

三种典型结构光子晶体光纤 基本特性的比较和分析^{*}

姜凌红^{1)†} 侯蓝田¹⁾²⁾ 杨倩倩¹⁾

1) (燕山大学红外光纤与传感研究所, 秦皇岛 066004)

2) (燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2009 年 9 月 9 日收到; 2009 年 11 月 11 日收到修改稿)

应用多极法比较和分析了相同结构参数下的正六边形、正八边形和正十边形光子晶体光纤的色散系数、色散斜率、非线性系数和限制损耗. 正六边形光子晶体光纤更适合用于色散补偿和高非线性研究, 在波长 $0.8\ \mu\text{m}$ 处的非线性系数达到了 $0.37\ \text{m}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$; 正十边形光子晶体光纤更适合用于色散平坦和低限制损耗的研究, 在波长 $0.8\ \mu\text{m}$ 处的限制损耗相对正六边形光子晶体光纤减小了约 3000 个数量级, 在 $1.4\text{--}1.65\ \mu\text{m}$ 波长范围内, 正十边形光纤的色散系数介于 $-0.07\text{--}0.17\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 之间, 得到 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近的近似零色散光子晶体光纤. 包层结构越接近圆形的光子晶体光纤的限制损耗越低, 非线性系数越低, 色散越平坦.

关键词: 光子晶体光纤, 色散系数, 非线性系数, 限制损耗

PACC: 4280M, 4281D, 8120J

1. 引言

由单一介质构成的光子晶体光纤, 在二维方向上呈现周期性紧密排列, 在三维空间基本保持不变的波长量级空气孔构成微结构包层的新型光纤^[1], 这种结构使光子晶体光纤改变了传统光纤的很多传输特性. 这些特性主要包括无截止单模、可控的模式面积和极强的双折射、较宽波长范围内可控的色散特性、作为传输介质的高非线性特性^[2-4]等.

包层为正六边形结构的光子晶体光纤引起了很多学者的研究兴趣, 灵活设计空气孔半径和空气孔间距能够实现传统光纤难以实现的特性. 随着光纤控制技术的改进, 利用空气孔排列的可控性, 研究人员根据需要设计了不同排列的光子晶体光纤, 如复合六边形排列^[5]、椭圆孔六边形排列^[6]、四方排列^[7,8]以及圆形排列^[9,10]光子晶体光纤, 这些结果都显示了各自的优越性. 但对基本传输特性的优越性还没有进行深入研究. 为了更好地分析不同结构的光子晶体光纤的传输特性, 通过多极法分析

了相同结构参数下的包层结构为正六边形、正八边形、正十边形的逐渐接近圆形结构的光子晶体光纤的色散、色散斜率、损耗以及非线性特性, 分别比较和分析了不同结构的光子晶体光纤的基本传输特性.

2. 理论基础

已有很多数值模型用于光子晶体光纤的特性分析, 本文采用多极法对所设计的光子晶体光纤模型的色散特性和限制损耗进行分析. 多极法的理论依据最早由 Rayleigh 于 1982 年提出, White 等^[11-13]将它引入到光子晶体光纤的色散特性及损耗特性的计算上, 可以获得很高精度的模式有效折射率和损耗等, 进而计算出光子晶体光纤的模式分布、色散、限制损耗. 这种方法适合于计算圆柱形空气孔构成的光子晶体光纤, 可以同时产生模式传播常数及其有效折射率的实部和虚部. 利用有效折射率的实部可以计算其色散, 并可以根据设定的波长求得其传播常数, 因此可以利用 Sellmeier 公式在数

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2003CB314905)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60637010) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2003AA311010) 资助的课题.

[†] E-mail: jlhappy2009@sohu.com

值模拟过程中系统地考虑材料色散. 而利用其虚部可以计算有限包层空气孔情况下光子晶体光纤的限制损耗.

通过模式有效折射率 n_{eff} 的虚部, 可以得到该模式所对应的光纤的限制损耗

$$L = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6, \quad (1)$$

式中 λ 的单位是 μm , 可以由 n_{eff} 的实部得到色散系数

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

光纤色散斜率随波长的变化关系为

$$D_{\text{slope}} = \frac{dD}{d\lambda} = -\frac{1}{\lambda^2} \frac{dD}{d\omega}, \quad (3)$$

式中 D 为光纤基模的总色散系数, 包含材料色散、波导色散和剖面色散; D_{slope} 为色散斜率, c 为真空中的光速. 根据 (2) 式可以求得单模光纤的总色散随入射光波长的变化关系.

