

低折射率芯色散补偿光子晶体光纤的设计

胡 颢, 王 健

(发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所, 北京 100044)

摘 要:为对低色散斜率非零色散位移光纤进行色散补偿, 对低折射率芯光子晶体光纤进行了研究。利用全矢量有限元法设计了三种色散补偿光子晶体光纤。数值计算结果表明, 在1550nm处三种色散补偿光纤各自的相对色散斜率与相应低斜率非零色散位移光纤的值能很好地匹配, 并且补偿后C波段的残余色散值很小。此外, 设计出的色散补偿光纤是具有 $20\mu\text{m}^2$ 以上有效面积的低非线性光子晶体光纤。

关键词:光子晶体光纤; 有限元法; 色散补偿; 有效面积

中图分类号: TN929.11

文献标识码: B

Design of Dispersion Compensating Fibers Based on a Depressed-index-core Photonic Crystal Fiber

HU Jie, WANG Jian

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education,
Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To compensate the dispersion of non-zero dispersion-shifted fibers (NZDSF) with low dispersion slope, a depressed-index-core photonic crystal fiber is researched. Three dispersion compensating fibers are designed by using finite element method. Numerical results show that at 1550nm the relative dispersion slope of each dispersion compensating fiber is perfectly matched with that of the corresponding NZDSF and the residual dispersion is very low over the C band after compensating. In addition, the designed compensating fibers are low nonlinear photonic crystal fibers whose effective areas are more than $20\mu\text{m}^2$.

Key words: photonic crystal fibers; finite element method; dispersion compensation; effective area

1 引 言

随着波分复用(WDM)系统中单信道的传输速率超过40Gb/s, 以及信道数的成倍增加, 精确地控制传输系统的累积色散已成为提高光纤传输容量与距离的关键^[1]。采用非零色散位移光纤(non-zero dispersion-shifted fiber, NZDSF)可以有效抑制1550nm附近信道间的四波混频(FWM)以及交叉相位调制(XPM)等非线性效应, 是对系统进行色散管理的一种有效方式^[2-3]。然而由于1550nm处光纤

的色散值非零, 还需对NZDSF进行色散补偿。传统的色散补偿光纤由于采用多包层结构, 不仅设计复杂而且具有高传输损耗和高非线性。近年来, 光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)的制备技术不断成熟, 为解决以上问题提供了一种途径。在1550nm窗口, PCF的色散系数和色散斜率可以灵活

作者简介: 胡 颢(1982-), 硕士研究生, 主要从事光子晶体和光通信方面的研究。E-mail: hujie_bjtu@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-10-10; 修订日期: 2007-10-12

调节。目前,已有多篇文献报道了用于补偿标准单模光纤的 PCF^[4-6]。设计出的 PCF 在 1550nm 处具有很大的负色散系数,用于补偿单模光纤长距离传输后的积累色散。但至今还没有文献报道用于补偿 NZDSF 的 PCF。对不同 NZDSF 设计相应的色散补偿 PCF, 具有重要的现实意义。

为能够对 NZDSF 进行宽带色散补偿,色散补偿 PCF 应在 C 波段(1530 ~ 1565nm) 具有较大的负色散系数,且满足色散斜率匹配的要求。然而,具有较大色散系数的色散补偿 PCF 通常具有较小的有效面积^[4-5]。信号在这种高非线性 PCF 中传输后会产生畸变,是十分不利的。如何使色散补偿 PCF 同时具有低非线性特性,是一个有待解决的问题。本文对一种低折射率芯 PCF 进行设计,通过调节孔间距、孔径以及掺杂区半径值,能够使这种 PCF 补偿低色散斜率或超低色散斜率 NZDSF。另外,作为色散补偿光纤的低折射率芯 PCF 在 1550nm 处的有效面积将设计在 20 μm^2 以上。本文设计的低折射率芯 PCF 具有宽带色散补偿和低非线性两种特性。

2 低折射率芯色散补偿 PCF 的设计

表 1 给出了几种 NZDSF 在 1550nm 处的光学参数,包括 TeraLight 光纤、TrueWave 光纤、Alcatel 公司生产的色散斜率为 0.0125ps/(nm²·km) 的低色散斜率 NZDSF 和色散斜率仅为 0.009ps/(nm²·km) 的超低色散斜率 NZDSF。

表 1 几种非零正色散位移光纤
在 1550nm 处的光学参数

Fiber	TeraLight	TrueWave	Alcatel ^[7]	Alcatel ^[8]
Zero dispersion wavelength /nm	1420	1385	1365	1310
Dispersion / (ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹)	8	7.5	5.0	8.1
Dispersion slope / (ps · nm ⁻² · km ⁻¹)	0.058	0.042	0.0125	0.009
Relative dispersion slope /nm	0.0073	0.0056	0.0025	0.0011

