

文章编号: 0253-2239(2008)01-0027-04

# 双芯复合格点光子晶体光纤的负色散特性

王红华 薛文瑞 张文梅

(山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

**摘要** 介绍了一种双芯复合格点负色散光子晶体光纤,其包层是由连续电介质纯硅背景上挖出的两种大小不同的空气孔构成,芯区是由掺锗的高折射率的材料构成。为了实现负色散,还移去了包层中的一圈空气孔。采用频域有限差分法对其负色散特性进行分析表明,通过调整空气孔间距和两种空气孔的尺寸,可以得到不同程度的宽带负色散。当内芯半径取  $0.95 \mu\text{m}$ ,孔间距取  $2.15 \mu\text{m}$ ,大空气孔直径取  $1.9 \mu\text{m}$ ,小空气孔直径取  $1.1 \mu\text{m}$  时,可在  $1.55 \mu\text{m}$  处实现宽带负色散,其半峰全宽超过了  $200 \text{ nm}$ 。这种光纤的包层中空气孔呈六边形分布,空气孔的尺寸均大于  $1 \mu\text{m}$ ,降低了制作的难度。这种光纤可以用于波分复用光纤通信系统中的宽带色散补偿。

**关键词** 光纤光学; 光子晶体光纤; 负色散; 频域有限差分方法

**中图分类号** TN913.7 **文献标识码** A

## Negative Dispersion Properties of Photonic Crystal Fiber with Dual Core and Composite Lattice

Wang Honghua Xue Wenrui Zhang Wenmei

(College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** A negative dispersion photonic crystal fiber (PCF) with dual core and composite lattice is proposed. The cladding is composed of two different air holes based on pure silica, and the inner core is formed with high effective index material doped with germanium. In order to realize negative dispersion, a ring of air holes in the cladding is removed. Using the finite difference frequency domain algorithm, the negative dispersion properties is analyzed. Results show that broadband negative dispersion with different levels can be achieved by optimizing air-hole pitch and two air-hole diameters. Broadband negative dispersion with full width at half maximum exceeding  $200 \text{ nm}$  is realized at  $1.55 \mu\text{m}$  wavelength when the radius of the inner core, the air-hole pitch, the diameter of the larger hole and the diameter of the smaller hole is  $0.95 \mu\text{m}$ ,  $2.15 \mu\text{m}$ ,  $1.9 \mu\text{m}$ ,  $1.1 \mu\text{m}$  respectively. To decrease the fabrication difficulty, air holes of more than  $1 \mu\text{m}$  and hexagonal lattice are adopted. So this fiber can be used for broadband dispersion compensation in wavelength-division multiplexing optical fiber communication systems.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fiber (PCF); negative dispersion; finite difference frequency domain (FDFD) method

## 1 引 言

色散是光纤的一个重要参量,可使脉冲展宽,产生误码。因此在长距离的光纤通信传输系统中,必须采取色散补偿<sup>[1~4]</sup>。

采用光子晶体光纤<sup>[5~7]</sup>进行色散补偿最早可追溯到 1999 年, T. A. Birks 等<sup>[8]</sup>制作了一种由单一折射率石英材料和沿轴向排列的规则空气孔组成的

光子晶体色散补偿光纤。随后,基于双芯高负色散的光子晶体光纤得到了广泛的研究<sup>[9~13]</sup>。然而这些结构的光纤只是单有高负色散值,而忽视了负色散的带宽,半峰全宽少于  $30 \text{ nm}$ <sup>[14]</sup>。2006 年 10 月,杨四刚等人提出了一种内芯为橘子状的双芯光子晶体光纤<sup>[14]</sup>,在  $1.52 \sim 1.58 \mu\text{m}$  波长范围内获得了大约  $-400 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  的色散值,实现了宽带色散

收稿日期: 2007-04-26; 收到修改稿日期: 2007-06-29

基金项目: 山西省自然科学基金(20041036)资助课题。

作者简介: 王红华(1981-),女,山东烟台人,硕士研究生,主要从事光纤光学和光子晶体光纤等方面的研究。

导师简介: 薛文瑞(1967-),男,山西河曲人,教授,硕士生导师,主要从事导波光学、光纤光学和光子晶体光纤等方面的研究。E-mail: wrxue@sxu.edu.cn