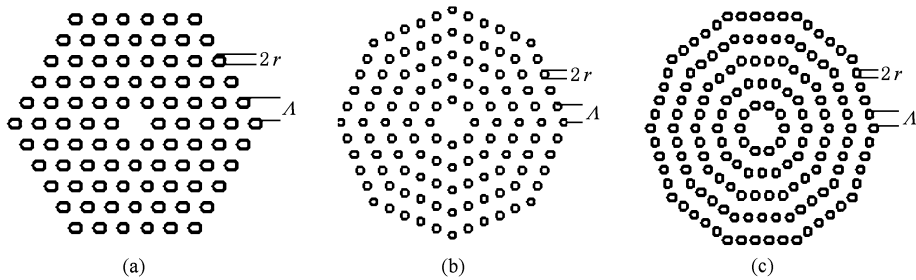


图 1 包层结构截面图 (a) 正六边形结构截面图, (b) 正八边形结构截面图, (c) 正十边形结构截面图

3.1. 不同包层结构的光子晶体光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近的基本特性

利用多极法对包层为正六边形、正八边形、正十边形结构, 孔间距 $\Lambda = 1.75 \mu\text{m}$, 空气孔半径 $r = 0.2595 \mu\text{m}$ 的光子晶体光纤进行模拟, 得到图 2 所示的基模 HE_{11} 色散系数、色散斜率、限制损耗和非线性系数随波长变化的数值模拟结果. 从图 2(a) 可以看出, 正六边形和正八边形都表现了更好的正常色散, 正十边形在波长 $1-2 \mu\text{m}$ 之间共有 3 个零色散点, 在 $1.4-1.65 \mu\text{m}$ 波长范围内, 光纤的色散系数介于 $-0.07-0.17 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 之间, 得到 $1.55 \mu\text{m}$ 附近具有近似零色散光子晶体光纤, 正十边形光子晶体光纤表现了更好的色散平坦性. 从图 2(b) 可以看出, 正十边形在波长 $1-2 \mu\text{m}$ 范围内, 色散斜率几乎表现的都为正值, 正十边形光子晶体光纤

微结构光纤非线性系数和色散的可调性取决于包层结构参数的灵活设计, 其中包层结构参数主要包括空气孔半径 r 和空气孔间距 Λ 以及空气填充率 f . 在微结构光纤模拟计算过程中, 采用等效面积法^[14]将 f 取为 $f = (2\pi/\sqrt{3})(r/\Lambda)^2$, 微结构光纤的非线性系数 $\gamma(\lambda)$ ^[15]为

$$\gamma(\lambda) = 2\pi n_2/(\lambda A_{\text{eff}}), \quad (4)$$

式中 A_{eff} 是模有效面积, $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 是石英非线性折射率.

3. 不同的包层结构对光子晶体光纤基本特性的影响

本文所研究的包层结构为正六边形、正八边形和正十边形的结构的截面图见图 1, 其中 Λ 为孔间距, r 为空气孔半径, 分别分析了相同结构参数、不同包层结构的光子晶体光纤的基本特性.

在这个波长范围内不适合用于色散补偿. 正六边形和正八边形光子晶体光纤在整个波长范围内色散斜率存在负值, 而且由图 2(a) 得出有很大的负色散绝对值, 更适合用于色散补偿光子晶体光纤. 从图 2(c) 可以看出, 正六边形、正八边形和正十边形的限制损耗在相同的结构参数下逐渐减小, 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 正十边形结构相比正六边形结构光子晶体光纤限制损耗减小了几十个数量级, 因此正十边形光子晶体光纤更适合用于拉制低限制损耗光子晶体光纤. 从图 2(d) 可以看出, 正六边形、正八边形和正十边形的非线性系数在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处分别为 $0.0215, 0.014, 0.0095 \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 相同的结构参数的不同包层结构光纤的非线性逐渐减小, 包层为正六边形结构的光子晶体光纤更适合用于拉制高非线性光子晶体光纤, 用于光子晶体光纤的非线性效应的研究.