2001 年, Bath 大学研究小组提出了一种低折射率芯区 PCF^[9] (depressed-index core PCF, 以下简称 DIC-PCF), 即在 PCF 的芯区引入掺氟石英, 造成 PCF 中心折射率下陷。本文在低折射率芯区结构的

基础上,通过调节 PCF 的结构参数,设计能够补偿低色散斜率和超低色散斜率 NZDSF 的 DIC-PCF。而采用低折射率芯区结构的色散补偿 DIC-PCF 能够具有较大的有效面积。

DIC-PCF 的横截面如图 1 所示。包层由六角形排布的空气孔构成,设空气孔的孔径为 d ,孔间距为 Λ 。DIC-PCF 的中心有一个掺氟石英的低折射率区域,设这一区域的半径为 R 。

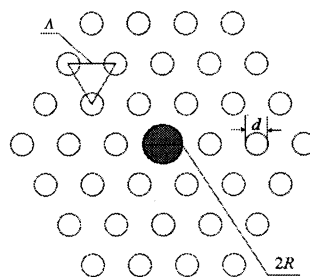


图 1 DIC-PCF 的横截面

色散系数由

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

计算。

其中, λ 为真空中光的波长; n_{eff} 为 DIC-PCF 基模的有效折射率,可由全矢量有限元法计算出^[10-12]。色散补偿的条件是:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{S_1/D_1}{S_2/D_2} = 1 \quad (2)$$

其中,下标 1 代表 NZDSF;下标 2 代表色散补偿光纤。相对色散斜率 $K = S/D$, 为光纤在某波长处色散斜率与色散系数的比值。

设计色散补偿 DIC-PCF 时,需对其三个参数,即孔径 d 、孔间距 Λ 和掺杂区半径 R 进行调节。我们首先不考虑 R 的变化,将 R 设为一固定值 1.0 μm 。研究波长在 1550nm 附近,色散系数随 Λ 以及 d 变化的特点。图 2,3,4 是 Λ 分别取 1.8 μm , 2.0 μm 和 2.2 μm , d/Λ 从 0.2 变化到 0.5 时,色散系数随波长变化的曲线。由图中的曲线可以发现这样的规律:对于某一确定的 Λ 值,曲线在 1550nm 处的色散斜率会随 d/Λ 的增大经历由正变负的过程。对色散斜率为负的曲线,在某个 Λ 和 d/Λ 值下,1550nm 处的色散系数为负且绝对值较大。结构参数为 $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.3$ 和 $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.3$ 的两条曲线都具有这样的性质。可在此基础上

进行进一步设计,使相应 DIC - PCF 满足色散补偿的要求。

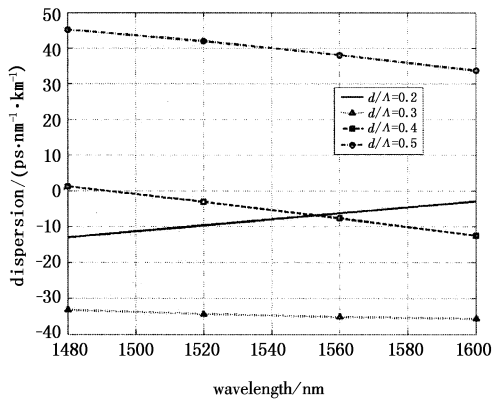


图2 $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.2, 0.3, 0.4$ 和 0.5 时 DIC - PCF 的色散曲线

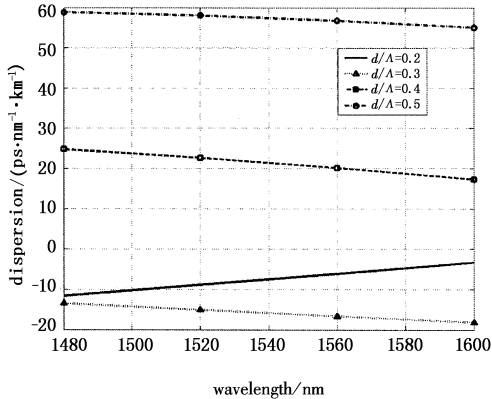


图3 $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.2, 0.3, 0.4$ 和 0.5 时 DIC - PCF 的色散曲线

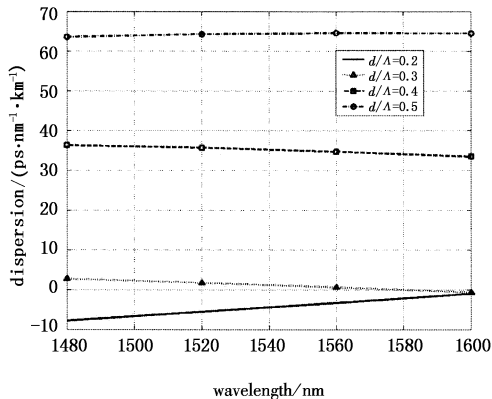


图4 $\Lambda = 2.2\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.2, 0.3, 0.4$ 和 0.5 时 DIC - PCF 的色散曲线

