

文章编号: 1001-3806(2008)06-0576-03

色散补偿双芯光子晶体光纤的数值研究

王润轩

(宝鸡文理学院 物理系, 宝鸡 721007)

摘要: 为了解决光纤通信系统中的色散补偿问题, 提出一种新型的用于色散补偿的双芯光子晶体光纤, 其构成材料是纯石英和空气, 即在常规光子晶体光纤基础上变化包层第 1 圈和第 3 圈空气孔, 增大了结构参量变化的自由度。采用平面波展开法对其色散补偿特性进行了数值研究, 并模拟了包层结构参量与色散之间的关系, 计算得出这种光纤的色散可以达到 $-1956.327 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 能够补偿超过自身长度 100 倍的普通单模光纤。结果表明, 双芯光子晶体光纤在色散补偿方面具有很大潜力, 在未来光通信系统中将发挥重要作用。

关键词: 光纤光学; 光子晶体光纤; 色散补偿; 双芯; 平面波展开法

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Numerical study on dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation

WANG Runxuan

(Department of Physics, Baoji College of Arts and Science, Baoji 721007, China)

Abstract In order to deal with the dispersion compensation in optical fiber communication systems, a dual-core dispersion compensation photonic crystal fiber (DCPCF) was put forward. The DCPCF consists of pure silicon and air, namely that the photonic crystal fiber (PCF) is tailored by changing the radius of the first and third ring. The dispersion compensation property in PCF was simulated with the plane wave expansion method and the relation between dispersion and structural parameters was studied. Simulation results show that the dispersion of this DCPCF can reach $-1956.327 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ and also compensate the dispersion over 100 times its length of single mode fiber. DCPCF will play an important role in optical fiber communication, especially dispersion compensation.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; dispersion compensation; dual-core; plane wave expansion method

引 言

在波分复用光纤通信系统中, 传输速率受到普通单模光纤 (single mode fiber, SMF) 色散的制约, 目前是采用色散补偿光纤 (dispersion compensation fiber, DCF) 来对普通单模光纤中的色散进行补偿, 其负的色散值约为传输光纤的十几倍。NI 等人^[1]提出了一种新型色散补偿双芯光子晶体光纤, 数值计算得出其色散系数为 $-2000 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, CHENG 等人^[2]理论模拟双芯光子晶体光纤的色散系数在 1550nm 处可达 $-18000 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 可以补偿超过自身长度 1000 倍的普通单模光纤。近来, 光子晶体光纤以其独特的性质为色散补偿提供了新的办法^[3-5]。光子晶体光纤通常由纯石英构成, 无需掺杂, 相对折射率的大小

仅与包层空气孔的尺寸、结构有关, 由于空气孔和石英的折射率差较大, 因此, 光子晶体光纤可以有极大的负色散系数^[6-7]。作者提出另一种新型的双芯色散补偿光子晶体光纤, 它结合了常规光子晶体光纤和色散补偿光纤的优点, 在波长 1550nm 时的色散系数达到 $-1956.327 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 可以补偿超过自身长度 100 倍的普通单模光纤。为了研究这种色散补偿双芯光子晶体光纤的色散特性, 在以往工作基础上^[7], 采用参考文献 [8] ~ 参考文献 [10] 中介绍的平面波展开法的超元胞叠加法, 通过改变第 1 圈空气孔半径 r_1 、第 3 圈空气孔半径 r_3 以及其余空气孔半径 r 和空气孔间距 Λ 来考察光纤色散特性的变化, 优化设计出具有大的正常色散值的色散补偿双芯光子晶体光纤。

1 理论模型

在平面波展开法中从麦克斯韦方程组出发, 考虑光纤材料中无自由电荷以及非磁性性质, 波动方程为:

$$\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times [\nabla \times \vec{E}(r, t)] = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}(r, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

基金项目: 宝鸡文理学院重点资助项目 (ZK0613)

作者简介: 王润轩 (1953-), 男, 教授, 主要进行光子晶体光纤光学特性的研究。

E-mail: wangrunxuan53629@163.com

收稿日期: 2007-08-13 收到修改稿日期: 2007-09-10

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) \right] = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中, ϵ_r 为相对介电常数, c 为光速, E, H 为电磁场矢量, r 为位置矢量, t 为时间。可以把电磁场的空间和时间分量分开写为:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) \exp(-j\omega t) \quad (3)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r}) \exp(-j\omega t) \quad (4)$$

