

具有三个及四个零色散波长光子晶体 光纤的仿真研究*

赵兴涛^{1)2)†} 郑义¹⁾ 刘晓旭³⁾ 刘兆伦²⁾ 李曙光¹⁾²⁾ 侯蓝田²⁾

1) (北京交通大学理学院激光研究所, 北京 100044)

2) (燕山大学, 河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 亚稳材料科学与技术国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

3) (河北科技师范学院理学院, 秦皇岛 066004)

(2011年12月16日收到; 2012年4月1日收到修改稿)

利用多极法对光子晶体光纤的色散特性进行了模拟, 通过设计合适的结构参数, 得到了具有3个零色散波长的单模光纤. 对中心纤芯有1个微小空气孔光子晶体光纤的色散特性进行了分析, 设计出了具有4个零色散波长的色散曲线. 分析了零色散波长随光纤结构的变化规律, 这些零色散波长的位置和间距可以在很大波长范围内灵活调节. 具有多个零色散波长的光纤可以得到色散值极低的超平坦色散曲线. 多个零色散波长光纤能产生丰富的相位匹配曲线, 可以有效地控制光孤子及超短脉冲的四波混频及共振散射产生的光谱特性.

关键词: 光子晶体光纤, 多极法, 零色散波长, 色散平坦

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp

1 引言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 由于其可控的色散特性和较强的非线性特性, 为控制光散射提供了新的途径, 在非线性光学方面有很多应用^[1-5]. 在具有1个零色散波长 (zero dispersion wavelength, ZDW) 的 PCF 反常色散区, 四波混频可以实现相位匹配, 传输孤子能够辐射出蓝移色散波^[6]. 而在具有2个 ZDW 的 PCF 中, 可以产生两边带的相位匹配共振散射, 孤子可以向2个正常色散区分别辐射出相位匹配的蓝移色散波和红移色散波^[7-10]. 然而, 具有1个 ZDW 及2个 ZDW 的 PCF, 都仅有1个反常色散区, 且产生的色散波都位于正常色散区.

通过对 PCF 结构的特殊设计, 可以得到具有3个及4个 ZDW 的 PCF^[11-15]. 多个零色散波长 PCF

可以产生丰富的相位匹配曲线, 为研究孤子与色散波之间的关系提供了新的物理环境. 此 PCF 有被正常色散区隔开的2个反常色散区, 孤子可以从一个反常色散区直接向另一个反常色散区辐射色散波, 辐射到反常色散区的色散波, 转移了抽运脉冲的大部分能量, 且仍以孤子的形式在光纤中传输. 通过设计 PCF 的结构参数, 可以改变零色散波长, 控制多个四波混频峰的位置, 使其距抽运频率很远, 并远离拉曼增益的波长, 减少了拉曼效应的影响, 可以产生更多的光子对, 能有效控制光孤子及超短脉冲的四波混频及共振散射产生的光谱特性, 非线性光谱的灵活调节在波长转换、超连续谱产生及双光子源等量子光学方面有重要应用.

本文利用多极法对光子晶体光纤的色散特性进行了模拟^[16-19], 通过设计 PCF 的结构参数, 得到了具有3个及4个零色散波长的 PCF, 分析了色散与光纤结构的关系, 为 PCF 的制备及非线性光学

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60637010)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327604)、国家自然科学基金 (批准号: 60978028)、河北省自然科学基金 (批准号: F2010001313, F2010001291) 和秦皇岛市科学技术研究与发展计划 (批准号: 201001A076) 资助的课题.

† E-mail: zxt-81@sohu.com

领用的应用提供了理论指导.

2 具有三个零色散波长 PCF 的色散特性

常用的折射率引导型实芯 PCF 端面如图 1 所示. 灰色区域为纯石英材料, 白色圆圈为空气孔, 包层空气孔间距为 Λ , 空气孔直径为 d , 中心缺失 1 个空气孔的区域为纤芯.