对于 $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.3$ 的情况,我们固定 $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$,使 d/Λ 在 0.3 附近做微小变化。图 5 是 $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$, d 分别取 $0.54\mu\text{m}$, $0.56\mu\text{m}$ 和 $0.58\mu\text{m}$ 时 DIC - PCF 色散系数随波长变化的曲线。可以发现, d 的改变主要影响了曲线的色散斜率。依据这一点,通过选择合适的 d 值,就可以使 DIC -

PCF 的色散斜率满足匹配的要求。表 2 列出了 $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$, d 取不同值的 DIC - PCF 在 1550nm 处色散系数、色散斜率以及相对色散斜率的计算结果。由表 2 可知, $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$, $d = 0.56\mu\text{m}$ 的 DIC - PCF 的相对色散斜率为 $0.0012/\text{nm}$,与超低色散斜率 NZDSF 的相对色散斜率 $0.0011/\text{nm}$ 匹配,因此具有这种结构的 DIC - PCF 可用来对超低色散斜率 NZDSF 进行色散补偿。这种 DIC - PCF 的有效面积约为 $22\mu\text{m}^2$,具有较低的非线性,可以作为一种理想的色散补偿光纤。

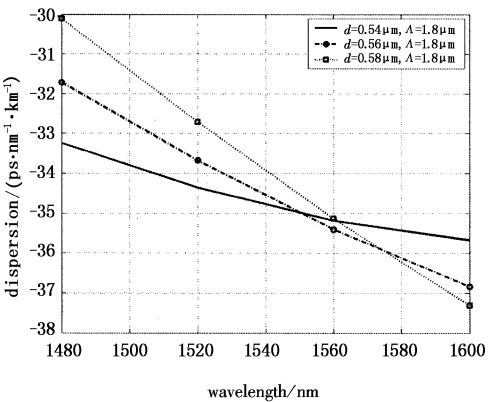


图5 $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$, $d = 0.54\mu\text{m}, 0.56\mu\text{m}$ 和 $0.58\mu\text{m}$ 时 DIC - PCF 的色散曲线

表 2 $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$, d 取不同值时 DIC - PCF 在 1550nm 处的光学参数

parameter	dispersion / $(\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$	dispersion slope / $(\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1})$	relative dispersion slope/nm	$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$
$d = 0.54\mu\text{m}$, $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$	-35.0	-0.019	0.00054	23.7
$d = 0.56\mu\text{m}$, $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$	-35.0	-0.042	0.0012	21.5
$d = 0.58\mu\text{m}$, $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$	-34.6	-0.059	0.0017	17.5

对于 $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.3$ 的情况,分析的过程类似。表 3 列出了 $\Lambda = 2.0\mu\text{mm}$, d 分别取 $0.56\mu\text{m}$, $0.58\mu\text{m}$ 和 $0.60\mu\text{m}$ 的 DIC - PCF 在 1550nm 处的色散系数、色散斜率以及相对色散斜率值。计算结果表明, $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$, $d = 0.60\mu\text{m}$ 的结构在 1550nm 处的相对色散斜率为 $0.0024/\text{nm}$,它可以和低色散斜率 NZDSF $0.0025/\text{nm}$ 的值相匹配。这种 DIC - PCF 的有效面积约为 $22\mu\text{m}^2$,是一种理想的色散补偿光纤。

表3 $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$, d 取不同值时 DIC - PCF
在 1550nm 处的光学参数

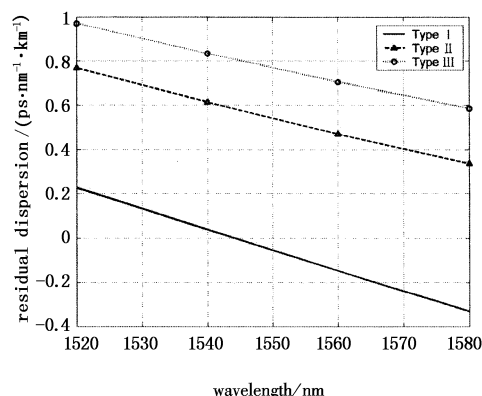
parameter	dispersion $/(\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$	dispersion slope $/(\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1})$	relative dispersion slope/nm	$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$
$d = 0.56\mu\text{m}$, $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$	-19.0	-0.014	0.00074	29.6
$d = 0.58\mu\text{m}$, $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$	-18.0	-0.029	0.0016	26.0
$d = 0.60\mu\text{m}$, $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$	-16.2	-0.040	0.0024	22.3