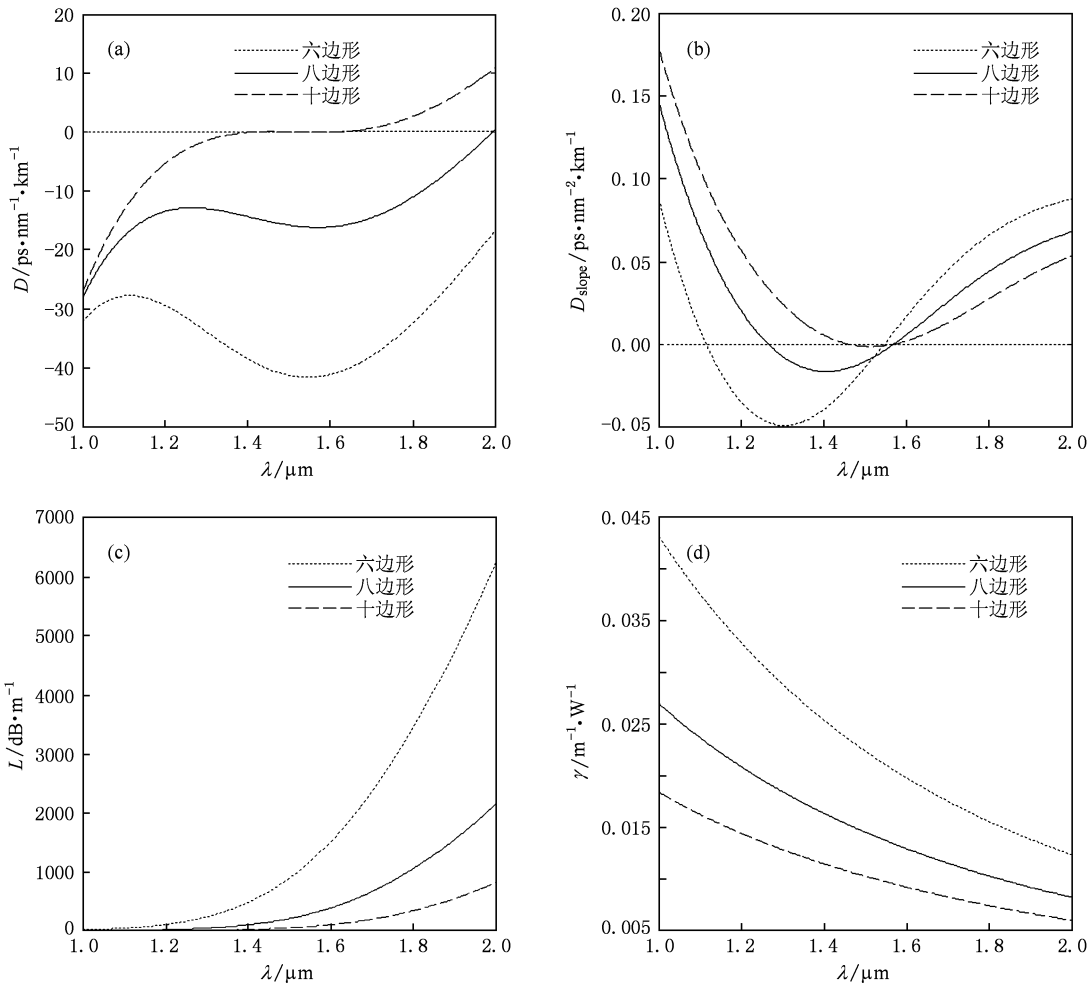


图2 $\Lambda = 1.75\text{ }\mu\text{m}$, $r = 0.2595\text{ }\mu\text{m}$ 固定时,色散系数、色散斜率、限制损耗和非线性系数随波长的变化 (a) 色散系数 D , (b) 色散斜率 D_{slope} , (c) 限制损耗 L , (d) 非线性系数 γ

3.2. 不同包层结构的光子晶体光纤在 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 附近的基本特性

