

文章编号: 1000-7032(2010)03-0449-05

# 基于双芯光子晶体光纤的 低非线性宽带色散补偿光纤的设计

侯尚林, 韩佳巍, 朱 鹏, 李志杰

(兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 采用矢量光束传输法数值模拟了基于模式耦合的双芯光子晶体光纤的色散和非线性与其结构的关系。结果表明:通过在包层中移除一层空气孔以形成外纤芯并调整内外纤芯之间的距离及包层空气孔的占空比,内外纤芯间的模式耦合可以在宽带范围内发生,导致产生大负色散。同时,由于光场分布在两个纤芯内,增大了模场面积,产生低非线性,可以实现低非线性宽带色散补偿。

**关键词:** 光纤光学; 光子晶体光纤; 矢量光束传输法; 色散; 非线性

**中图分类号:** TN929.11

**PACS:** 42.81.Dp

**PACC:** 4280M; 6185; 4281F

**文献标识码:** A

## 1 引 言

在现代长距离高速光通信系统中,色散是限制通信容量的主要因素。目前,由于色散补偿光纤(Dispersion Compensation Fibers, DCF)技术具有相对简单和成熟,升级潜力大,性能稳定等优点而被广泛应用于色散补偿<sup>[1,2]</sup>。常规 DCF 采用多包层和增大纤芯与包层折射率差的办法,使纤芯导模与包层模式间发生耦合而产生大负色散<sup>[3]</sup>。在理论设计与实验验证中,色散补偿光纤的大负色散值已经分别达到  $-5\ 100$ <sup>[4]</sup>,  $-1\ 800\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ <sup>[5]</sup>。

近年来,类似常规 DCF 的双芯结构在光子晶体光纤(Photonic Crystal Fibers, PCFs)的设计中得以采用<sup>[6~8]</sup>。普通 PCF 通常由纤芯与呈周期性分布的空气孔包层组成。与普通 PCF 不同,双芯光子晶体光纤(Dual-Core Photonic Crystal Fibers, DC-PCFs)的内纤芯采用纯硅或高折射率掺杂材料,外纤芯通过减小或移除包层中的一层空气孔形成,模场分布由内纤芯模式向外纤芯模式变化可以实现大负色散。Gerome 等<sup>[6]</sup>最先将双芯结构应用于 PCF 的设计,且数值模拟的大负色散可以达到  $-10\ 000\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。随后,在 Huttunen 等<sup>[9]</sup>关于 DC-PCF 结构的报道中,通过

掺杂提高了内纤芯折射率且实现了  $-55\ 000\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  的大负色散。Soan Kim 等<sup>[10]</sup>采用掺杂硅酸盐的高折射率材料形成内纤芯,外纤芯通过将包层中第一层空气孔向内纤芯移动而形成,且在  $1\ 550\ \text{nm}$  处可以实现  $-600\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  的负色散。然而在上述设计中,通过掺杂提高内纤芯的折射率会带来较高的损耗及模式噪声。Yang Sigang 等<sup>[11]</sup>通过锗掺杂得到具有低折射率的内纤芯,去除包层中的一层空气孔形成外纤芯,其色散峰值可达  $-1\ 203\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,但为了保证内纤芯为单模传输,掺杂范围需要尽可能小,这将会带来实际制造的困难。Takeshi Fujisawa 等<sup>[12]</sup>在 DC-PCF 中摒弃了内纤芯掺杂技术,而是采用小直径空气孔形成外纤芯,结果发现通过增加内外纤芯之间的距离可以实现更大的负色散和更好的色散补偿。然而该设计中色散曲线对于其外纤芯的小空气孔直径的大小变化极端灵敏,从而使得其色散特性在实际制造中难以实现。近期,通过在 PCF 包层的一层空气孔中注入折射率可调材料以形成高折射率的外纤芯,一种可实现大负色散且色散可调的新型 DC-PCF 被报道<sup>[13,14]</sup>。然而,由于这种结构中内外纤芯的模场半径并不匹配,其与普通单模传输光纤的耦合损耗会很高。

