最内层气孔间添加微孔均可改善光子晶体光纤的色散特性和非线性特性,而将两种方法结合起来可以设计出在不同波段具有较高非线性的低色散平坦甚至低色散超平坦的 PCF。经过对结构参量的反复调整,得到了三种在不同波长范围内色散平坦的光纤结构,三种结构的 PCF 特性随波长变化的曲线如图 5 所示。

如图 5 可知,当 $d_1=0.6 \mu\text{m}$ 、 $d_2=0.2 \mu\text{m}$ 、 $d_3=1 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=1.6 \mu\text{m}$ 时,在 $1\sim 1.25 \mu\text{m}$ 波长范围内,色散平坦, $D_{\max} - D_{\min} < 5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,甚至在 $1.15 \mu\text{m}$ 波长附近色散超平坦;在 $0.5\sim 1.5 \mu\text{m}$ 波长范围内,有效模场面积在 $3\sim 6 \mu\text{m}^2$ 之内,非线性

系数在 $116\sim 23 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 之间;当 $d_1=0.7 \mu\text{m}$ 、 $d_2=0.2 \mu\text{m}$ 、 $d_3=1 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=1.6 \mu\text{m}$, PCF 在 $1.15\sim 1.5 \mu\text{m}$ 宽带波长范围内,色散平坦, $D_{\max} - D_{\min} < 5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,在 $1.2\sim 1.35 \mu\text{m}$ 波长范围色散超平坦,有效模场面积在 $3\sim 5.2 \mu\text{m}^2$ 之内,在 $1.3 \mu\text{m}$ 波长处有效模场面积为 $4.4 \mu\text{m}^2$,非线性系数达到 $36 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$;当 $d_1=0.8 \mu\text{m}$ 、 $d_2=0.3 \mu\text{m}$ 、 $d_3=1 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=1.6 \mu\text{m}$ 时,在 $1.1\sim 1.45 \mu\text{m}$ 宽带波长范围内,色散平坦, $D_{\max} - D_{\min} < 5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,在 $1.15\sim 1.25 \mu\text{m}$ 波长范围内色散超平坦,有效模场面积在 $3.3\sim 3.8 \mu\text{m}^2$ 之内,并且在 $1.2 \mu\text{m}$ 处,有效模场面积为 $3.4 \mu\text{m}^2$ 左右,非线性系数达到 $50 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

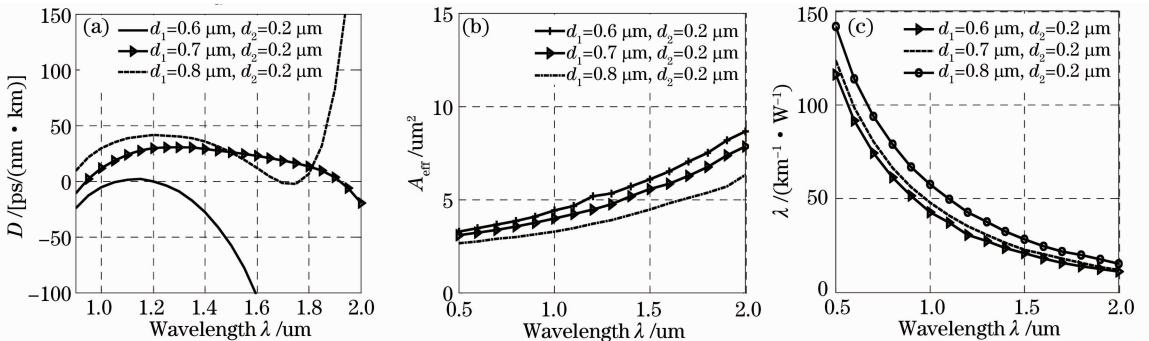


图 5 色散平坦 PCFs 的特性。(a)色散系数曲线;(b)有效模场面积曲线;(c)非线性系数曲线

Fig. 5 Properties of PCFs with flattened dispersion. (a) Curves of dispersion coefficient; (b) curves of effective mode field area; (c) curves of nonlinear coefficient

本文设计的五角芯型结构的 PCF,结构不对称,制备难度较六边形、四边形纤芯结构的 PCF 要大,但是随着技术的发展,也是可以实现的。英国南安普敦大学光电研究中心提出了一种利用超声波打孔机制作微结构多孔预制棒的方法,并成功利用一台旋转声波打孔机对微结构预制棒进行了打孔^[15]。在使用冷却液的同时,以高速运行,产生了一种自动清洁的方式用以减少钻石工具粘合物。如果利用数字控制超声波打孔机,就能在减少人力花费的情况下制作结构更加复杂的玻璃预制棒。超声波打孔法的优点是可以随意制备出多种不同结构的 PCF。本文中的五角芯型 PCF 预制棒可以用超声波打孔法制备。