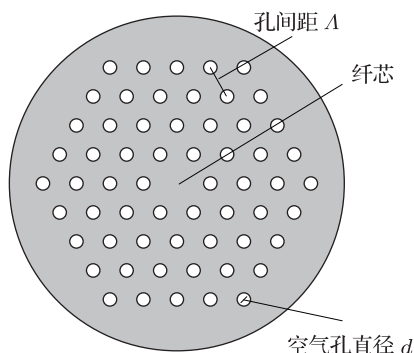


图 1 PCF 端面图

利用多极法对图 1 所示的具有 60 个空气孔的四层六角形结构 PCF 进行了模拟, 这样得到有效折射率的最大误差小于 10^{-7} , 结果准确可靠 [16-19]. 得到其色散系数 D 与光纤结构参数的变化关系如图 2 和图 3 所示. 图 2 为 $d/\Lambda = 0.29$ 时, 对于 $\Lambda = 2.18 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.22 \mu\text{m}$, PCF 的色散曲线. 可以看出, Λ 越大, PCF 的色散值越大. 图 3 为 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$ 时, 对于 $d/\Lambda = 0.28$, $d/\Lambda = 0.29$, $d/\Lambda = 0.3$, PCF 的色散曲线. 随着 d/Λ 增大, 短波段的色散值变大, 长波段的色散值变小.

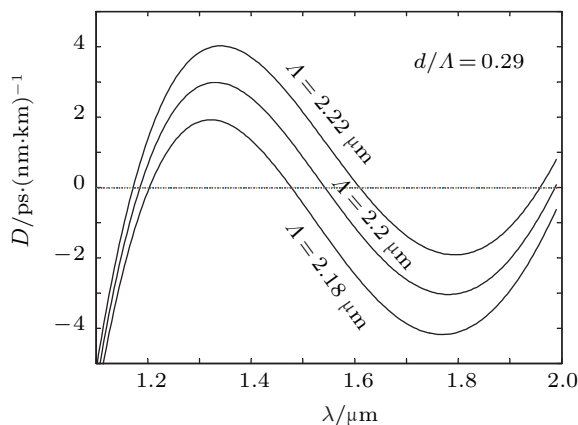


图 2 $d/\Lambda = 0.29$ 时, 对于不同的 Λ , PCF 的色散曲线

根据图 2 和图 3 中色散随 PCF 结构参数

的变化规律, 可以得到不同零色散波长及零色散间距的 PCF, 如图 4 所示. 当 $d/\Lambda = 0.27$, $\Lambda = 2.264 \mu\text{m}$ 时, PCF 的三个零色散波长分别为 $1.315 \mu\text{m}$, $1.529 \mu\text{m}$, $1.703 \mu\text{m}$. 当 $d/\Lambda = 0.28$, $\Lambda = 2.233 \mu\text{m}$ 时, PCF 的三个零色散波长分别为 $1.234 \mu\text{m}$, $1.539 \mu\text{m}$, $1.861 \mu\text{m}$. 当 $d/\Lambda = 0.29$, $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$ 时, PCF 的三个零色散波长分别为 $1.185 \mu\text{m}$, $1.542 \mu\text{m}$, $1.988 \mu\text{m}$. 所以通过 PCF 结构参数的设计, 可以到我们需要的零色散波长及零色散间距的 PCF.

当 $d/\Lambda = 0.27 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.264 \mu\text{m}$ 时, PCF 色散曲线的放大图如图 5 所示. 可以看出, 在波长 $1.3 \mu\text{m}$ — $1.7 \mu\text{m}$ 的范围内, 色散值在 -0.5 — $0.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 之间变化, 其为超平坦色散曲线.

所设计的 PCF 由于空气填充比较低 ($d/\Lambda < 0.43$), 可以单模传输, 且纤芯较小, 具有高非线性系数, 能应用于波长转换、超连续谱产生及双光子等非线性过程.

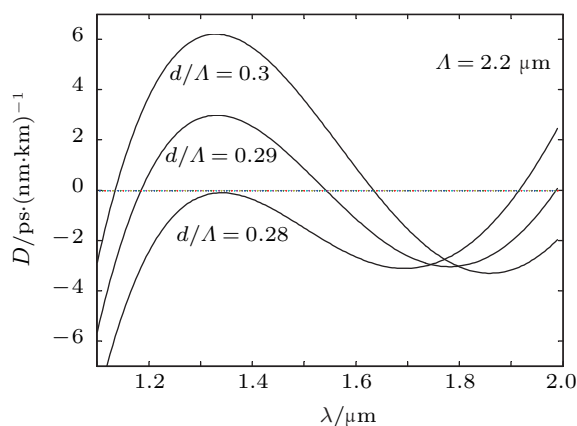


图 3 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$ 时, 对于不同的 d/Λ , PCF 的色散曲线

