

双包层平坦色散光子晶体光纤的设计与性能研究

雷景丽 李晓晓 王道斌 武刚 刘延君 侯尚林

兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州 730050

摘要 优化设计了一种由两种不同大小的空气孔组合而成的双包层六边形空气孔格点光子晶体光纤,并研究了该类光纤的几何参数对色散的影响。结果表明调节包层中空气孔的大小及孔间距,可以容易调节色散及低色散带宽、非线性等性能。优化设计可以得到在 C 和 L 波段近零平坦的色散,其色散变化为 $(0 \pm 1.8) \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;色散平坦;双包层

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s106002

Design and Study on Characteristics of Double-Clad Photonic Crystal Fibers with Flattened Dispersion

Lei Jingli Li Xiaoxiao Wang Daobin Wu Gang Liu Yanjun Hou Shanglin

School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

Abstract A double cladding photonic crystal fiber with hexagonal air hole lattice, whose claddings are made by two different sizes of air holes, is designed and the influence of the geometric parameters on its dispersion and low dispersion bandwidth are investigated. The results show that the dispersion, low dispersion bandwidth and the nonlinearity are easily tailored by adjusting the two different sizes of air holes in the cladding as well as the pitch. The near-zero dispersion of $(0 \pm 1.8) \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ at C and L band can be obtained by optimizing design.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; flattened dispersion; double-clad

OCIS codes 060.2310;060.2430;160.3918

1 引言

光子晶体光纤^[1](PCFs)为二维光子晶体,是在光子晶体概念基础上发展起来的一种晶体材料,与普通单模光纤不同,PCF是由其中周期性排列空气孔的单晶石英材料构成。由于空气孔的微排列和大小、介质种类有很大的控制余地,可根据实际的需要设计光子晶体光纤的传光特性。正因为如此,光子晶体光纤具有许多在传统光纤中难以实现的性质,如极宽谱带的单模传输^[2-3],可控的色散特性^[4-5],强烈的非线性效应^[6]等,这些特性使其在光通信、非线性光学等领域有着潜在的应用前景。

光纤的近零色散值和宽带超平坦色散特性是近年的研究热点,如为了抑制非线性效应的产生,在工作波长处需要有较低的色散,但色散不能为零;为使波分复用中不同波长的信道有一致的色散响应,要求光纤具有宽带的超平坦色散特性^[7-8]。PCF的结构特点使其具有极大的色散可控性,通过调节其结构参数并对其优化设计,可实现近零超平坦色散,满足密集波分复用系统要求。

本文提出了一种双包层六边形空气孔格点光子晶体光纤,其包层是由两种不同大小的空气孔组合而构成的,这样光纤结构参数的调节可以更为灵活,可以通过调节两层空气孔参数来设计不同色散要求的光纤。研究结果表明,通过调节包层中两种不同尺寸的空气孔的大小以及孔间距这三个参量,可以得到不同水平的平坦色散曲线,甚至是超低超平坦的色散曲线,并且可以有效减小其非线性系数,在孔间距 Δ 取 $2.1 \mu\text{m}$,小

收稿日期: 2015-02-15; 收到修改稿日期: 2015-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61167005,61367007)、甘肃省自然科学基金(1112RJZA018)

作者简介: 雷景丽(1977—),女,硕士,讲师,主要从事光纤通信和光纤传感方面的研究。E-mail:leijingli@lut.cn

尺寸空气孔直径 $d_1 = d_2 = d_3 = 0.58 \mu\text{m}$, 大尺寸空气孔直径 $d_4 = d_5 = d_6 = 1.9 \mu\text{m}$ 的条件下, 在 $1.40 \sim 1.60 \mu\text{m}$ 的波长范围内得到了 $(0 \pm 1.8) \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 的色散。

2 光子晶体光纤设计

图 1 是由单一材料(石英)制成的、沿纤芯周围去掉若干个空气孔而形成的具有六角形排布的双包层光子晶体光纤的端面图, 结构参数为: 六边形的节距 $\Lambda = 2.1 \mu\text{m}$, 内三层六边形空气孔直径为 $0.58 \mu\text{m}$, 外三层空气孔直径为 $1.9 \mu\text{m}$, 相邻顶点间的夹角为 60° 。光子晶体光纤的总色散为^[8]:

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

式中 λ 为真空中波长, c 为真空中光速, n_{eff} 为有效折射率, $D_m(\lambda)$ 为材料色散。

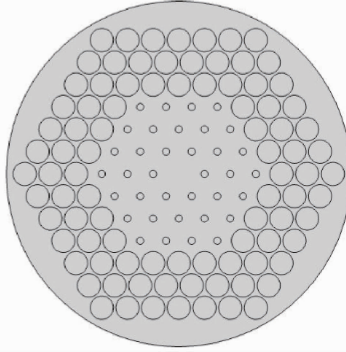


图 1 六边形双包层 PCF 的横向截面图

Fig. 1 Cross section of hexagonal double-clad PCF

光子晶体光纤的非线性系数为

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

式中 $n_2 = 2.76 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 为石英的非线性折射率, ω_0 为角频率, 光纤基模的有效面积 A_{eff} 定义为

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

式中 E_t 是横电场矢量, s 是光子晶体光纤的横截面。

3 模拟结果及分析

3.1 节距对色散的影响

图 2 中内三层空气孔直径为 $d_1 = d_2 = d_3 = 0.58 \mu\text{m}$, 外三层空气孔直径为 $d_4 = d_5 = d_6 = 1.9 \mu\text{m}$, 节距 Λ 分别取 $1.9, 2.1, 2.3 \mu\text{m}$ 时 PCF 色散随波长变化的曲线。从图 2 中可以看出, 节距分别取 $1.9, 2.1, 2.3 \mu\text{m}$ 时, 色散曲线在分析波长范围内存在三个零色散点, 色散曲线在短波段处存在极大值, 在中波段处存在极小值, 色散曲线在 $1.38 \sim 1.61 \mu\text{m}$ 波段比较平坦, 色散系数为 $(0 \pm 213) \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$; 在 $1.30 \sim 1.38 \mu\text{m}$ 波段和 $1.48 \sim 1.61 \mu\text{m}$ 波段, 色散随着节距的增大先增大后减小, 而且增大的速率比减小的速率快; 在 $1.38 \sim 1.48 \mu\text{m}$ 波段和 $1.61 \sim 1.75 \mu\text{m}$ 波段, 色散随着节距的增大先减小后增大, 减小的速率比增大的速率快。而节距取 $2.1 \mu\text{m}$ 时, 色散曲线平坦。

3.2 d_1/Λ 对色散的影响

图 3 给出了在 $d_2 = d_3 = 0.58 \mu\text{m}, d_4 = d_5 = d_6 = 1.9 \mu\text{m}$ 时, 改变 d_1/Λ 的值, 色散随波长的变化曲线。在 $d_1/\Lambda = 0.2$ 时, 色散随波长的变化近似一条斜线, 色散随波长的增大而增大; 在 $d_1/\Lambda = 0.35$ 时, 在 $1.55 \sim 1.70 \mu\text{m}$ 波段, 色散趋于平坦, 色散随波长的增大而减小。在 $\lambda = 1.50 \mu\text{m}$ 处, 色散随着 d_1/Λ 值的增大而减