利用多极法对包层为正六边形、正八边形、正十边形结构,孔间距 $\Lambda = 1\text{ }\mu\text{m}$ 空气孔半径 $r = 0.25\text{ }\mu\text{m}$ 的光子晶体光纤进行模拟,得到图3所示的基模 HE_{11} 色散系数、色散斜率、限制损耗和非线性系数随波长变化的数值模拟结果.由图3(a)可以看出,在 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 附近,三种不同结构的光子晶体光纤都表现了正常色散,其中正十边形结构光子晶体光纤在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 附近具有近似零色散,正六边形和正八边形负色散绝对值比较大.由图3(b)可以看出,正六边形结构光子晶体光纤在整个波长范围内的色散斜率绝对值最大,最适合用于宽带色散补偿.正十边形结构光子晶体光纤的色散斜率绝对值相对最

小,得出正十边形光子晶体光纤具有更好的平坦色散的结论.从图3(c)可以看出,正六边形、正八边形和正十边形的限制损耗在波长 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 处分别为 $150, 0.65, 0.05\text{ dB/km}$,光子晶体光纤的限制损耗逐渐减小,其中正十边形结构的限制损耗相对正六边形结构减小了3000个数量级.由图2(d)和图3(d)可以看出,波长 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 附近的光子晶体光纤的非线性系数比波长 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 附近的光子晶体光纤非线性系数高,其中正六边形结构的光子晶体光纤具有更高的非线性系数,正六边形、正八边形和正十边形结构的光纤在飞秒激光器工作波长 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 处的非线性系数分别为 $0.24, 0.18, 0.085\text{ m}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$,因此正六边形结构的光子晶体光纤更适合拉制波长 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 处的高非线性光子晶体光纤.