收稿日期: 2009-07-14; 修订日期: 2010-03-12

基金项目: 甘肃省自然科学基金(3ZS062-B25-036); 兰州理工大学博士启动基金; 优秀青年教师培养计划资助项目

作者简介: 侯尚林(1970-), 男, 甘肃秦安人, 博士, 主要从事高速光纤通信器件与光纤传感技术、光子晶体光纤和光纤光栅技术的研究。  
E-mail: houshanglin@gmail.com, Tel: (0931)2757032

为了避免由内纤芯掺杂和小直径空气孔外纤芯所带来的实际制造困难,本文采用了一种简单 DC-PCF 结构,其内纤芯为纯硅材料,外纤芯通过移除包层中的一层空气孔形成。采用矢量光束传输法 (Vectorial Beam Propagation Method, VBPM)<sup>[15~17]</sup> 对此种 DC-PCF 的色散及非线性进行了理论模拟,研究了包层占空比及内外纤芯之间的距离等结构参数对 DC-PCF 的色散及非线性系数的影响,为设计基于 DCF 的低非线性色散补偿光纤提供了理论基础。

## 2 数值模型及理论分析

关于 PCF 的理论设计需要在具备技术可行性的同时减少实际制造的困难。在 PCF 中采用基于模式耦合的双芯结构的初衷是为了在中心工作波长 1 550 nm 处实现大负色散以进行色散补偿<sup>[6]</sup>;另一方面,光纤的大负色散通常伴随着高非线性系数,这就意味着光纤中的强非线性会限制光功率的传输<sup>[18]</sup>。色散和非线性是设计 PCF 的重要因素。本文采用 VBPM 模拟了一种可具备大负色散与低非线性的 DC-PCF,其横截面如图 1 所示。该光纤是在纯石英基体上的沿光纤轴分布周期性六角形的空气孔,内纤芯为空气孔包层中心处引入一个空气孔缺陷而形成,外纤芯通过完全移除包层中的一层空气孔而形成(移除处如黑色空心圆所示), $d$  和  $\Lambda$  分别为包层空气孔的直径和节距。另定义  $N$  为内外纤芯之间的空气孔层数(图 1 中  $N=1$ )。

DC-PCF 的总色散为<sup>[19]</sup>:

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

其中  $\lambda$  是传播波长, $c$  为光速, $n_{\text{eff}}(\lambda)$  为有效折射率, $D_m(\lambda)$  是材料色散。

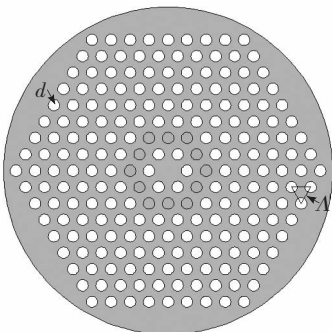


图 1 双芯光子晶体光纤的横截面图

Fig. 1 The cross-section of DC-PCF

在分析光纤的非线性效应时需要用到非线性系数这个重要的物理量<sup>[20]</sup>:

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

其中  $n_2 = 2.76 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  是石英的非线性折射率,光纤的基模有效面积  $A_{\text{eff}}$  定义为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left( \iint_s |\mathbf{E}_t|^2 dx dy \right)^2}{\iint_s |\mathbf{E}_t|^4 dx dy}, \quad (3)$$