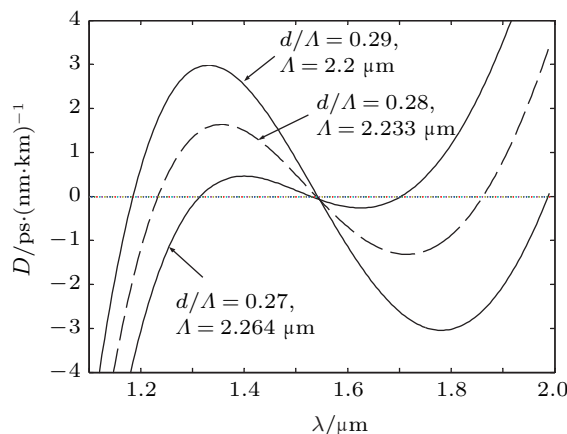


图 4 具有不同零色散波长 PCF 的色散曲线

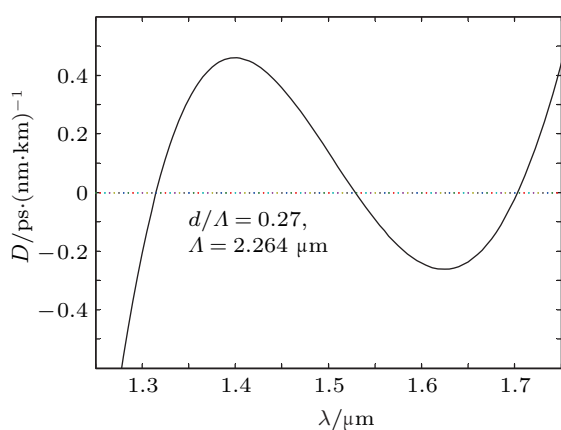


图5 超平坦色散曲线

3 具有四个零色散波长 PCF 的色散分析

中心纤芯带有微小空气孔的 PCF 如图 6 所示. 其中灰色区域为纯石英材料, 白色圆圈为空气孔, 包层空气孔间距为 Λ , 空气孔直径为 d , 中心带有 1 个微小空气孔的区域为纤芯, 微小空气孔的直径为 c .

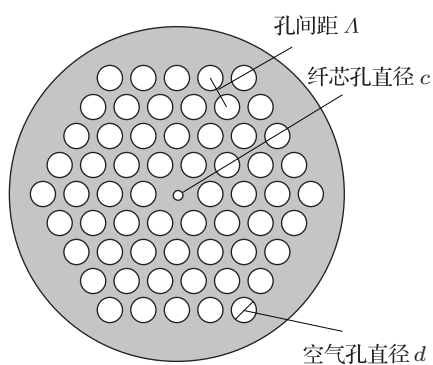


图6 中心纤芯带有微小空气孔的 PCF 端面图

这种 PCF 的色散随光纤结构的变化关系如图 7 至图 9 所示. 图 7 为 $d/\Lambda = 0.751, c = 0.586 \mu\text{m}$ 时, 对于 $\Lambda = 2.07 \mu\text{m}, \Lambda = 2.08 \mu\text{m}, \Lambda = 2.09 \mu\text{m}$, PCF 的色散曲线. 色散随 Λ 的增大而增大, 长波段的色散值变化较大, 短波段的色散值变化较小. 图 8 为 $\Lambda = 2.08 \mu\text{m}, c = 0.586 \mu\text{m}$ 时, 对于 $d/\Lambda = 0.749, d/\Lambda = 0.751, d/\Lambda = 0.753$, PCF 的色散曲线. 在长波段, 色散随 d/Λ 的增大而增大; 在短波段, 色散随 d/Λ 的增大而减

小. 图 9 为 $d/\Lambda = 0.751, \Lambda = 2.08 \mu\text{m}$ 时, 对于 $c = 0.584 \mu\text{m}, c = 0.586 \mu\text{m}, c = 0.588 \mu\text{m}$, PCF 的色散曲线. 色散随 c 的增大而减小, 长波段的色散值变化较大, 短波段的色散值变化较小.