式中, ω 为电磁波的圆频率。把 (3) 式和 (4) 式分别代入 (1) 式和 (2) 式中, 可得到 $\vec{E}(\vec{r}), \vec{H}(\vec{r})$ 所满足的特征方程:

$$\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times [\nabla \times \vec{E}(\vec{r})] = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}(\vec{r}) \quad (5)$$

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \vec{H}(\vec{r}) \right] = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}(\vec{r}) \quad (6)$$

在光子晶体光纤中, 由于芯区是由一个空气孔缺失形成的, 因此, 光纤横截面的介电常数 ϵ_r 不具有周期分布, 不能将其做傅里叶展开, 需要用超元胞叠加法。把光纤的横截面看作一个元胞, 利用周期边界条件, 无数个这样的元胞周期性排列组合成一个扩展的横截面, 而每个元胞中的电磁场分布不变, 故求解这个扩展的横截面就可以得到结果。

2 数值模拟和结果分析

光子晶体光纤结构如图 1 所示。黑色为石英, 灰

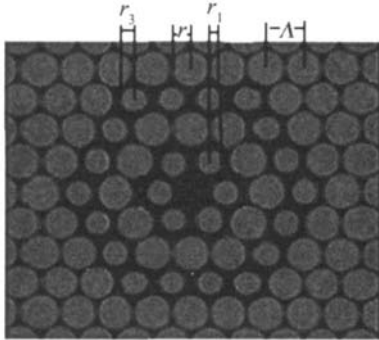


Fig 1 Cross section of core PCF

白色为空气孔, 包层空气孔按正六边形排列, 空气孔间距均为 Λ , 第 1 圈空气孔半径为 r_1 , 第 3 圈空气孔半径为 r_3 , 其余空气孔半径均为 r_2 。下面分别调控这些结构参量来考察光子晶体光纤色散特性的变化。

2.1 r_1 对光纤色散特性的影响

为了研究第 1 圈空气孔半径 r_1 改变对光纤色散特性的影响, 固定其它参量值, 即 $\Lambda = 1200\text{nm}$, $r = 520\text{nm}$, $r_3 = 400\text{nm}$, 而改变 r_1 的大小, r_1 分别取 260nm, 290nm, 320nm, 350nm, 逐次增大, 图 2a 和图 2b 是相应光纤色散系数 D 和色散斜率 D_{slope} 随波长变化的关系。从图 2a 和图 2b 可以看出, 随着 r_1 的减小, 色散系数绝对值增

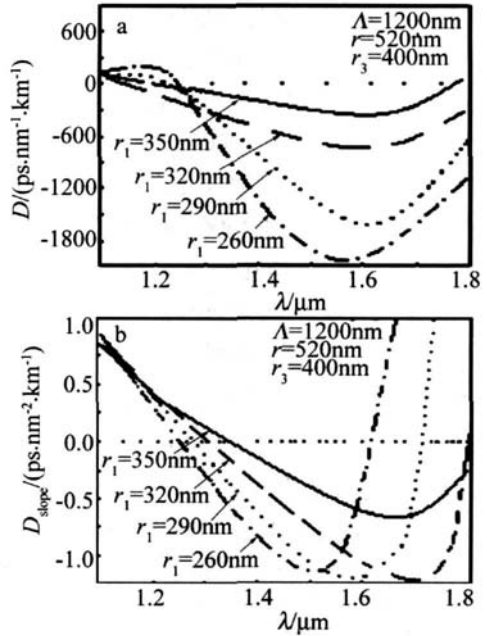


Fig 2 a—dispersion parameter b—dispersion parameter slope

大, 色散零点向短波方向移动, 色散曲线的斜率变成正值之后, 色散零点又向长波方向移动, 同时色散曲线斜率越来越大。由此可知第 1 圈空气孔的半径变化对光纤色散特性有很大的影响。可通过减小第 1 圈空气孔半径来增大光子晶体光纤的负色散系数。而在 1550nm 处的负的最大色散系数为 $-1956.327\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 若对单一波长进行色散补偿, 会得到最高的补偿效率, 此时对应的色散补偿光子晶体光纤的结构参量为: $\Lambda = 1200\text{nm}$, $r = 520\text{nm}$, $r_3 = 400\text{nm}$, $r_1 = 260\text{nm}$,