其中  $\mathbf{E}_t$  是横电场矢量, $s$  是 PCF 的横截面部分。

## 3 计算结果与讨论

图 2(a)和(b)分别为 DC-PCF 的包层占空比为  $d/\Lambda=0.9$  时,色散和非线性曲线随内外纤芯之间距离的变化。图 2(a)中,当  $N=1,3$  时,色散曲线随波长的增加而减小,且在  $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$  的宽带波段内同时具备大负色散和负色散斜率,中心工作波长 1 550 nm 处的负色散分别达到  $-16\,500 \text{ ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$  ( $N=1$ ) 和  $-29\,645 \text{ ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$  ( $N=3$ );当  $N$  增大为 5 和 7 时,色散曲线在此宽带波段内于零色散附近平坦。对于 DC-PCF 而言,有效折射率曲线是波长的函数,短波长范围内其为内纤芯有效折射率,长波长范围内其为外纤芯有效折射率。内外纤芯的模式分别有着明显不同的有效折射率,当模式分布由内纤芯模式突变为外纤芯模式时,有效折射率曲线就会出现扭结现象。内外纤芯的模式在有效折射率曲线出现扭结时所对应的波长处发生耦合,模式分布由内纤芯模式突变为外纤芯模式,由此产生大负色散且此大负色散可以通过改变内外纤芯模式的相对斜率来调节<sup>[12]</sup>。由图 2(a)可见,随着在 DC-PCF 中引入一层被移去的包层空气孔而形成外纤芯,内外纤芯之间的模式耦合在宽带范围内发生,使得光纤在宽带范围内具备大负色散与负色散斜率,有利于实现宽带色散补偿。图 2(b)中,当  $N=1$  时,非线性系数曲线在  $1.24 \mu\text{m}$  处由高值向低值发生突变且在  $1.24 \sim 1.60 \mu\text{m}$  宽带波段内保持低于  $3.9 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ;当  $N=3$  时,非线性系数曲线在  $1.20 \sim 1.58 \mu\text{m}$  宽带波段内保持高于  $34 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,且在  $1.58 \mu\text{m}$  处发生突变。当  $N$  增大为 5 和 7 时,非线性系数曲线在  $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$  宽带波段内保持高于  $34 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  且随波长的

增加而降低。对于 DC-PCF 而言, 内外纤芯之间的模式耦合也会使得非线性系数曲线发生突变<sup>[7]</sup>。短波长范围内模式分布主要集中于内纤芯, 基模有效面积定义为其内纤芯模场面积; 长波长范围内模式分布主要集中于外纤芯, 基模有效面积定义为其外纤芯模场面积; 在模式耦合波长处模式分布在内外纤芯同时存在, 基模有效面积定义为其内纤芯和外纤芯共同的模场面积<sup>[11]</sup>。在包层中移除一层空气孔形成外纤芯后大幅提高了外纤芯模场面积, 且耦合波长处外纤芯模场面积比内纤芯模场面积要大很多, 由此会使得非线性系数在耦合波长处大幅降低<sup>[11]</sup>。在长于耦合波长的宽带范围内, 除去较小的内纤芯模场面积后, 光纤基模有效面积为较大的外纤芯面积, 因此其非线性系数曲线仍旧可以保持低数值。

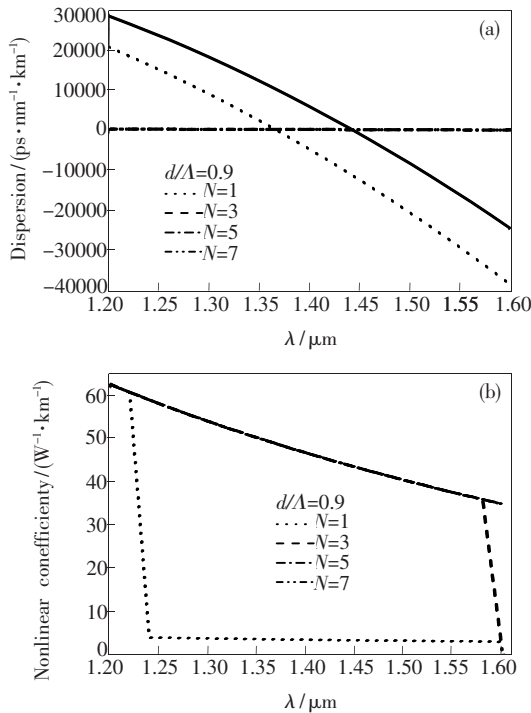


图2 DC-PCF 的色散 (a) 和非线性 (b) 曲线随内外纤芯间距离的变化

Fig. 2 The dispersive (a) and nonlinear curves (b) of DC-PCF as a function of the distance between the inner and outer cores

图 3(a) 和 (b) 分别为 DC-PCF 的内外纤芯之间的空气孔层数  $N = 1$  时, 色散和非线性曲线随包层占空比的变化。图 3(a) 中, 当  $d/\Lambda = 0.3, 0.6$  时, 色散曲线在  $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$  的宽带波段内于零色散附近平坦; 当  $D/\Lambda$  增大为  $0.9$  时, 色散曲线在此宽带范围内同时具有大负色散和负色散

