

光子晶体光纤的色散特性研究

王 冰, 马晓军, 杨华军, 江 萍
(电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘 要:对包层空气孔大小及填充率对光子晶体光纤的色散特性影响进行了研究, 研究结果表明通过调节光子晶体光纤包层孔间距或是空气孔半径可以灵活地改变光子晶体光纤的色散特性, 由此可以设计在波长 1550 nm 附近具有相对平坦的色散特性曲线, 用有限元法模拟了光在光子晶体光纤中传输的场分布, 在长距离大容量光通信系统中获得很好的应用。

关键词:光子晶体光纤, 填充率, 色散, 有限元法

中图分类号: TN929. 11 **文献标识码:** A **DOI:** 10. 3969/j. issn. 1001-5078. 2014. 03. 018

Study on dispersion characteristics of photonic crystal fiber

WANG Bing, MA Xiao-jun, YANG Hua-jun, JIANG Ping

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The influence of cladding air holes and filling rate on the dispersion characteristics of photonic crystal fiber is studied. The results show that the dispersion characteristics of photonic crystal fiber can be changed flexibly by adjusting package layer hole pitch and air holes. Based on this situation, relatively flat dispersion curve can be designed near a given wavelength at 1550nm. The finite element method was used to simulate the optical field distribution of transmission in the photonic crystal fiber, which is of great significance in the long and large capacity optical communication system.

Key words: photonic crystal fiber; filling rate; dispersion; finite element method

1 引 言

光纤是通信系统的主要传输器件, 主要应用于光通信中。光子晶体光纤^[1]是近年来出现的一种新型光纤, 这种光纤通常由单一介质构成并由在二维方向上紧密排列而在轴向保持结构不变的波长量级的空气孔构成的微结构包层, 有时也称作多孔光纤、微结构光纤。它通过包层中沿轴向排列的微小空气孔对光新型约束, 从而实现光的轴向传输。光子晶体光纤有很多的优势, 无截止波长的单模特性、灵活的色度色散、良好的非线性特性以及高双折射效应为克服传统光纤发展中的一些技术障碍提供了可能的解决途径^[2-6]。普通的光纤是由两种介质构成的: 具有高折射率的纤芯和具有低折射率的包层。根据全内反射原理,

光束被限制在纤芯内实现光传输。光子晶体光纤根据传到机制的不同可以分为折射率引导型光子晶体和带隙型光子晶体光纤。

目前光纤通信的使用波长已经移到了具有低损耗的 1.55 μm , 光纤损耗已经不再是光纤通信系统的主要的限制因素, 而色散成为了光纤通信系统的主要限制。光纤色散会导致光脉冲在传播过程中展宽, 致使前后脉冲互相重叠, 引起数字信号的码间串扰, 是限制光通信速率进一步提高的主要制约因素

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No: 61271167); 四川省学术带头人培养基金资助。

作者简介: 王 冰 (1989 -), 女, 硕士研究生, 主要从事光通信技术研究及光子晶体及其应用。

收稿日期: 2013-07-23; **修订日期:** 2013-08-16

之一^[7]。文中用有限元法对折射率引导型光子晶体光纤的色散进行分析,通过调节包层空气孔的结构参量,改善光纤的色散系数,得到色散平坦的光子晶体光纤结构。

2 光子晶体光纤的结构及色散特性分析

传统光子晶体光纤是指每层空气孔的直径都相同的光子晶体光纤,其结构如图 1 所示,空气孔的填充直径 d ,半径为 r ,孔间距为 Λ ,空气填充率可用 d/Λ 来表示,包层所用的材料为熔石英(折射率为 $n = 1.45$)。通过改变孔间距或空气填充率研究光子晶体光纤的色散特性。

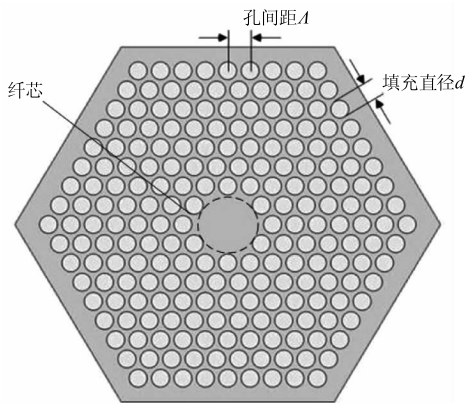


图 1 光子晶体光纤的截面

光纤的色散可分为材料色散和波导色散。其色散公式^[8-9]可以表示为:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}(\lambda)}{d\lambda^2} \approx D_m + D_w$$