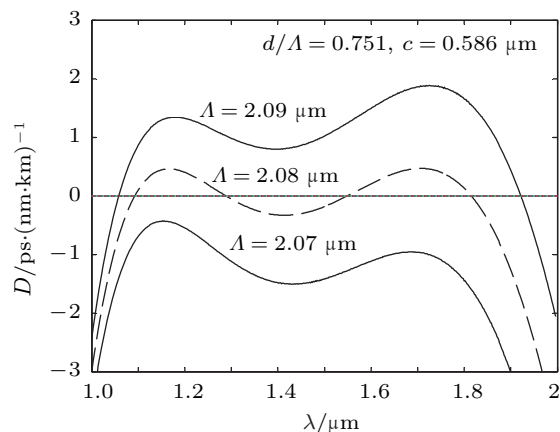


图7 对于不同的 Λ , PCF 的色散曲线

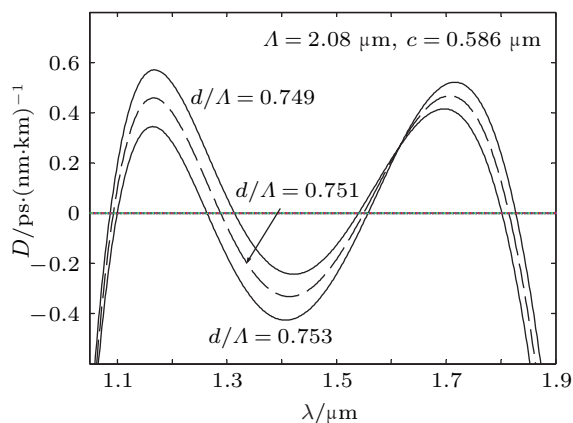


图8 对于不同的 d/Λ , PCF 的色散曲线

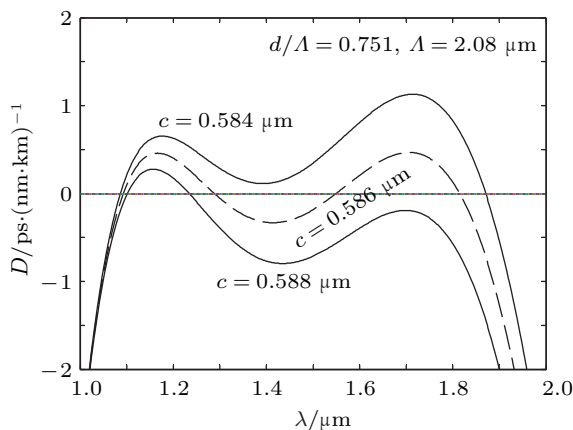


图9 对于不同的 c , PCF 的色散曲线

根据图 7 至图 9 色散随 PCF 结构的变化关系, 得到了不同零色散波长及零色散间距的 PCF, 如图 10 所示. 当 $\Lambda = 2.035 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.723$, $c = 0.566 \mu\text{m}$ 时, PCF 的四个零色散波长分别为 $1.22 \mu\text{m}$, $1.33 \mu\text{m}$, $1.445 \mu\text{m}$, $1.575 \mu\text{m}$. 当 $\Lambda = 2.066 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.742$, $c = 0.58 \mu\text{m}$ 时, PCF 的四个零色散波长分别为 $1.114 \mu\text{m}$, $1.294 \mu\text{m}$, $1.521 \mu\text{m}$, $1.742 \mu\text{m}$. 当 $\Lambda = 2.08 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.751$, $c = 0.586 \mu\text{m}$ 时, PCF 的四个零色散波长分别为 $1.085 \mu\text{m}$, $1.274 \mu\text{m}$, $1.548 \mu\text{m}$, $1.807 \mu\text{m}$. 从这些数据可以看出, 色散值及零色散波长间距变化的倍数与光纤参数增加的幅度近似成正比关系. 通过适当调整 PCF 结构参数, 可以得到我们需要的零色散波长及零色散间距的 PCF.