斜率且中心工作波长  $1\ 550\ \text{nm}$  处的负色散达到  $-16\ 500\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。图 3(b) 中, 当  $d/\Lambda = 0.3, 0.6$  时, 非线性曲线在  $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$  的宽带范围内保持低于  $3.6\ \text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ; 当  $d/\Lambda$  增大为  $0.9$  时, 非线性曲线在  $1.24 \mu\text{m}$  处发生由高数值向低数值的突变, 且在长于突变波长的波段范围内保持低于  $3.9\ \text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。由图 3 所示, 当内外纤芯之间的距离一定时, 通过调整包层空气孔的占空比可以使得内外纤芯的模式耦合在宽带范围内发生, 从而使得大负色散、负色散斜率和低非线性系数在宽带范围得以同时实现, 有利于低非线性宽带色散补偿。

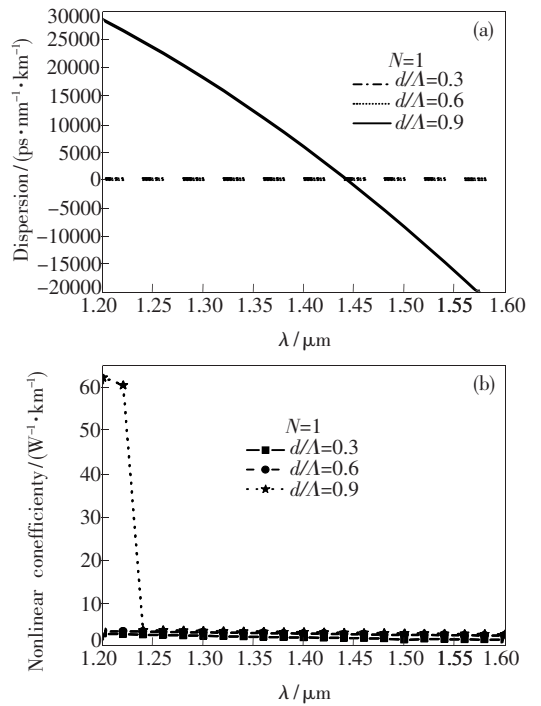


图3 DC-PCF 的色散 (a) 和非线性曲线 (b) 随包层占空比的变化

Fig. 3 The dispersive (a) and nonlinear curves (b) of DC-PCF as a function of the air-filling fraction in the cladding

## 4 结 论

采用矢量光束传输法对基于模式耦合的 DC-PCF 的色散和非线性特性与包层占空比和内外纤芯空之间空气孔层数的关系进行了数值分析。结果发现通过调节内外纤芯之间的距离和包层空气孔占空比, 模式耦合可在宽带范围内发生, 由此在中心工作波长  $1\ 550\ \text{nm}$  处得到了  $-16\ 500\ \text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  的大负色散, 并且在  $1.24 \sim 1.60 \mu\text{m}$

的宽波段范围内实现了低于  $3.9 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  的非线性系数。数值模拟表明:DC-PCF 在宽带波长范围内可以同时具备很大的负色散、负色散斜率