式中, n_{eff} 为模式的有效折射率。材料色散是由构成光纤纤芯和包层材料折射率的频率函数引起的,波导色散是因为光波导中某一特定的传播模式的相位常数与频率之间的非线性关系引起的。对熔石英光子晶体光纤而言,材料色散 D_m 由下列公式决定:

$$n_{mat}(\lambda) = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \lambda^2}{(\lambda^2 - b_i^2)}}$$

其中, $n_{mat}(\lambda)$ 为材料色散的有效折射率,式中系数为:

$$\begin{cases} a_1 = 0.6961663 \\ a_2 = 0.4079426 \\ a_3 = 0.8974794 \end{cases}, \begin{cases} b_1 = 0.0684043 \\ b_2 = 0.1162414 \\ b_3 = 9.896161 \end{cases}$$

2.1 空气孔半径 r 对色散的影响

首先考虑在 $\Lambda = 0.1 \mu\text{m}$ 不变的情况下,空气孔半径 r 由 $0.2 \mu\text{m}$ 变化到 $0.4 \mu\text{m}$,即 d/Λ 由 0.4 变化到 0.8 对有效折射率及色散系数的影响,其结果

如图 2 所示。

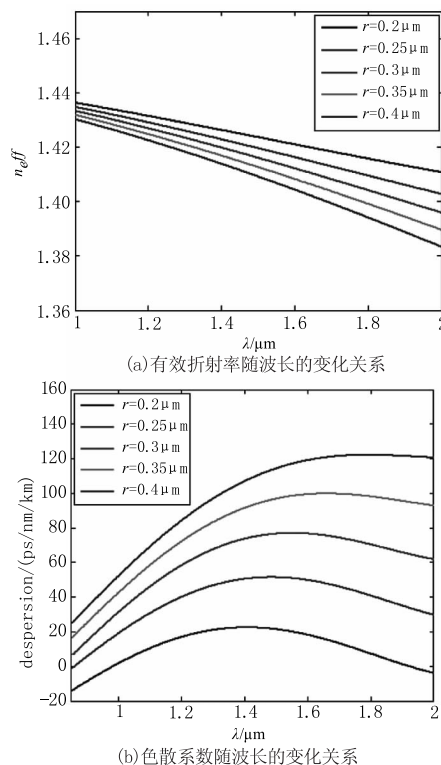


图 2 空气孔半径 r 由 $0.2 \mu\text{m}$ 以 $0.05 \mu\text{m}$ 为步长增长到 $0.4 \mu\text{m}$ 的光子晶体光纤的色散模拟结果 ($\Lambda = 0.1 \mu\text{m}$)

从图 2(a) 中可以看出,随着空气孔半径的增大,同一波长处有效折射率减小,并且随着波长的增加,有效折射率减小。从图 2(b) 中可以看出,随着空气孔半径的减小,零色散点从短波向长波方向移动,但是在长波区域,零色散波长随着空气孔半径的增大向长波方向移动。因此,如果想要将零色散波长增大至长波区域,只需要减小空气填充率 d/Λ 即可。在 $1550 \mu\text{m}$ 处,随着空气孔半径的增加,色散系数分别为 19.9470 、 50.8678 、 76.8987 、 98.4347 、 $117.0443 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。因此,在 Λ 不变的情况下, d/Λ 对色散数值影响很大, d/Λ 由 0.4 增加到 0.5 时,色散值在 1550 nm 处的增长率为 155% ,当 d/Λ 从 0.7 增加到 0.8 时,色散值的增长率为 18.9% 。这表明,在孔间距不变的情况下, d/Λ 对色散的影响力随着 d/Λ 的增大而减小,因此可以通过调节占空比来调节色散。

2.2 孔间距 Λ 对色散的影响

在保持填充率 d/Λ 不变的情况下,改变孔间距 Λ 来研究光子晶体光纤的色散特性,其结果如图 3 所示。

图 3 给出了 $d/\Lambda = 0.8$ 时, Λ 从 $0.6 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 的色散变化曲线。从图 3(a) 中可以看出,给定波