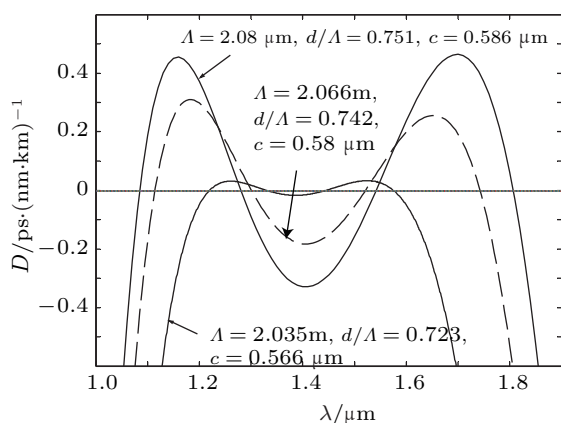


图 10 不同零色散波长的 PCF 色散曲线

当 $\Lambda = 2.035 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.723$, $c = 0.566 \mu\text{m}$ 时, PCF 色散曲线的放大图如图 11 所示. 可以看出, 在波长 $1.2 \mu\text{m}$ — $1.6 \mu\text{m}$ 的范围内, 色散值在 -0.04 — $0.04 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 之间变化, 其为超平坦色散曲线.

所设计的 PCF 有被正常色散区分隔开的 2 个反常色散区, 这些零色散波长的位置和间距可以在很大波长范围内灵活调节, 可以产生丰富的相位匹

配曲线, 能有效控制光孤子及超短脉冲的四波混频及共振散射产生的光谱特性.

文献 [11] 制备出了微小空气孔直径 c 为 110 nm 的类似结构 PCF. 本文所设计 PCF 的 c 为 580 nm , 空气孔越大越容易制备, 所以设计的 PCF 是可以制备出来的.

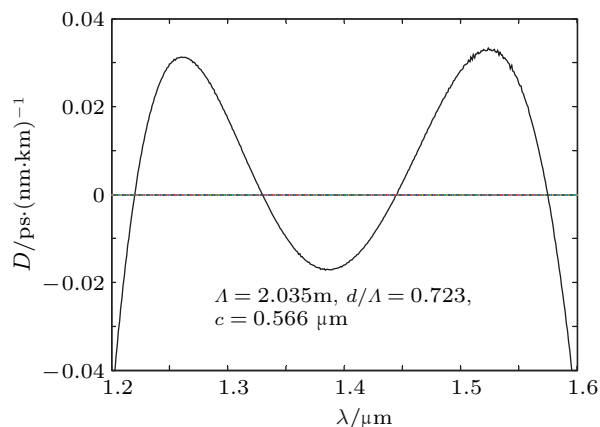


图 11 超平坦色散曲线

4 结论

通过对光纤结构的特殊设计, 得到了具有 3 个及 4 个零色散波长的 PCF. 分析了 PCF 色散随 Λ , d/Λ 及 c 等结构参数的变化关系, 这些零色散波长的位置及间距可以在很大波长范围内灵活调节. 在具有 3 个零色散波长的 PCF 中, 在波长 $1.3 \mu\text{m}$ — $1.7 \mu\text{m}$ 的范围内, 色散值可以在 -0.5 — $0.5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 范围内. 在具有 4 个零色散波长的 PCF 中, 在波长 $1.2 \mu\text{m}$ — $1.6 \mu\text{m}$ 的范围内, 色散值在 -0.04 — $0.04 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 范围内, 其为近零超平坦色散曲线. 多个零色散波长光纤可以产生丰富的相位匹配曲线, 有效控制光孤子及超短脉冲的四波混频及共振散射产生的光谱特性, 非线性光谱位置的灵活调节在波长转换、超连续谱产生及双光子源等量子光学方面有重要应用.

[1] Reeves W H, Skryabin D V, Biancalana F, Knight J C, Russell P St J, Omenetto F G, E?mov A, Taylor A J 2003 *Nature* **424** 511
 [2] Erkintalo M, Genty G, Dudley M 2010 *Opt. Express* **18** 13379
 [3] Andersen T V, Hilligsøe K M, Nielsen C K, Thøgersen J, Hansen K P, Keiding S R, Larsen J J 2004 *Opt. Express* **12** 4113
 [4] Hao Z J, Zhao C J, Wen J G, Wen S C, Fan D Y 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 10060031 (in Chinese) [郝志坚, 赵楚军, 文建国, 文双春,