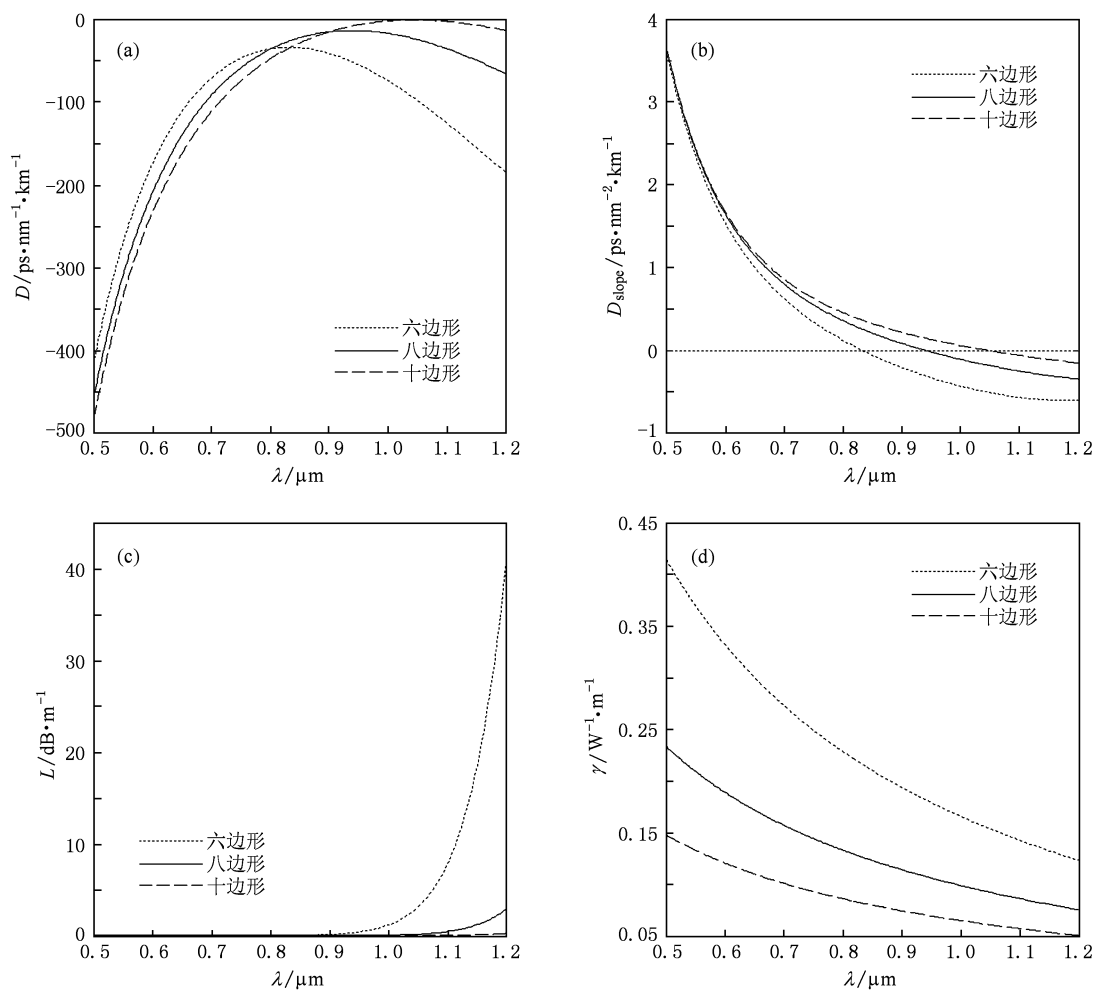


图3 $\Lambda=1\text{ }\mu\text{m}$, $r=0.25\text{ }\mu\text{m}$ 固定时,色散系数、色散斜率、限制损耗和非线性系数随波长的变化 (a)色散系数 D , (b)色散斜率 D_{slope} , (c)限制损耗 L , (d)非线性系数 γ

3.3. 特殊结构下的不同包层结构的光子晶体光纤色散和非线性的分析

以下所分析结构是孔间距为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 第一层空气孔半径为 $0.39\text{ }\mu\text{m}$, 其余两层为空气孔半径为 $0.33\text{ }\mu\text{m}$ 的双包层的正六边形、正八边形、正十边形的光子晶体光纤, 这种结构对于光纤的制备比较简单. 由图 4(a) 可以看出, 在波长 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 处, 正六边形、正八边形、正十边形结构的光子晶体光纤的色散系数分别为 $-580, -50, 60\text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$. 在波长 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 处, 色散系数分别约为 $100, 20, 0\text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$, 正十边形光子晶体光纤在飞秒激光器的工作波长处具有近似零色散, 可以得出正十边形光子晶体光纤更适合用于飞秒激光器工作波长的近零色

散平坦光子晶体光纤. 图 4(b) 得到正六边形、正八边形、正十边形结构的光子晶体光纤的色散斜率在波长 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 处分别为 $-1.7, -0.8, -0.05\text{ ps}/(\text{km}^2\cdot\text{nm})$, 正六边形光子晶体光纤在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 附近可以得到更低的色散和色散斜率, 而且色散和色散斜率都为负值, 因此特殊结构的正六边形光子晶体光纤更易于用作色散补偿光纤. 图 4(c) 得到特殊结构正六边形、正八边形、正十边形光子晶体光纤在波长 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 处的非线性系数分别为 $0.37, 0.19, 0.11\text{ m}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$, 正六边形光子晶体光纤达到了很高的非线性系数, 与文献[16]对比, 在 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 附近可以得到更高的非线性系数, 这对于简单结构的光纤非线性系数值已经达到了一个新水平.