长处有效折射率随着 Λ 的增加而增加,在给定 Λ 的情况下,有效折射率随着波长的增加而减小。从图 3(b)中可以看出,零色散波长随着 Λ 的增加向长波方向移动。色散系数随着波长的增加先增大然后减小。在 1550 nm 处,随着 Λ 的增加,色散系数分别为 58.8940, 106.9935, 121.4409, 121.9873, 117.0443, 110.1200, 102.9044 ps · nm⁻¹ · km⁻¹。 Λ 由 0.6 μm 增加到 1.2 μm 时,色散值的增长率分别为 81.67%, 13.5%, 0.45%, -4.05%, -5.92%, -6.55%, 色散值随着 Λ 的增加先增大后减小,且色散系数在 Λ 较小时对 Λ 的变化及其敏感。且从图中可以看出在 1550 nm 处,色散斜率较大。

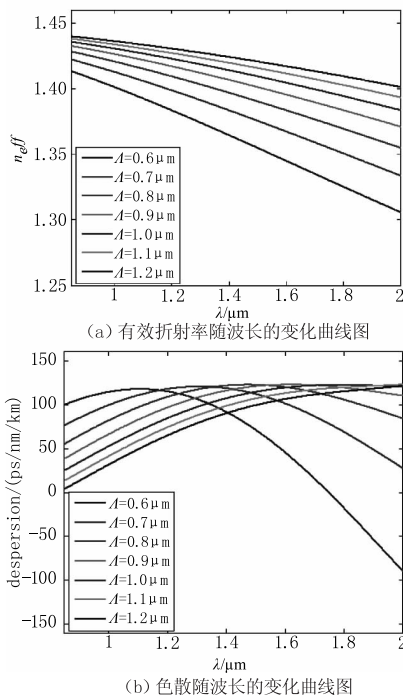


图3 孔间距 Λ 由 0.6 μm 以 0.1 μm 变化到 1.2 μm 的光子晶体光纤的色散模拟结果 ($d/\Lambda = 0.8$)

3 色散平坦光纤的设计

在第 2 节的色散特性分析中可以看出,在 1550 nm 处,填充率或是孔间距的变化都会引起色散系数较大的增长率,色散平坦且适度低得光纤在现代光通信中有着关键作用。因此,通过改变包层空气孔的半径可以得到色散较为平坦的光子晶体光纤结构。其结构图及光纤中光强度分布图如图 4 所示。

通过改变内层空气孔半径 r_1 ,可以达到调节色散的目的。下图给出了在保持孔间距 $\Lambda = 1 \mu\text{m}$,包层空气孔半径 $r = 0.4 \mu\text{m}$ 不变的情况下,改变如图 4 中所示内层空气孔半径的有效折射率和色散曲线