小。在设计双包层六边形光子晶体光纤时,根据需要, d_1/Λ 的值可灵活选取。

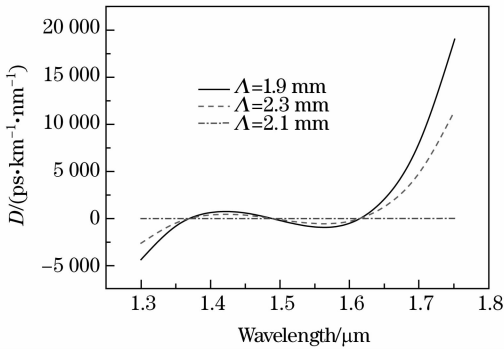


图 2 节距对色散特性的影响

Fig. 2 Effect of pitch on the dispersion

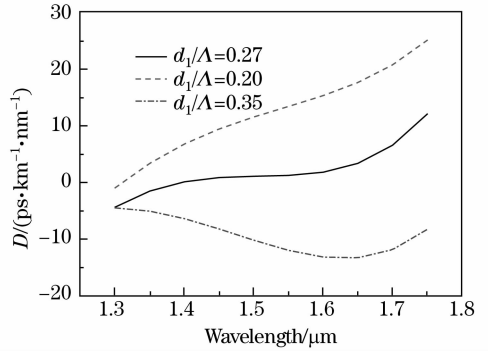


图 3 d_1/Λ 对色散特性的影响

Fig. 3 Effect of d_1/Λ on the dispersion

3.3 色散随内三层孔径的变化关系

图 4 中在光子晶体光纤包层外三层的空气孔直径为 $1.9 \mu\text{m}$ 和节距为 $2.1 \mu\text{m}$ 时,同时改变内三层空气孔直径,色散曲线随波长的变化。当内三层空气孔直径为 $0.48 \mu\text{m}$ 时,色散近似一条斜线,色散随着波长的增大而增大;当内三层空气孔直径为 $0.58 \mu\text{m}$ 时,在 $1.40 \sim 1.60 \mu\text{m}$ 波段,色散曲线平坦,色散斜率近乎零,色散系数为 $(0 \pm 1.8) \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$;当内三层空气孔直径为 $0.68 \mu\text{m}$ 时,在 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 波段,色散曲线平坦,色散斜率近乎零,色散系数介于 $7.5 \sim 11.5 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$,且与内三层空气孔直径为 $0.48 \mu\text{m}$ 的色散曲线关于 $D=6.5 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 对称。在 $\lambda=1.50 \mu\text{m}$ 的同一波长处,色散随着内三层空气孔直径的增大而增大。结合图 1 和图 4,空气孔直径和节距共同决定了色散曲线的走向;随着空气孔直径的减小和孔间距的增加,短波长处色散峰值是减小的,长波长处色散曲线逐渐的向上移动,色散曲线趋于平坦。

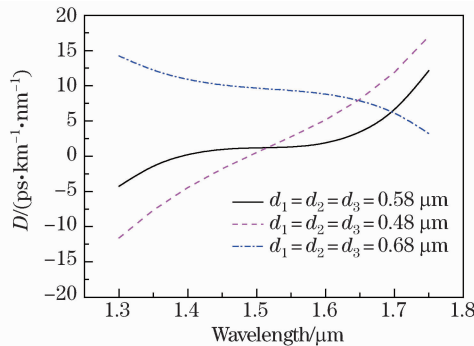


图 4 内三层空气孔直径变化对色散特性的影响

Fig. 4 Effect of air hole diameters of three inner layers on dispersion

3.4 色散随外三层孔径的变化关系

图 5 给出了在光子晶体光纤包层内三层的空气孔直径为 $0.58 \mu\text{m}$ 和节距为 $2.1 \mu\text{m}$ 时,同时改变第四、五、六层空气孔直径,色散曲线随波长的变化情况。从图中可以看出,外三层空气孔直径为 $1.9 \mu\text{m}$ 时,在 $1.40 \sim 1.60 \mu\text{m}$ 波段,色散曲线平坦,色散斜率近乎零,色散系数为 $(0 \pm 1.8) \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$;外三层空气孔直径为 $1.5 \mu\text{m}$ 时,在 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 波段,色散曲线平坦,色散斜率近乎零。与外三层空气孔直径为 $1.9 \mu\text{m}$ 时相比,平坦色散波长向右平移了(蓝移)约 $0.05 \mu\text{m}$ 。总体上,色散随着外三层空气孔直径的减小而减小,但色散曲线的形状近乎不变,说明第四层及其外层空气孔对 PCF 色散特性的影响是很微小的。