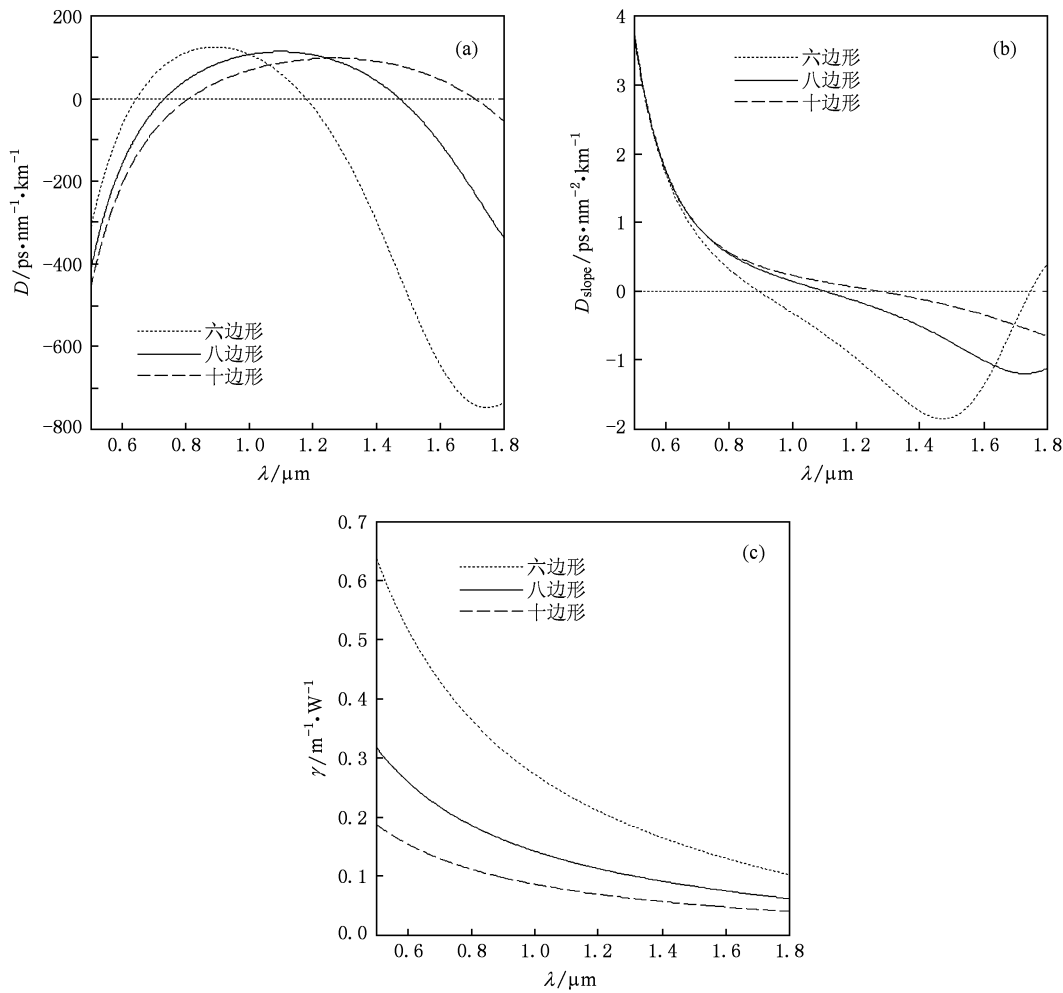


图4 $\Lambda = 1\text{ }\mu\text{m}$, $r_1 = 0.39\text{ }\mu\text{m}$, $r = 0.33\text{ }\mu\text{m}$ 固定时,色散系数、色散斜率和非线性系数随波长的变化 (a)色散系数 D , (b)色散斜率 D_{slope} , (c)非线性系数 γ

4. 结 论

综上所述,通过比较相同结构参数下不同的包层结构的光子晶体光纤,正六边形结构光子晶体光纤更适合用于色散补偿光纤,相对正十边形和正八边光子晶体光纤,正六边形光子晶体光纤在波长 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 处的非线性系数达到了 $0.37\text{ m}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$,其对应的非线性系数最大,是研究光纤高非线性效应的最好的选择. 正十边形光子晶体光纤包层结构更

加接近布拉格光纤结构,在波长 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 处的限制损耗相对正六边形光子晶体光纤减小了约 3000 个数量级,在 $1.4\text{--}1.65\text{ }\mu\text{m}$ 波长范围内,光纤的色散系数介于 $-0.07\text{--}0.17\text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 之间,得到 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 附近的近似零色散光子晶体光纤,因此正十边形结构更适合用于色散平坦和低限制损耗光子晶体光纤. 包层结构越接近圆形的光子晶体光纤的限制损耗越低,非线性系数越低,色散越平坦. 本文为研究光子晶体光纤色散和非线性特性提供了一定的理论依据.