图,如图 5 所示。

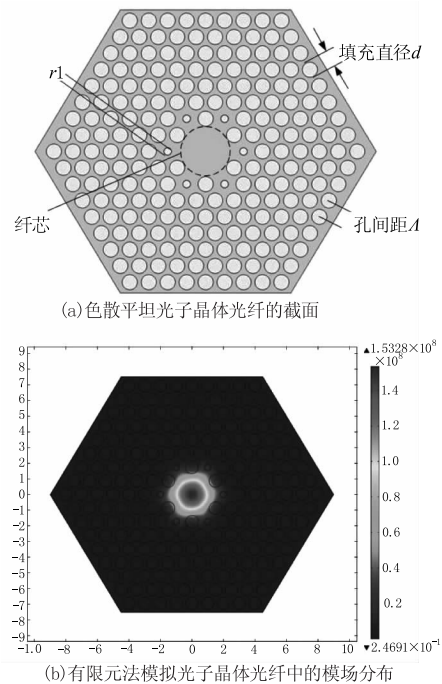


图4 色散平坦光子的光子晶体光纤结构及光强分布

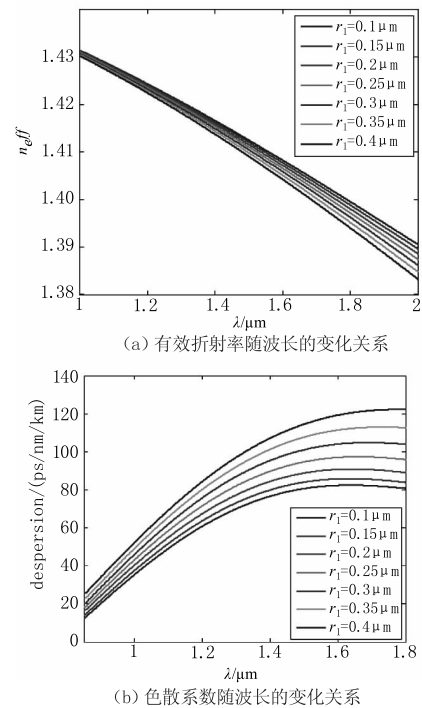


图5 内层空气孔半径 0.1 μm 以 0.05 μm 为步长变化到 0.4 μm 的光子晶体光纤的色散模拟结果 (孔间距 $\Lambda = 1 \mu\text{m}$,包层空气孔半径 $r = 0.4 \mu\text{m}$)

从图 5(a)中可以看出,随着内层空气孔半径的增大,同一波长处的有效折射率降低。图 5(b)中可以看出,随着内层空气孔的增大,零色散波长向短波方向移动。在波长 1550 nm 处,内层空气孔半径由 0.1 μm 增大到 0.4 μm ,对应的色散值为 81.5470,

84.9555, 89.8857, 95.9741, 102.6768, 109.7065, 117.0443 ps · nm⁻¹ · km⁻¹, 增长率分别为 4.18%, 5.8%, 6.77%, 6.98%, 6.85%, 6.69%。也就是说在内层空气孔半径比较小的情况下,色散对内层空气孔半径的增大比较敏感,随着内层空气孔半径的增大,色散值的增长率逐渐变小。且从图 5(b)中可以看出,在 1550 nm 处,色散曲线比较平坦。

4 结论

分析了空气填充率 d/Λ , 孔间距 Λ 对有效折射率及零色散波长的不同影响,随着填充率的减小,零色散波长向长波方向移动,随着孔间距的增大,零色散波长向长波方向移动,并且分析了在 1550 nm 处填充率和孔间距的变化对色散系数的影响。通过改变内层空气孔半径的大小,可以改变光子晶体光纤的色散特性,随着内层孔径半径的减小,零色散波长向长波方向移动,并且得到在 1550 nm 处较为平坦的色散曲线,用有限元法模拟了光在光纤中传输的场分布。

参考文献:

- [1] 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, 2(19): 1547 - 1549.
- [2] Wang Xude, Luo Aiping, Deng Liqiong, 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)
汪徐德, 罗爱平, 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.
- [3] Hu Jie, Wang Jian. Design of dispersion compensating fibers based on a depressed-index-core photonic crystal fiber[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(4): 367 - 370. (in Chinese)
胡颀, 王健. 低折射率色散补偿光子晶体光纤的设计[J]. 激光与红外, 2008, 38(4): 367 - 370.
- [4] Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. Numerical study on dispersion compensating property in photonic crystal fibers[J]. Chin. Phys. Soc, 2004, 53(6): 1880 - 1886. (in Chinese)
李曙光, 刘晓东, 侯蓝田. 光子晶体光纤色散补偿特性的数值研究[J]. 物理学报, 2004, 53(6): 1880 - 1886.
- [5] A Peyrilloux, T Chartier, A Hideur, et al. Theoretical and experimental study of the birefringence of a photonic crystal fiber [J]. J. Lightwave Technol., 2003, 21(2): 536 - 539.
- [6] S Haxha, H Ademgil. Novel design of photonic crystal fiber with low confinement loss, nearly zero ultra-flatted chromatic dispersion, negative chromatic dispersion and improved effective mode area[J]. Opt. Commun., 2008, 281(2): 278 - 286.
- [7] Belahlou A, Bickham S, Chowdhury D, et al. Fiber design consideration for 40Gb/s systems[J]. J. Lightwave Technol, 2002, 20(12): 2290 - 2305.
- [8] H Ademgil, S Haxha. Bending insensitive large mode area photonic crystal fiber [J]. Optik, 2011, 22(21): 950 - 956.
- [9] I Abdelaziz, F Abdel Malek, H Ademgil, et al. Enhanced effective area photonic crystal fiber with novel air hole design [J]. J. Lightwave Technol., 2010, 28(19): 2810 - 2817.