2.2 r_3 对光纤色散特性的影响

保持空气孔间距 Λ 、半径 r 及第 1 圈空气孔半径 r_1 不变, 即 $\Lambda = 1200\text{nm}$, $r = 520\text{nm}$, $r_1 = 320\text{nm}$, 而改变第 3 圈

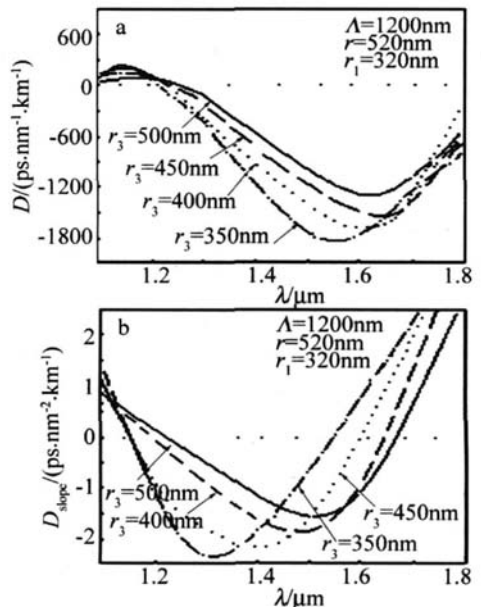


Fig 3 a—dispersion parameter b—dispersion parameter slope

空气孔半径 r_3 的大小, r_3 分别取 350nm, 400nm, 450nm, 500nm, 则相应色散系数 D 和色散斜率 D_{slope} 随波长变化的关系如图 3 所示。由图 3a 可以看出, 随着 r_3 减小, 色散系数绝对值在增大。在 1200nm 附近, r_3 改变对色散影响不大, 随着波长增大这种影响就越明显, 在 1550nm 处, 最大负色散系数为 $-1806.346 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。色散曲线的斜率先为负值随后为正值, 且在为正值之后色散斜率基本上随 r_3 增大而增大。

2.3 r 对光纤色散特性的影响

保持空气孔间距 Λ , 第 1 圈气孔半径 r_1 以及第 3 圈气孔半径 r_3 不变, 即 $\Lambda = 1200\text{nm}$, $r_1 = 320\text{nm}$, $r_3 = 400\text{nm}$, 改变的是其余空气孔半径 r , r 分别取 520nm, 540nm, 560nm, 580nm, 其相应的色散系数 D 和色散斜率 D_{slope} 随波长变化的关系如图 4 所示。在 1550nm

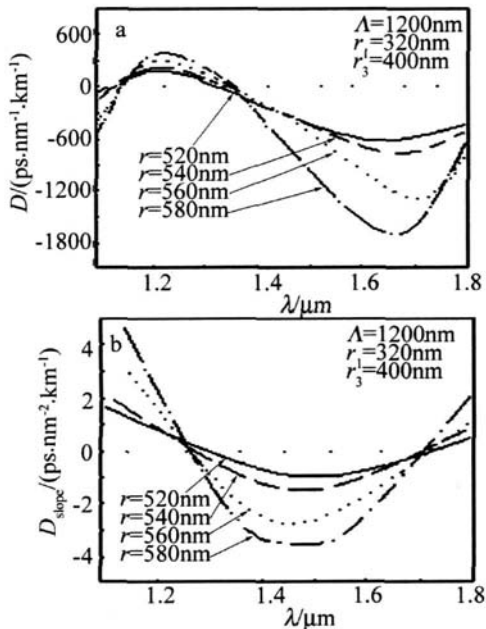


Fig 4 a—dispersion parameter b—dispersion parameter slope

处, 随空气孔半径 r 的增大, 色散系数在减小, 最大负色散系数为 $-1602.354 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。此时光纤结构参量为 $\Lambda = 1200\text{nm}$, $r_1 = 320\text{nm}$, $r_3 = 400\text{nm}$, $r = 580\text{nm}$ 。

2.4 Λ 对光纤色散特性的影响

在此保持所有空气孔半径不变, 即 $r = 520\text{nm}$, $r_1 = 400\text{nm}$, $r_3 = 320\text{nm}$, 而改变的是空气孔间距 Λ , 空气孔间距 Λ 分别取 1200nm, 1250nm, 1300nm, 1350nm, 其相应的色散系数 D 和色散斜率 D_{slope} 随波长变化的关系如图 5 所示。色散系数 D 值随孔间距的增大依次逐渐增大。色散斜率 D_{slope} 也先负后正。

