

文章编号: 1000-7032(2013)04-0494-06

准光子晶体光纤的色散特性

李志全*, 牛力勇, 白春雷, 郝 锐, 张 鑫

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 设计了几种在较宽的通信区域色散平坦的准光子晶体光纤(PQF),借助于全矢量有限元法,分别研究了基于双包层结构的2种准晶格光子晶体光纤的色散特性。数值模拟结果指出:对于PQF₁,通过合理选择结构的参数,在光通信窗口1.45~1.65 μm的范围内准光子晶体光纤的色散数值可以控制在 -2.41 ± 0.28 ps/(km·nm)。小幅度增大孔间距,可在1.350~1.736 μm的较宽波长范围内得到一条近零平坦色散曲线,其色散值|D|可以控制在1 ps/(km·nm)左右,达到 $-0.45 \sim 0.57$ ps/(km·nm)。对于PQF₂,在1.45~1.68 μm的范围内其色散值可以控制在 4.795 ± 0.355 ps/(km·nm)。

关键词: 光纤光学; 平坦色散; 有限元法; 准光子晶体光纤(PQF)

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20133404.0494

Dispersion Property of Photonic Quasicrystal Fibers

LI Zhi-quan*, NIU Li-yong, BAI Chun-lei, HAO Rui, ZHANG Xin

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

* Corresponding Author, E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

Abstract: Several new photonic quasicrystal fibers (PQFs) with ultra-flattened chromatic dispersion at wide range of the telecommunication-window are presented. Based on the full vectorial model, the finite element method is adopted to analyze the dispersion properties of photonic quasicrystal fiber with double-clad structure. According to the numerical simulation results of the PQF₁, the dispersion of the photonic quasicrystal fiber can be controlled within -2.41 ± 0.28 ps/(km·nm) in 1.45~1.65 μm optical communication-window. Afterwards, we get a near-zero flattened dispersion curve by increasing the hole spacing. In a wide wavelength range from 1.350 to 1.736 μm, the region of dispersion variation is from -0.45 to 0.57 ps/(km·nm). For PQF₂, the dispersion value can be controlled within 4.795 ± 0.355 ps/(km·nm) by adjusting the parameters in the wavelength range of 1.45 to 1.68 μm.

Key words: fiber optics; flattened dispersion; finite element method; photonic quasicrystal fibers(PQF)

1 引 言

色散特性是光纤的核心参数之一。在一个光

通信系统中,色散可以引起光信号的畸变展宽,因此色散补偿光纤^[1]和色散平坦光纤的研究得到了迅猛发展。色散平坦光纤除可在波分复用通信

收稿日期: 2012-12-06; 修订日期: 2013-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(61172044); 河北省自然科学基金(F2012203204); 秦皇岛市科学技术研究与发展计划(201101A105)资助项目

作者简介: 李志全(1954-),男,黑龙江哈尔滨人,博士生导师,教授,主要从事集成光学、光纤传感及非线性光电检测方面的研究。

E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

系统以及光孤子的产生和传输中作为理想的传输介质外, 还可在光学参变放大和优化一些非线性器件的性能方面有重要的应用, 如在超连续光源中产生平坦超连续光谱^[2]。

早在1984年, Sheehman等^[3]报道在检测急冷凝固的Al-Mn合金时发现了一种包括五重旋转轴在内的二十面体点群对称的合金相, 揭开了准晶研究的序幕。准晶体或准晶是准周期晶体的简称, 这个名词是由准点阵一词衍生得出的。这种对称性结构的排列是长程有序的, 这一优势已被应用到了光学领域, 并相继出现了不同形式的准光子晶体。目前研究已经发现, 准光子晶体具备一些独特的性质^[4]并有着广泛应用^[5], 相比于普通周期性的光子晶体, 准晶结构的光子晶体主要具有以下特点: 周期性光子晶体既有旋转对称性, 又有平移对称性, 而准晶光子晶体只具有旋转对称性, 却无平移对称性; 准晶是介于周期性结构和非晶结构之间的一种结构, 与周期性结构相比, 从实用的角度来看, 准晶光子晶体格点排列的有序度大幅度降低^[4]。因此, 准晶光子晶体光纤(PQF)也就是介电材料呈准晶结构排列的光子晶体光纤。

研究者们现在一般通过对结构进行掺杂、采用混合纤芯、引入渐变空气孔结构或者用椭圆形孔代替普通的圆孔等方式来设计和优化PCF的色散及其他性能。一直以来, 人们对于PQF色散