补偿。本文在前人工作的基础上, 试图寻求一种更简单、更实用的宽带色散补偿光纤。

## 2 光纤结构与计算方法

双芯复合格点负色散光子晶体光纤的横截面结构如图 1 所示, 它的包层是由连续电介质纯硅背景上挖出的两种不同直径的圆形空气孔构成, 这些空气孔的中心严格按六边形格点排列。内芯是一个圆形的低掺锗区, 折射率为 1.47, 外芯是移去第四层空气孔形成的纯硅环, 折射率为 1.45。内芯和外芯组成了同轴的双芯结构。包层可以向外延伸很多层, 为了简化, 图 1 只画出了有限的几层。 $\Lambda$  为相邻空气孔间的中心距离,  $d_1$  为包层中大空气孔的直径,  $d_2$  为包层中小空气孔的直径。与 F. Gerome 等<sup>[9,11]</sup> 提出的六边形格点双芯负色散光子晶体光纤相比, 采用复合格点的结构可以提供调节光纤色散特性更多的自由度。空气孔的中心严格按六边形格

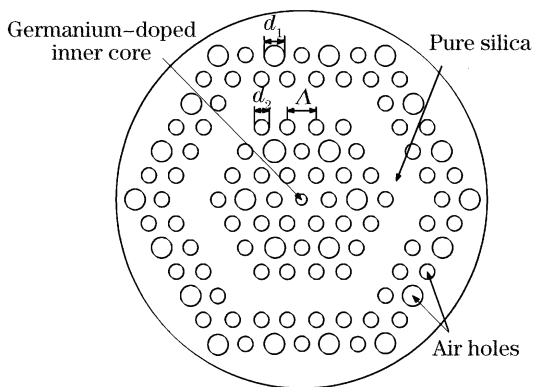


图 1 复合格点双芯负色散光子晶体光纤横截面  
Fig. 1 Cross section of the dual-core and negative dispersion photonic crystal fiber with composite lattices

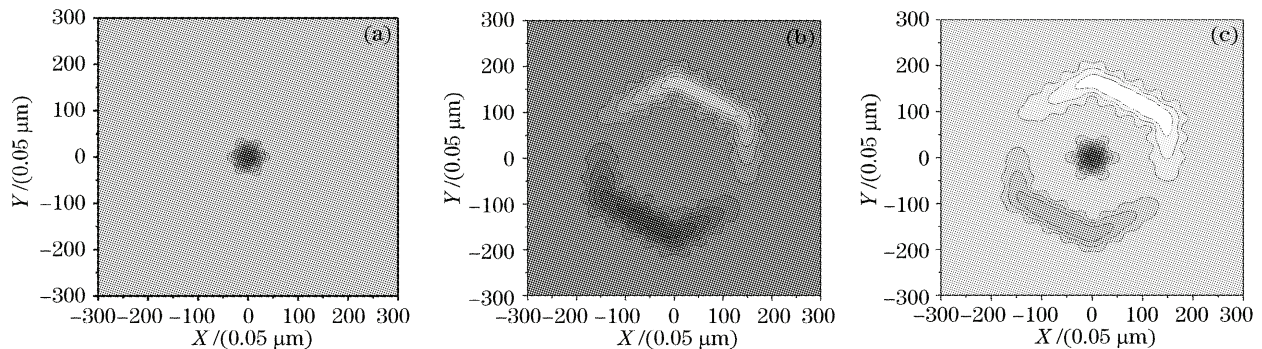


图 2 (a) 波长较短, (b) 波长较长, (c) 波长从短变长过渡时 Hy 场的典型的分布图

Fig. 2 Typical mode pattern of Hy field at (a) the shorter wavelength, (b) the longer wavelength, (c) the interim from shorter wavelength to longer wavelength

由于这种光纤结构的内芯是一个圆形的低掺锗区, 它的半径控制着有效折射率的转折点所对应的波长  $\lambda_0$ , 从而对负色散峰值所处的波长位置有直接

点排列, 易于实际制作。

采用以各向异性良匹配层 (APML) 作为吸收边界的全矢量频域有限差分方法 (FDFD)<sup>[15~19]</sup> 进行了大量计算, 分析了这种光子晶体光纤结构。采用这种方法时, 只要给定光纤的几何参量和电磁参量, 输入自由空间中的波长, 可以计算出特定波长下的传播常量  $\beta$ , 有效模折射率  $n_{\text{eff}}$  和每个模式的场分布。光子晶体光纤的波导色散  $D$  可以由 (1) 式计算:

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

式中  $c$  是真空中光速。光子晶体光纤的材料色散由塞尔迈耶尔 (Sellmeier) 方程给出。总色散为波导色散和材料色散之和。

## 3 结果与分析

图 2 是这种负色散光子晶体光纤中可以传播的基模场的 Hy 分量在光纤横截面内的分布。图 2(a) 是波长较短时的情况, 场主要集中在内芯传播; 图 2(b) 是波长较长时的情况, 场主要集中在外芯传播; 而图 2(c) 是波长从短变长时过渡区的情况, 场一部分在内芯传播, 一部分在外芯传播。从计算可以发现, 这种结构的光纤支持两个超模, 即基模和二阶模。当波长小于某一波长  $\lambda_0$  时, 场基本上集中在内芯传播; 当波长大于  $\lambda_0$  时, 场又主要集中在外芯传播。而当波长在  $\lambda_0$  附近时, 场在内芯和外芯均有分布。这种传播现象导致了光纤的有效折射率在  $\lambda_0$  处将发生转折, 从而产生负色散。因此, 可以通过调节光纤的结构参量, 使得波长  $\lambda_0$  尽可能地处于  $1.55 \mu\text{m}$  光纤通信窗口附近。

影响。为了光纤的实用性, 希望负色散出现在通信窗口  $1.55 \mu\text{m}$  附近。通过大量的计算发现, 低掺锗内芯区的半径为  $0.95 \mu\text{m}$  时, 负色散的峰值点才出

现在  $1.55 \mu\text{m}$  附近。所以在该值固定的基础上,在感兴趣的参量范围内分析该光子晶体光纤的结构参量对其负色散特性的影响。图 3 为该光子晶体光纤的有效折射率和负色散值  $D$  与小空气孔直径  $d_2$  的关系曲线。计算时,令孔间距  $\Lambda$  和大空气孔直径  $d_1$  取确定值,小空气孔直径  $d_2$  从  $0.9 \mu\text{m}$  变化到  $1.1 \mu\text{m}$ 。从图 3 中可以看出,有效折射率在某一波长  $\lambda_0$  处均会发生转折,从而导致负色散在该处出现

一个峰值点。随着  $d_2$  的增大,负色散的峰值点逐渐向短波长方向移动,在越接近  $1.55 \mu\text{m}$  波长处,负色散的峰值越小,但半峰全宽在增大,可见负色散的峰值随  $d_2$  的变化趋势与半峰全宽随  $d_2$  的变化趋势是相反的。为了让负色散的峰值点尽可能处在  $1.55 \mu\text{m}$  波段,先选择小空气孔直径  $d_2$  取  $1.0 \mu\text{m}$ ,来进一步计算。