通过图 2a 图 3a 和图 5a 与图 4a 的色散变化规律对比可以得知, 改变第 1 圈、第 3 圈空气孔半径 r_1 , r_3 和空气孔间距 Λ 与改变包层其余空气孔半径对光纤整个色散值的影响恰好相反, 亦即适当减小第 1 圈、

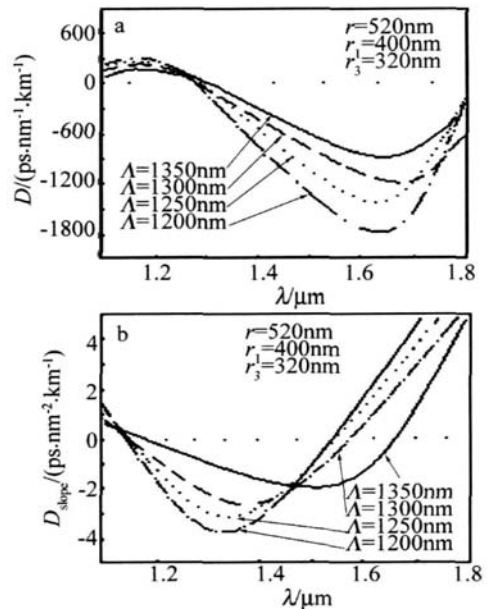


Fig 5 a—dispersion parameter b—dispersion parameter slope

第 3 圈空气孔半径和空气孔间距可以增大光子晶体光纤的负色散值, 而与之相反的是适当增大包层其余空气孔半径也同样可以使光子晶体光纤整体负色散值色散增加, 这样就可以在 1550nm 通信波段设计出负色散系数大的光子晶体光纤。当对单一信道补偿时, 只需要对色散系数补偿就可以了, 但对光波分复用系统, 需要对多个信道同时进行色散补偿, 为了适应宽带色散补偿的需要, 必须考虑对色散系数 D 和色散斜率 D_{slope} 同时进行补偿。一般情况下, 在光波分复用系统中要求色散补偿光纤的色散斜率与被补偿光纤的色散斜率相同或相近。对于不同色散特性的被补偿光纤或器件, 可以通过优化光纤结构参量灵活设计出主要色散补偿参量合适的色散补偿光纤。

3 结 论

在光波分复用光纤通信系统进行的色散补偿中, 要求色散补偿光子晶体光纤要有大的正常色散值和负的色散斜率。作者在常规光子晶体光纤的基础上, 提出双芯色散补偿光子晶体光纤, 结合了常规光子晶体光纤和传统色散补偿光纤的优点, 变化了包层第 1 圈和第 3 圈空气孔, 增加了光子晶体光纤结构参量变化的自由度, 能够更好地调控色散, 灵活多样地设计出符合实际需要的色散补偿光子晶体光纤。通过理论模拟, 考察了光子晶体光纤包层各结构参量对色散及其色散斜率的影响, 通过优化结构得到 $-1956.327 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的色散系数, 这在常规色散补偿光纤中是不可能的。总之, 对于不同色散补偿特性的需要, 可以通过优化结构参量设计出符合要求的双芯色散补偿光子晶体光纤。

(下转第 589 页)

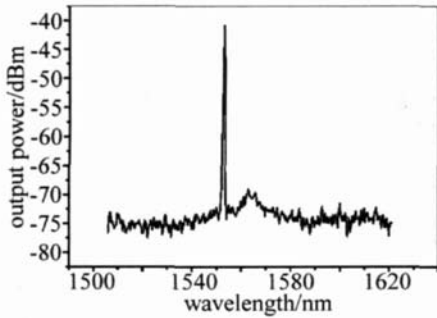


Fig. 6 The spectrum after fiber grating filter

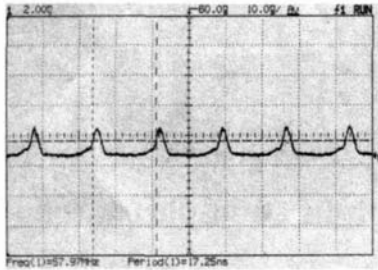


Fig. 7 The converted pulse

宽度基本一致。

2 结 论

实验中观察到了色散位移光纤中脉冲对 CW 波的交叉相位调制效应和 CW 波频谱的频移和展宽现象,用光纤光栅滤波得到了与抽运脉冲重复频率一致、脉冲宽度几乎相同的转换脉冲。另外还发现 CW 波的可变化范围是 1537nm ~ 1560nm。结果表明,基于色散位移光纤中交叉相位调制效应的波长转换具有较宽的波长转换范围和较快的转换速度,是一种简单、高效和