[1] Knight J C, Russell P S 2002 *Science* **296** 276

[2] Li S G, Liu X D, Hou L T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1873 (in Chinese) [李曙光、刘晓东、侯蓝田 2004 物理学报 **53** 1873]

[3] Knight J C, Arriaga J, Birks T A, Russell P S J 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 807

[4] Hu M L, Wang Q Y, Li Y F, Wang Z, Zhang Z G, Chai L,

- Zhang R B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4252 (in Chinese) [胡名列、王清月、栗岩峰、王 专、张志刚、柴 路、章若冰 2004 物理学报 **53** 4252]
- [5] Wei D B, Zhou G Y, Zhao X T, Yuan J H, Meng J, Wang H Y, Hou L T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3011 (in Chinese) [魏东宾、周桂耀、赵兴涛、苑金辉、孟 佳、王海云、侯蓝田 2008 物理学报 **57** 3011]
- [6] Ren G B, Wang Z, Lou S Q, Jian S S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 484 (in Chinese) [任国斌、王 智、姜淑琴、简水生 2004 物理学报 **53** 484]
- [7] Li S G, Ying G L, Zhou G Y, Hou L T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 238 (in Chinese) [李曙光、荆光龙、周桂耀、侯蓝田 2006 物理学报 **55** 238]
- [8] Zhang F D, Liu X Y, Zhang M, Ye P D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6 (in Chinese) [张方迪、刘小毅、张 民、叶培大 2006 物理学报 **55** 6]
- [9] Ni Y, Zhang L, Gu C, Jia S, Peng J D 2004 *Opt. Express* **15** 4602
- [10] Xu Y, Yariv A 2003 *Opt. Express* **11** 1039
- [11] White T P, Kuhlmeier B T, McPhedran R C, Maystre D, Renversez G, de Sterke C M, Botten L C 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2322
- [12] Kuhlmeier B T, White T P, Renversez G, Maystre D, Botten L C, de Sterke C M, Mcphedran R C 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2331
- [13] White T P, McPhedran R C, Botten L C, Kuhlmeier B T, Mcphedran R C 2001 *Opt. Express* **9** 721
- [14] Birks T A, Mogilevtsev D, Knight J C, Arriaga J 1999 *Proc. Opt. Fiber Conf. San Diego, California* **FG4** 114
- [15] Limpert J, Schreiber T, Nolte S 2003 *Opt. Express* **11** 818
- [16] Sun T L, Li Q H, Liu J H, Liu Y 2008 *Laser Technol.* **32** 330 (in Chinese) [孙太龙、励强华、刘晶会、刘 颖 2008 激光技术 **32** 330]

Comparison and analysis of the basic characteristics of photonic crystal fiber with three typical structures^{*}

Jiang Ling-Hong^{1)†} Hou Lan-Tian¹⁾²⁾ Yang Qian-Qian¹⁾

1) (Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

2) (State Key Laboratory of Metastable Material Science & Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 9 September 2009; revised manuscript received 11 November 2009)

Abstract

The multi-pole method is used to analyse and compare the dispersion coefficient, dispersion slope, nonlinear coefficient, confinement loss of photonic crystal fibers of hexagonal, octagonal and decagonal structures with the same structure parameters. The photonic crystal fiber with hexagonal structure is more suited for study of dispersion compensation and high nonlinearity. The nonlinear coefficient of photonic crystal fiber with hexagonal structure is $0.37 \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ at $0.8 \text{ }\mu\text{m}$. The photonic crystal fiber with decagonal structure is more suited for study of flat dispersion curve and low confinement loss. The confinement loss of photonic crystal fiber with decagonal structure is about 3000 orders of magnitude less than that with hexagonal structure around $0.8 \text{ }\mu\text{m}$. The dispersion of photonic crystal fibre with decagonal structure is less than 0.17 and larger than $-0.07 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ from 1.4 to $1.65 \text{ }\mu\text{m}$, resulting in nearly zero dispersion of photonic crystal fiber around $1.55 \text{ }\mu\text{m}$. The cladding structure of photonic crystal fiber is closer to the circular structure, the dispersion of which is much flatter, the nonlinear coefficient and the confinement loss of which are much lower.

Keywords: photonic crystal fiber, dispersion coefficient, nonlinear coefficient, confinement loss

PACC: 4280M, 4281D, 8120J

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2003CB314905), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60637010), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2003AA311010).

[†] E-mail: jlhhappy2009@sohu.com