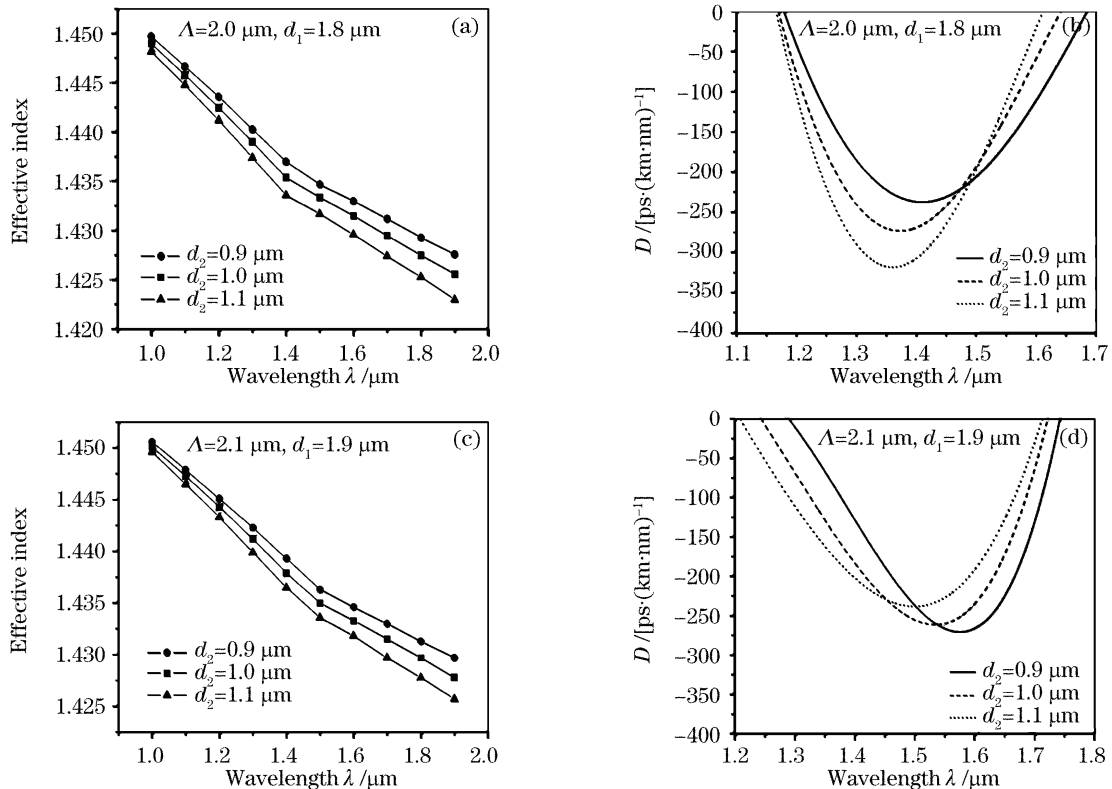


图 3 小空气孔直径  $d_2$  对有效折射率和负色散特性的影响

Fig. 3 Effects of changing the diameter of small air hole  $d_2$  on the effective index and negative dispersion

图 4 为该光子晶体光纤的负色散值  $D$  随间距  $\Lambda$  和大空气孔直径  $d_1$  变化的关系曲线。图中小空气孔

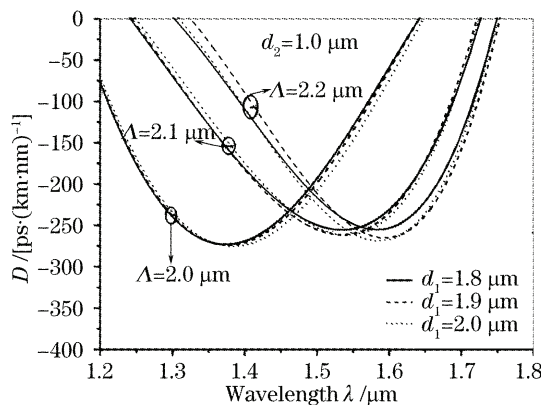


图 4 间距  $\Lambda$  和大空气孔直径  $d_1$  的变化对负色散特性的影响

Fig. 4 Effects of the air-hole pitch  $\Lambda$  and the diameter of large air hole  $d_1$  on the negative dispersion

直径  $d_2$  取  $1.0 \mu\text{m}$ ,间距  $\Lambda$  从  $2.0 \mu\text{m}$  变化到  $2.2 \mu\text{m}$ ,大空气孔直径  $d_1$  从  $1.8 \mu\text{m}$  变化到  $2.0 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出,在所选取的结构参量范围内,负色散在某一波长处都有一峰值点。在  $\Lambda$  和  $d_2$  一定时, $d_1$  越大,负色散的峰值点越低,且峰值点的位置有微小变化。在  $d_1$  和  $d_2$  一定的条件下, $\Lambda$  越大,负色散的峰值点越向长波长方向移动,且越是靠近  $1.5 \mu\text{m}$  处,峰值点的值越小。

由图 3 和图 4 不难看出,小空气孔的直径对负色散特性的影响比大空气孔的直径对负色散特性的影响较显著,大空气孔的直径对色散曲线有微调作用。增大孔间距和增大小空气孔的直径对负色散峰值点的移动方向的影响刚好相反,因此要想获得  $1.55 \mu\text{m}$  处负色散的最低点,必须协调好二者的关系。

图 5 给出了得到的一条最优负色散曲线,它在

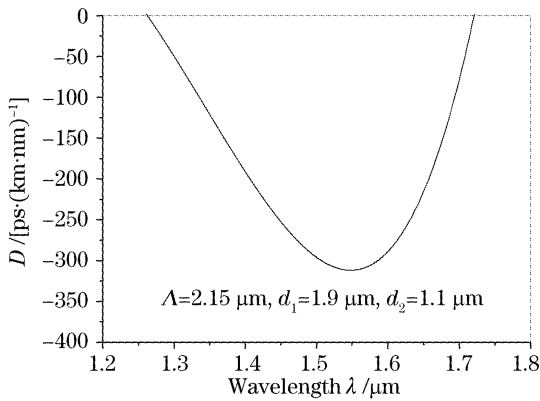


图 5 最优的负色散曲线

Fig. 5 A most optimal negative dispersion curve

1.55  $\mu\text{m}$  处的色散值为  $-312 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。也就是说,在所计算的参量范围内,只有取图 5 中所示的参量时,在 1.55  $\mu\text{m}$  波长附近,这条色散曲线的峰值才最低、半峰全宽也最宽。这时的结构参量分别是,  $\Lambda=2.15 \mu\text{m}$ ,  $d_1=1.9 \mu\text{m}$ ,  $d_2=1.1 \mu\text{m}$ , 负色散的半峰全宽超过了 200 nm。