5 结 论

因具有色散平坦特性的光子晶体光纤在光学参变放大和超连续谱产生等方面具有重要的意义,设计了一种具有新型结构的色散平坦光子晶体光纤,

利用全矢量有限元分析法研究了第一层气孔间及纤芯引入微孔对色散特性的影响;并通过优化参数得到了三种具有较高非线性的低色散平坦甚至色散超平坦的 PCF 结构;给出了这种复杂结构 PCF 预制棒的制备方法。这为色散平坦光子晶体光纤的设计、制造等提供了一种新的方法。

参 考 文 献

- Philip Russell. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299(5605): 358-362.
- Li Deyue, Zhou Guiyao, Xia Changmin, *et al.*. Theoretical investigation of photonic crystal fiber with highly nonlinear and birefringent[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1105003. 李德月, 周桂耀, 夏长明, 等. 高非线性高双折射光子晶体光纤特性的理论研究[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1105003.
- Zhang Lichao, Hou Lantian, Zhou Guiyao. Study on dispersion compensation property of octagonal photonic crystal fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(5): 054217. 张立超, 侯蓝田, 周桂耀. 八边形光子晶体光纤色散补偿特性分析[J]. 物理学报, 2011, 60(5): 054217.
- Hui Zhanqiang, Gong Jiamin, Liang Meng, *et al.*. Demonstration of all-optical RZ-to-NRZ format conversion based on self phase modulation in a dispersion flattened highly nonlinear

- photonic crystal fiber[J]. *Optics & Laser Technol*, 2013, 54: 7–14.
- 5 Shu Jie, Yan Peiguang, Zhao Jian, *et al.*. Supercontinuum generation in web-like microstructure optical fiber[J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(s1): S10602.
- 6 Shao Xiaojie, Yang Dongxiao, Geng Dan. Wave length conversion based on four wave mixing in photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 652–655.
邵潇杰, 杨冬晓, 耿丹. 基于光子晶体光纤四波混频效应的波长转换研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 652–655.
- 7 Xu Huizhen, Zhou Changjie. Highly nonlinear all-solid photonic crystal fibers with low dispersion slope[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1106001.
徐惠真, 周昌杰. 全固高非线性低色散斜率光子晶体光纤设计[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1106001.
- 8 Wang Dan, Zheng Yi. Numerical investigation of a ultra-broadband low-dispersion holey fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0806005.
王丹, 郑义. 一种超宽带低色散多孔光纤的数值研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0806005.
- 9 Mayilamu • Musideke, Yao Jianquan, Lu Ying. Solid-core octagonal photonic crystal fiber with high nonlinearity and low confinement loss at 1.55 μm wavelength [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 040601.
马依拉木 • 木斯得克, 姚建铨, 陆颖. 1.55 μm 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[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 040601.
- 10 Jian Duo, Liu Min, He Dingding, *et al.*. Research of photonic crystal fiber with high nonlinear flattened dispersion property[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 187–190.
简多, 刘敏, 何丁丁, 等. 高非线性色散平坦光子晶体光纤的研究[J]. *激光技术*, 2013, 37(2): 187–190.
- 11 Jiyoung Park, Sejin Lee, Sungrae Lee, *et al.*. Dispersion control in square lattice photonic crystal fiber using hollow ring defects [J]. *Opt Express*, 2012, 20(5): 5281–5290.
- 12 Shubi Felix Kaijage. Porous-core photonic crystal fiber for low loss terahertz wave guiding[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2013, 25(15): 1454–1457.
- 13 Yang Hanrui, Li Xuyou, Hao Jinhui, *et al.*. Birefringence of quinquangular-core polarization-maintaining photonic crystal fiber [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(3): 355–358.
杨汉瑞, 李绪友, 郝金会, 等. 五角芯型保偏光子晶体光纤(Q-PM-PCF)的双折射[J]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(3): 355–358.
- 14 B M A Rahman, N Kejalakshmy, A Agrawal, *et al.*. Characterizations of photonic crystal fibers by using a full-vectorial finite element method[C]. //The International Society for Optical Engineering, 2006, 6369: 636904.
- 15 Xian Feng, Arshad K Mairaj, Daniel W Hewak, *et al.*. Nonsilica glasses for holey fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, 23(6): 2046–2054.

栏目编辑:王晓琰