方面的研究相对较少。2007年, S. Kim等设计了一种准六重对称性的光子晶体光纤, 通过计算, 发现这种准光子晶体光纤无限单模的截止频率较高, 在波长宽度为190 nm(1 490 ~ 1 680 nm)范围内, 近零超平坦色散值为 $0 \pm 0.05 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。由于光纤结构的孔径比(为0.31)较小, 其中空气孔直径为 $0.75 \mu\text{m}$, 空间距为 $2.41 \mu\text{m}$, 使得空气孔的填充率很低, 因此不能将模场很好地限制在光纤的核心, 导致限制损耗很大^[6]。2009年, S. Kim等设计的双芯结构的色散特性与普通的PCF随孔间距的变化情况正好相反, 得到了较低的负色散($\sim -2 500 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$)^[7]。2009年, 王艳梅等设计了一种较复杂的八重结构准光子晶体光纤, 结构中基于带有良匹配层(APMI)吸收边界的全矢量频域有限差分(FDFD)方法对其色散特性进行了数值分析, 在光通信窗口 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 波段范围内计算得到了两条平坦色散曲线, 一条色散值可以控制在 $3.7 \pm 0.89 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 的范围内, 另外一条控制在 $0.95 \pm 2.26 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 的范围内^[8]。本文针对基于双包层空气孔的PQF, 研究讨论了一般结构的准光子晶体光纤的色散平坦特性。

2 结构模型与理论分析

本文设计的两种准光子晶体光纤基本准晶格结构如图1(a)所示, 相邻晶格间距都相等。所设

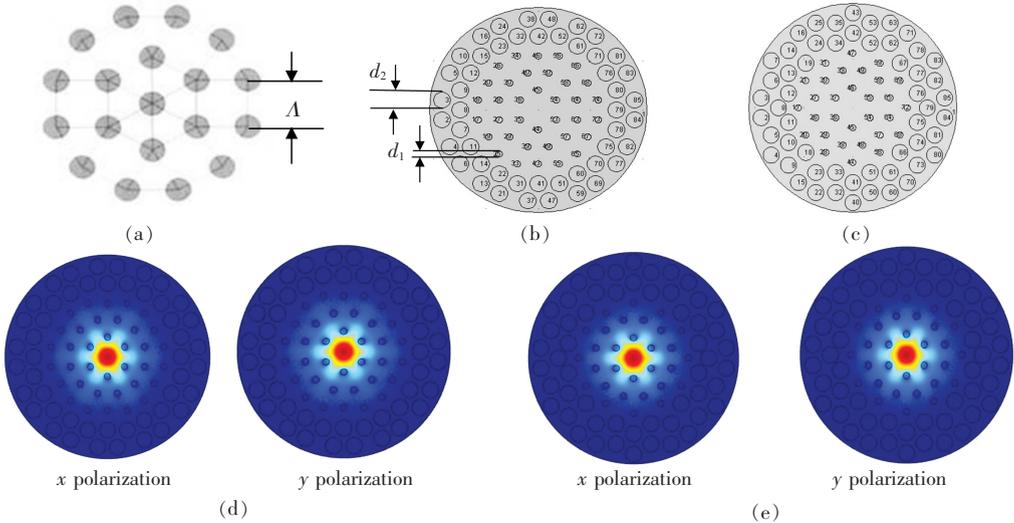


图1 准光子晶体光纤结构及其模场分布。(a)基本结构;(b)第一类结构;(c)第二类结构;(d)第一类结构的模场分布;(e)第二类结构的模场分布。

Fig.1 The structure of two PQFs and mode field distribution. (a) Basic structure. (b) Structure of PQF₁. (c) Structure of PQF₂. (d) Field distribution in PQF₁. (e) Field distribution in PQF₂.

计的准光子晶体光纤结构如图 1(b)、(c)所示,圆形为空气孔,中心孔缺失形成缺陷,构成纤芯;前 3 层为小孔构成内包层,小孔直径为 d_1 ,外包层大孔直径为 d_2 ,孔间距为 Λ 。从图 1(d)、(e)中可以很清楚地看到这两种 PQF 的模场均近似圆形,PQF₁ 和 PQF₂ 的模场都被强烈地限制在光纤的核心。