从上面计算的这些数据中可以看出,这种光子晶体光纤可以产生宽带负色散。

## 4 结 论

采用频域有限差分法对新型复合格点双芯负色散光子晶体光纤负色散特性进行了研究。通过调节光纤的结构参量,可以得到不同程度的宽带负色散。例如,在 1.55  $\mu\text{m}$  波长处,负色散的半峰全宽超过了 200 nm。该光纤采用了复合格点结构,空气孔的中心严格按六边形格点排列,且采用的空气孔尺寸均大于 1  $\mu\text{m}$ ,提供了较多的设计自由度,又降低了实际制作的难度。光纤内芯为低掺杂区,折射率为 1.47,而纯硅背景为 1.45,以目前掺杂工艺的水平,是比较容易实现的。因此,这种光子晶体光纤既易于实际制作,又可以用作波分复用光纤通信系统中的宽带色散补偿光纤。

## 参 考 文 献

- 1 M. Artiglia. Comparison of dispersion compensation techniques for lightwave systems[C]. *OFC '98*, San Jose, 1998, **Thv2**: 364~365
- 2 Y. K. Park, P. D. Yeates, J. M. P. Delavaux *et al.*. A field demonstration of 20 Gb/s capacity transmission over 360 km installed standard (non-DSF) fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(7): 816~818

- 3 S. Watanabe, T. Naito, T. Chikama. Compensation of chromatic dispersion in a single mode fiber by optical phase conjugation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(1): 92~95
- 4 Huang Jun, Huang Dexiu, Li Hong. Dispersion compensation fiber in communication syestem[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(4): 11~12  
黄俊,黄德修,李宏. 通信系统中色散补偿光纤的研究[J]. *光学与光电技术*, 2005, **3**(4): 11~12
- 5 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
- 6 J. Broeng, D. Mogilevstev, S. E. Barkou *et al.*. Photonic crystal fibers; a new class of optical waveguides[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 1999, **5**(3): 305~330
- 7 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66  
王清月,胡明列,柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- 8 T. A. Birks, D. Mogilevtsev, J. C. Knight *et al.*. Dispersion compensation using single-material fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 674~676
- 9 F. Gerome, J.-L. Auguste, J.-M. Blondy. Very high negative chromatic dispersion in a dual concentric core photonic crystal fiber[C]. *OFC '04*, 2004, Los Angeles, California, WA2
- 10 Y. Ni, L. Zhang, L. An *et al.*. Dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(6): 1516~1518
- 11 F. Gerome, J.-L. Augugste, J.-M. Blondy. Design of dispersion-compensating fibers based on a dual-concentric-core photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23): 2725~2727
- 12 A. Huttunen, P. Torma. Optimization of dual-core and microstructure fiber geometries for dispersion compensation and large mode area[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(2): 627~635
- 13 S. Yang, Y. Zhang, X. Peng *et al.*. Theoretical study and experimental fabrication of high negative dispersion photonic crystal fiber with large area mode field[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(7): 3015~3023
- 14 S. Yang, Y. Zhang, L. He *et al.*. Broadband dispersion-compensating photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(19): 2830~2832
- 15 Z. Zhu, T. G. Brown. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(17): 853~864
- 16 S. Guo, F. Wu, S. Albin. Loss and dispersion analysis of microstructured optical fibers by finite-difference method[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(15): 3341~3352
- 17 C. Yu, H. Chang. Yee-mesh-based finite difference eigenmode solver with PML absorbing boundaray conditions for optical waveguides and photonic craystal fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(25): 6165~6177
- 18 Wu Yanrong, Guo Lixia, Xue Wenrui *et al.*. Photonic crystal fiber with single polarization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 593~597  
武延荣,郭丽霞,薛文瑞等. 单偏振光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 593~597
- 19 Guo Lixia, Wu Yanrong, Xue Wenrui *et al.*. Dispersion properties of photonic crystal fiber with composite hexagonal air hole lattice[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 935~939  
郭丽霞,武延荣,薛文瑞等. 复合六边形空气孔格点光子晶体光纤的色散特性分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 935~939