通用的波长转换技术。

参 考 文 献

- [1] ELMIRGHANI J M H, MOUFTAH H T. All-optical wavelength conversion technologies and application in DWDM network [J]. IEEE Communication Magazine, 2000, 38(3): 86-92
- [2] LIM, SUN J Q, LU D M, *et al.* Study on degradation of extinction ratio of wavelength converter based on XGM [J]. Laser Technology, 2001, 25(1): 76-79(in Chinese).
- [3] ZHANG X L, SUN J Q, XU W Ch, *et al.* Experimental study on 2.5Gbit/s all optical wavelength conversion based on cross-gain modulation [J]. Laser Technology, 2001, 25(2): 115-117(in Chinese).
- [4] DONG J J, ZHANG X L, WANG Y, *et al.* Extinction ratio characteristics of wavelength converters based on single-port coupled SOA [J]. Laser Technology, 2001, 25(1): 14-17(in Chinese).
- [5] OLSSON B E, OHLEN P, RAU L, *et al.* A simple and robust 40Gbit/s wavelength converter using fiber cross-phase modulation and optical filtering [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 846-848
- [6] OHLEN P, OLSSON B E, BLUMENTHAL D J. Wavelength dependence and power requirements of a wavelength converter based on XPM in a dispersion-shifted optical fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(5): 522-524
- [7] YU J, JEPPESEN P. 80Gbit/s wavelength conversion based on cross-phase modulation in high-nonlinearly dispersion-shifted fiber and optical filtering [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(8): 833-835.
- [8] PERLIN V E, WNFUL H G. All-optical wavelength conversion using cross-phase modulation and Bragg gratings [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(2): 176-178
- [9] YU J, ZHENG X, PEUCHERET C, *et al.* All-optical wavelength conversion of short pulses and NRZ signals based on a nonlinear optical loop mirror [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(7): 1007-1017.
- [10] PERLIN V E, WNFUL H G. All-optical wavelength conversion using cross-phase modulation and Bragg gratings [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(2): 176-178
- [11] NIIY, AN L, ZHANG L, *et al.* Dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12): 2106-2108(in Chinese).
- [12] CHENG Y, ZHAO X J, CHEN W, *et al.* Dispersion compensation methods [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(6): 15-16(in Chinese).
- [13] WANG R X, DOU Ch Sh, YUE X Ch. Numerical study on a femtosecond laser pulse in photonic crystal fiber [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 555-557(in Chinese).
- [14] LI Ch Y, YU L, ZHANG X G, *et al.* Design of photonic crystal fiber using full vector finite element method [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(1): 30-35(in Chinese).
- [15] GUO L X, WU Y Y, XUE W R, *et al.* Dispersion properties of photonic crystal fiber with composite hexagonal air hole lattice [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 935-939(in Chinese).
- [16] WANG X D, LUO A P, DENG L J, *et al.* Numerical study on photonic crystal fiber with variable air-hole radius for dispersion compensation [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(4): 355-358(in Chinese).
- [17] WANG R X, DOU Ch Sh, ZHOU Ch L, *et al.* Dispersion characteristics of photonic crystal fiber [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(3): 249-252(in Chinese).
- [18] WANG Zh REN G B, LOU Sh Q, *et al.* Novel supercell lattice method for the photonic crystal fibers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(1): 59-63(in Chinese).
- [19] REN G B, WANG Zh, LOU Sh Q, *et al.* Localized orthogonal function model of photonic crystal fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1130-1136(in Chinese).
- [20] REN G B, WANG Zh, LOU Sh Q, *et al.* Modified localized orthogonal function method for modeling photonic crystal fibers [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2004, 15(7): 806-809(in Chinese).

(上接第 578 页)

参 考 文 献