3.5 结构参数对光纤非线性系数的影响

图 6 给出了光子晶体光纤在孔节距 Λ 和直径 d 均变化时非线性系数随波长变化时的曲线,图中 B,C,D 曲线对应的参数如表 1 所示。

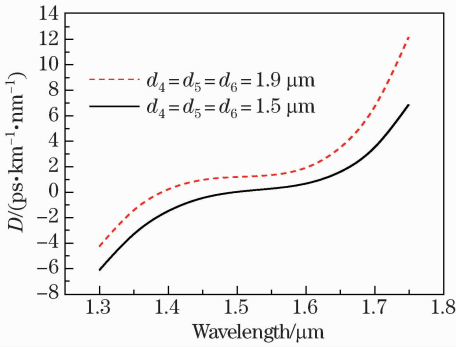


图 5 外三层空气孔直径变化对色散特性的影响
Fig. 5 Effect of air hole diameters of three outer layers on dispersion

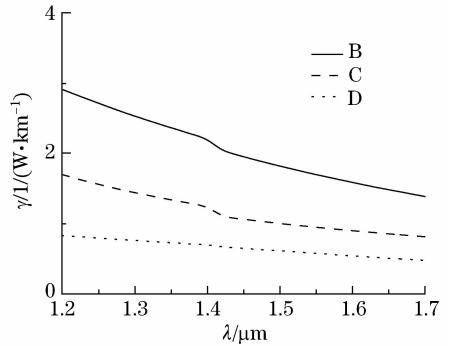


图 6 结构参数对非线性系数的影响
Fig. 6 Effect of structure parameters on the nonlinearity coefficient

表 1 三种不同 PCF 的参数
Table 1 Parameters of three kinds of PCF

	Λ	d_1	d_2, d_3, d_4, d_5, d_6
B/ μm	1.856	0.1856	0.4176
C/ μm	3.056	0.3056	0.6876
D/ μm	5.056	0.5056	1.1376

从图 6 中可以看出不同结构的光子晶体光纤其非线性系数随波长的增大而减小,对于同一波长处,孔间距越大非线性系数越小;当孔间距 Λ 和孔直径 d 均变化时,孔间距的变化对非线性系数的变化其决定性作用;当孔间距 Λ 和孔直径 d 同时增大时,非线性系数随波长减小较快,主要有两个原因,一是随着光波长的增大,光纤的有效纤芯面积增大;二是光纤的非线性系数与波长和有效纤芯面积均成反比。

4 结 论

通过改变六边形双包层光子晶体光纤的结构参数可以灵活的调节色散和非线性系数,实现了在 1.40~1.60 μm 波段内相对平坦的色散传输特性,其色散斜率近乎为 0、色散变化为 $(0 \pm 1.8) \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。同时经分析得到距离纤芯最近的那层空气孔直径即 d_1 的变化对 PCF 色散特性的影响最大;内三层空气孔直径和节距共同决定了色散曲线的走向,随着空气孔直径的减小和孔间距的增加,短波长处色散峰值是减小的,长波长处色散曲线逐渐的向上移动,色散曲线趋于平坦。平坦色散有利于实现非线性光学中的相位匹配,孤子脉冲的产生和传输,宽带且平坦的超连续谱的产生等。

参 考 文 献

- 1 J C Knight, *et al.*. All-silica-single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. Opt Lett, 1996, 21(19):1547-1549.
- 2 T A Birks, J C Knight, P St J Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Opt Lett, 1997, 22(13):961-963.
- 3 A Ferrando, E Silvestre, J J Miret, *et al.*. Full-vector analysis of a realistic photonic crystal fiber[J]. Opt. Lett, 1999, 24(5): 276-278.
- 4 William Reeves, J Knight, P Russell, *et al.*. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. Opt Express, 2002, 10(14): 609-613.
- 5 J C Knight, J Arriaga, T A Birks, *et al.*. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber[J]. Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 807-809.
- 6 K M Hilligsøe, T Andersen, H Paulsen, *et al.*. Supercontinuum generation in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths [J]. Opt Express, 2004, 12(6): 1045-1054.
- 7 Feroza Begum, Yoshinori Namihira. Design and analysis of novel highly nonlinear photonic crystal fibers with ultra-flattened chromatic dispersion [J]. Optics Communications, 2009, 282, 1416-1421.
- 8 L P Shen, W P Huang, G X Chen, *et al.*. Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation[J]. Photon Tech Lett, 2003, 15(4): 540-542.

栏目编辑: 韩 峰