有限元法分析光波导的模场具有较高的计算精度,可适用于截面为任意不规则形状、材料折射率任意组合的情况,能够对光纤的偏振特性和色散特性进行很好的阐述。因此,有限元模型是研究各种截面光子晶体光纤色散特性和偏振特性的有效方法。文中采用了基于全矢量有限元算法的 COMSOL Multiphysics 4.0 软件中的 RF 模块来对所提出的准光子晶体光纤进行建模仿真,RF 模块可用于一般电磁波领域内求解电磁问题,例如射频和微波、光学和光子学,可以有效地求解光的传播问题,如时谐分析、特征频率/特征模式分析等^[9]。通过有限元法模拟计算可得到各光波模式的场分布和有效折射率 n_{eff} 。

光纤的总色散由材料色散 $D_m(\lambda)$ 和波导色散 $D_w(\lambda)$ 两部分组成,具体的表达式为:

$$D = D_m(\lambda) + D_w(\lambda), \quad (1)$$

由于设计中采用的是纯石英材料,所以对于不同结构的准光子晶体光纤来说,材料色散 $D_m(\lambda)$ 相同,其大小可以用 Sellmeier 公式计算^[10],如式(2)所示:

$$n^2 = 1 + \frac{\sum_i A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2}, \quad (2)$$

通过编写 Matlab 程序对 Sellmeier 公式求二阶导即可计算出材料色散 $D_m(\lambda)$:

$$D_m(\lambda) = \frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2}, \quad (3)$$

通过有限元法模拟计算出基模有效折射率,其中 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 是折射率的实部,然后再通过编写 Matlab 程序计算出光纤的波导色散 $D_w(\lambda)$ ^[9]:

$$D_w(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 |\text{Re}(n_{\text{eff}})|}{\partial \lambda^2}. \quad (4)$$

3 模拟结果与讨论

3.1 对 PQF₁ 色散特性的模拟讨论

首先对图 1(b)的 PQF₁ 结构进行模拟。在确

定孔间距 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$,以及大孔直径为 $d_2/\Lambda = 0.8$ 的情况下,首先详细讨论了色散参数 D 关于小孔直径为 $d_1/\Lambda = 0.31$ 的变化关系。当小孔空气孔 $d_1/\Lambda = 0.3$ 以步长 0.005 增加到 0.315 时,在波长 $1.35 \sim 1.75 \mu\text{m}$ 的范围内,总色散系数 D 随波长 λ 变化的模拟结果如图 2 所示。

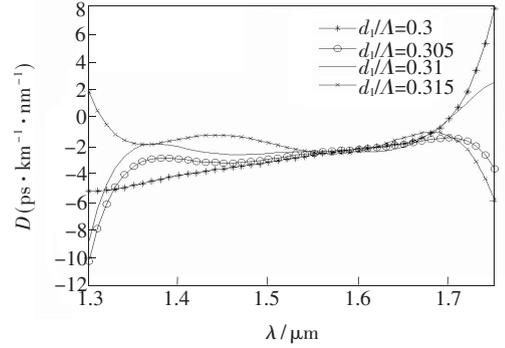


图 2 在 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ 、 $d_2/\Lambda = 0.8$ 条件下,不同 d_1/Λ 值对应的总色散 D 随波长 λ 的变化关系。

Fig. 2 Dispersion parameter of the PQF as a function of wavelength λ with $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ and $d_2/\Lambda = 0.8$ for different d_1/Λ

图 2 所示曲线显示了内层小空气孔 d_1 的大小变化对该光纤的色散特性的影响规律。从图中可以看出,在光通信窗口 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 波段范围内,当内层小空气孔孔径比 d_1/Λ 取值 0.31 时,色散曲线比较平坦;此后,随着 d_1/Λ 的取值在 0.31 附近浮动幅度越大,色散曲线的走势越来越不平坦,且在短波段范围变化较明显。由此可知,内包层的小孔对色散有较显著的影响。

在固定孔间距 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ 和小孔孔径比 $d_1/\Lambda = 0.31$ 的条件下,外包层大空气孔孔径比 d_2/Λ 的变化对于色散系数的影响规律如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,当 $d_2/\Lambda = 0.805$ 和 $d_2/\Lambda = 0.81$ 时,即随着孔径比的增大,色散曲线显然要比 $d_2/\Lambda = 0.8$ 时上下波动范围更大,更加不平坦。当 $d_2/\Lambda = 0.795$ 时,平坦范围较窄,在整个通信波段 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 的末段不够平坦。该组色散曲线表明:外层空气孔 d_2 的大小变化对色散的影响与内层孔 d_1 相比较不明显,由于模场主要集中在内层传输,故本文对于 d_2 的影响不做过多的考虑。

图 4 中当孔径比分别取 $d_1/\Lambda = 0.31$ 和 $d_2/\Lambda = 0.8$,且孔间距取 $2 \mu\text{m}$ 时,在 1550 nm 附近得到了一条色散平坦曲线,在光通信窗口 $1.45 \sim 1.65$