以上设计的两种色散补偿 DIC - PCF, 掺杂区半径 R 都为 $1.0\mu\text{m}$ 。表 3 中 $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$, $d = 0.58\mu\text{m}$, $R = 1.0\mu\text{m}$ 的 DIC - PCF 在 1550nm 处的相对色散斜率为 $0.0016/\text{nm}$, 这一值与超低色散斜率 NZDSF $0.0011/\text{nm}$ 的值接近。对于这种情况, 可以通过调整 R 的大小使 DIC - PCF 的相对色散斜率更接近 $0.0011/\text{nm}$ 。固定 $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$ 和 $d = 0.58\mu\text{m}$, 将 R 从 $1.0\mu\text{m}$ 调整到 $1.2\mu\text{m}$, 计算出此种 DIC - PCF 在 1550nm 处的色散系数为 $-18.3\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 相对色散斜率为 $0.0013/\text{nm}$, 有效面积为 $28.4\mu\text{m}^2$ 。它可作为另一种补偿超低色散斜率 NZDSF 的光纤。

图 6 是已设计出的色散补偿 DIC - PCF 补偿相应 NZDSF 后, 光纤链路在 C 波段的残余色散曲线。残余色散的定义为^[4]:

$$D_{\text{res}} = \frac{D_1 L_1 + D_2 L_2}{L_1 + L_2} \quad (3)$$

它可以表征色散补偿的程度。从图中可以看出, 三条残余色散曲线在整个 C 波段接近零且变化很小, 因此设计出三种 DIC - PCF 均具有良好的宽带色散补偿特性。



(Type I 为 $d = 0.60\mu\text{m}$, $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$, $R = 1.0\mu\text{m}$ 的 DIC - PCF,
Type II 为 $d = 0.56\mu\text{m}$, $\Lambda = 1.8\mu\text{m}$, $R = 1.0\mu\text{m}$ 的 DIC - PCF,
Type III 为 $d = 0.58\mu\text{m}$, $\Lambda = 2.0\mu\text{m}$, $R = 1.2\mu\text{m}$ 的 DIC - PCF)

图6 光纤链路的残余色散曲线

3 结 论

为补偿低色散斜率或超低色散斜率 NZDSF, 本文使用全矢量有限元法, 对低折射率芯 PCF (DIC - PCF) 进行了设计。设计出了三种相对色散斜率匹配、有效面积在 $20\mu\text{m}^2$ 以上的色散补偿 DIC - PCF。这三种 DIC - PCF 不但具有宽带色散补偿特性, 而且还具有低非线性, 是三种较好的色散补偿光纤。

参考文献:

- [1] Belahlou A, Bickham S, Chowdhury D, et al. Fiber design considerations for 40Gb/s systems[J]. J. Lightwave Technol., 2002, 20(12): 2290 - 2305.
- [2] Du M, Nelson L E, Gaarde P B, et al. Unrepeated transmission over 300km non-zero dispersion-shifted fiber with bi-directionally pumped Raman amplification [C]// ECOC 2005 pro., Glasgow, Scotland. Paper Mo4. 2, 1: 75 - 76.
- [3] 邓丽琼, 徐文成, 陈伟成, 等. 基于非零色散位移光纤的 $4 \times 10\text{Gb/s}$ CWDM 系统优化[J]. 光电子·激光, 2007, 18(3): 330 - 334.
- [4] 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 Photonics Technol. Lett., 2003, 15(4): 540 - 542.
- [5] Ni Y, Zhang L, Peng J, et al. Dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2004, 16(6): 1516 - 1518.
- [6] 汪徐德, 罗爱萍, 邓丽琼, 等. 变孔径色散补偿光子晶体光纤的数值研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(4): 355 - 358.
- [7] Provost L, Moreau C, Melin G, et al. Dispersion-managed fiber with low chromatic dispersion slope[C]// OFC 2003 proc, Atlanta, Georgia, TuB3.
- [8] Molin D, Fleury L, Gorlier M, et al. Ultra-low slope medium-dispersion fiber for wide-band transmissions [C]// OFC 2003 proc., Atlanta, Georgia, TuB2.
- [9] Mangan B J, Arriaga J, Birks T A, et al. Fundamental-mode cutoff in a photonic crystal fiber with a depressed-index core[J]. Opt. Lett., 2001, 26(19): 1469 - 1471.
- [10] Koshiba M, Saitoh K. Numerical verification of degeneracy in hexagonal photonic crystal fibers[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2001, 13(12): 1313 - 1315.
- [11] 王健, 余重秀. 包层空气孔孔径的不均匀性对微结构光纤非线性系数的影响[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 775 - 778.
- [12] 王健, 雷乃光, 余重秀. 椭圆空气孔微结构光纤限制损耗的分析[J]. 物理学报, 2007, 56(2): 946 - 951.