范滇元 2011 光学学报 **31** 10060031]
 [5] Wang Y B, Xiong C L, Hou J, Lu Q S, Peng Y, Chen Z L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014201 (in Chinese) [王彦斌, 熊春乐, 侯静, 陆启生, 彭杨, 陈子伦 2011 物理学报 **60** 014201]
 [6] Austin D R, Sterke C M, Eggleton B J 2006 *Opt. Express* **14** 11997
 [7] Fang L, Zhao J L, Gan X T, Li P, Zhang X J 2010 *Acta Photon. Sin.* **39** 1921 (in Chinese) [方亮, 赵建林, 甘雪涛, 李鹏, 张晓

- 娟 2010 光子学报 **39** 1921]
- [8] Barviau B, Kibler B, Kudlinski A, Mussot A, Millot G, Picozzi A 2009 *Opt. Express* **17** 7392
- [9] Chick B J, Chon J W M, Gu M 2008 *Opt. Express* **16** 20099
- [10] Cumberland B A, Travers J C, Popov S V, Taylor J R 2008 *Opt. Express* **16** 5954
- [11] Wiederhecker G S, Cordeiro C M B, Couny F, Benabid F, Maier S A, Knight J C, Cruz C H B, Fragnito H L 2007 *Nature Photon.* **1** 115
- [12] Kibler B, Lacourt P A, Courvoisier F, Dudley J M 2007 *Electron. Lett.* **43** 967
- [13] Stark S P, Biancalana F, Podlipensky A, Russell P St J 2011 *Phys. Review A* **83** 023808
- [14] Zheltikov A M 2006 *Appl. Phys. B* **84** 69
- [15] Zhang Y N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8632 (in Chinese) [张亚妮 2010 物理学报 **59** 8632]
- [16] White T P, Kuhlmeiy B T, Mcphedran R C, Maystre D, Renversez G, Martijn C, Botten L C 2002 *Opt. Soc. Am. B* **19** 2322
- [17] Kuhlmeiy B T, White T P, Renversez G, Maystre D, Botten L C, Martijn C, Mcphedran R C 2002 *Opt. Soc. Am. B* **19** 2331
- [18] Zhao X T, Hou L T, Liu Z L, Wang W, Wei H Y, Ma J R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2275 (in Chinese) [赵兴涛, 侯蓝田, 刘兆伦, 王伟, 魏红颜, 马景瑞 2007 物理学报 **56** 2275]
- [19] Zhao X T, Zhou G Y, Li S G, Liu Z L, Wei D B, Hou Z Y, Hou L T 2008 *Appl. Opt.* **47** 5190

Simulation of photonic crystal fiber with three and four zero-dispersion wavelengths*

Zhao Xing-Tao^{1)2)†} Zheng Yi¹⁾ Liu Xiao-Xu³⁾ Liu Zhao-Lun²⁾
Li Shu-Guang¹⁾²⁾ Hou Lan-Tian²⁾

1) (Laser Institute of Science College, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2) (Measurement Technology and Instrumentation Key Lab of Hebei Province, State Key Lab of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

3) (College of Physics and Chemistry, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 16 December 2011; revised manuscript received 1 April 2012)

Abstract

The dispersion characteristics of photonic crystal fibers are computed using the multipole method. Single-mode fiber with three zero-dispersion wavelengths is obtained by properly designing fiber structure parameters. The dispersion characteristics of photonic crystal fiber with a small air hole in the core are analyzed. Fibers with four zero-dispersion wavelengths are designed. The variation rules of zero-dispersion wavelength with fiber structure parameter are found. The locations and spacings of the zero-dispersion wavelengths can be adjusted flexibly in a large wavelength range. Closing to zero and flattened dispersion can be obtained in the fibers with multiple zero-dispersion wavelengths. The multiple zero-dispersion wavelengths can create a rich phase-matching topology, and enable better controlling the spectral locations of the four-wave-mixing and resonant-radiation bands emitted by solitons and short pulses.

Keywords: photonic crystal fiber, multipole method, zero dispersion wavelength, flattened dispersion

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60637010), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB327604), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60978028), the Natural Science Foundation of Hebei Province (Grant Nos. F2010001313, F2010001291), the Science and Technology Development Program of Qinhuangdao (Grant No. 201001A076).

† E-mail: zxt-81@sohu.com