和低非线性系数,从而实现低非线性宽带色散补偿。为基于宽带色散补偿 PCF 的光纤器件的设计提供理论参考。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Yang Guangqiang, Zhang Xia, Ren Xiaomin, *et al.* Experimental research on dispersion compensation of 10 Gb/s clock signal using photonic crystal fiber [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2005, **32**(9):1221-1224 (in Chinese).
- [ 2 ] Hou Shanglin, Han Jiawei. Design of a novel microstructure fiber for broadband dispersion compensation with low nonlinearity [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(6):882-887 (in Chinese).
- [ 3 ] Grüner-Nielsen L, Wandel M, Kristensen P, *et al.* Dispersion-compensating fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11):3566-3579.
- [ 4 ] Thyagarajan K, Varshney R K, Palai P, *et al.* A novel design of a dispersion compensating fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11):1510-1512.
- [ 5 ] Auguste J L, Jindal R, Blondy J M, *et al.*  $1800 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  chromatic dispersion at  $1.55 \mu\text{m}$  in dual cocentric core fibre [J]. *Electronics Lett.*, 2000, **36**(20):1689-1691.
- [ 6 ] G r me F, Auguste J L, Blondy J M. Design of dispersion-compensating fibers based on a dual concentric-core photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23):2725-2727.
- [ 7 ] Ni Y, Zhang L, An L, *et al.* Dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, **16**(6):1516-1518.
- [ 8 ] Wang Daobin, Hou Shanglin, Ren Guodong, *et al.* Band structure of Suzuki phase photonic crystal [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(5):885-890 (in Chinese).
- [ 9 ] Huttunen A, Torma P. Optimization of dual-core and microstructure fiber geometries for dispersion compensation and large mode area [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(2):627-635.
- [ 10 ] Kim S, Kee C S, Ko D K, *et al.* A dual-concentric-core photonic crystal fiber for broadband dispersion compensation [J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2006, **49**(4):1434-1437.
- [ 11 ] Yang S, Zhang Y, Peng X. Theoretical study and experimental fabrication of high negative dispersion photonic crystal fiber with large area mode field [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7):3015-3023.
- [ 12 ] Fujisawa T, Saitoh K, Wada K, *et al.* Chromatic dispersion profile optimization of dual-concentric-core photonic crystal fibers for broadband dispersion compensation [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2):893-900.
- [ 13 ] Zhang Z, Shi Y, Bian B, *et al.* Large negative dispersion in dual-core photonic crystal fibers based on optional mode coupling [J]. *IEEE Photonics Technology Lett.*, 2008, **20**(16):1402-1404.
- [ 14 ] Yu C, Liou J, Huang S, *et al.* Tunable dual-core liquid-filled photonic crystal fibers for dispersion compensation [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(7):4443-4451.
- [ 15 ] Saitoh K, Koshiba M. Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: application to photonic crystal fibers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(7):927-933.
- [ 16 ] Scarmozzino R, Osgood Jr R M. Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integrated-optics applications [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **8**(5):724-731.
- [ 17 ] Scarmozzino R, Gopinath A, Pregla R, *et al.* Numerical techniques for modeling guided-wave photonic devices [J]. *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(1):150-162.
- [ 18 ] Liu Y, Berkey G. Single-mode dispersion-shifted fibers with effective area over  $100 \mu\text{m}^2$  [C]. New Jersey: IEEE, 1998, 41-42.
- [ 19 ] Shen L P, Huang W P, Chen G X, *et al.* Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2003, **15**(4):540-542.
- [ 20 ] Mortensen N A. Effective area of photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7):341-348.

# A Novel Design of a Dual-core Photonic Crystal Fiber for Broadband Dispersion Compensation with Low Nonlinearity

HOU Shang-lin, Han Jia-wei, ZHU Peng, LI Zhi-jie

(*School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*)

**Abstract:** Dispersion and nonlinearity are the main adverse factor in modern long-distance and high bit-rate optical transmission systems. Recently, the dual-concentric-core structures, used in conventional dispersion compensation fibers have also been adopted in the design of photonic crystal fibers (PCFs). Large negative dispersion is always associated with small effective area, which leads to undesirable nonlinear effects during optical signal transmission. By employing the vectorial beam propagation method, a novel dual-core photonic crystal fiber based on pure silica for broadband dispersion compensation with low nonlinearity was proposed. The influence of the air-filing fraction in cladding and the distance between the inner and outer cores on the dispersion and nonlinear coefficient was numerically investigated. The simulation results showed that, by introducing the outer core by removing one air-hole ring in the cladding and adjusting the distance between the inner and outer cores and the air-filing fraction, the mode coupling of the inner and outer cores can take place in a wide wavelength range, which can induce larger negative dispersion. Meanwhile, since the light field is distributed in the two cores, the effective mode field area is larger so that the nonlinear coefficient is lower. These simulation results will be useful for designing broadband dispersion compensation fibers with low nonlinearity.

**Key words:** fiber optics; photonic crystal fiber; vectorial beam propagation method; dispersion; nonlinearity

**CLC number:** TN929.11

**PACS:** 42.81.Dp

**PACC:** 4280M; 6185; 4281F

**Document code:** A