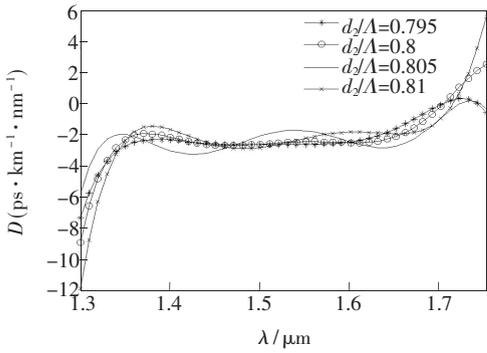


图3 在 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ 、 $d_1/\Lambda = 0.31$ 条件下, 不同的 d_2/Λ 对应的总色散 D 随波长 λ 的变化关系。

Fig. 3 Dispersion parameter of the PQF as a function of wavelength λ with $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ and $d_1/\Lambda = 0.31$ for different d_2/Λ

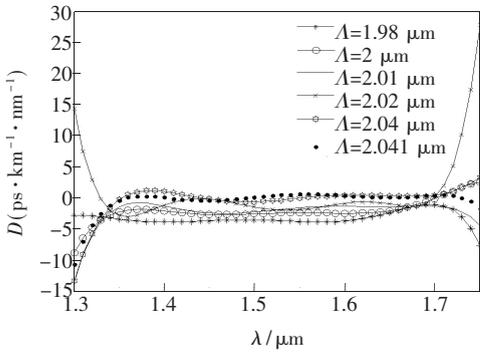


图4 在 $d_1/\Lambda = 0.31$ 、 $d_2/\Lambda = 0.8$ 条件下, 不同 Λ 值对应的总色散 D 随波长 λ 的变化关系。

Fig. 4 Dispersion parameter of the PQF as a function of wavelength λ with $d_1/\Lambda = 0.31$ and $d_2/\Lambda = 0.8$ for different Λ

μm 的范围内其色散值可以控制在 $-2.41 \pm 0.28 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。当孔径比分别取 $d_1/\Lambda = 0.31$ 和 $d_2/\Lambda = 0.8$, 且孔间距取 $2.041 \mu\text{m}$ 时, 可以在 $1.350 \sim 1.736 \mu\text{m}$ 的较宽波长范围内得到一条近零平坦色散, 其色散浮动值 $|D|$ 可以控制在 $1 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 左右, 达到 $-0.45 \sim 0.57 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$, 如图4所示。在固定大小孔径比的前提下, 色散曲线随着孔间距 Λ 的增大而向上移动, 孔间距值越大, 色散值越大, 即孔间距对于色散曲线位置的变化影响比较明显, 但对色散的平坦性质影响不大, 因此可以较容易地得到色散平坦曲线。当固定 PQF₁ 结构的部分参数, 其中孔径比分别取 $d_1/\Lambda = 0.31$ 、 $d_2/\Lambda = 0.8$, 孔间距为 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, 增加其包层空气孔层数为8层时, 其在 $1.405 \sim 1.685 \mu\text{m}$ 的宽波长范围内的色散平坦值维持在 $-2.4 \pm 0.37 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。由于空气孔层数的

增加, 限制损耗急剧减小, 接近于零, 几乎可以忽略不计。

3.2 对 PQF₂ 色散平坦特性的模拟讨论

PQF₂ 也是基于准晶格排布的光子晶体光纤结构, 但它不同于图1(b)中 PQF₁ 的排布情况, PQF₂ 的具体结构如图1(c)所示。这里同样基于有限元法和 Matlab 程序对该结构的色散性质进行了数值模拟, 所得结果如图5所示。

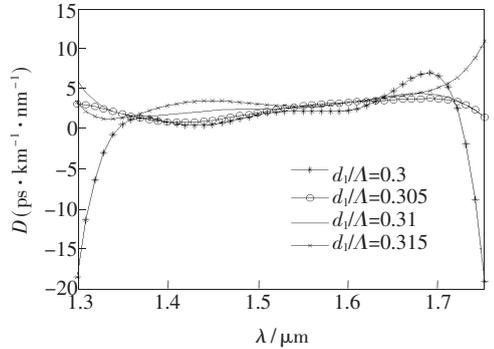


图5 在 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ 、 $d_2/\Lambda = 0.8$ 条件下, 不同值 d_1/Λ 对应的总色散 D 随波长 λ 的变化关系。

Fig. 5 Dispersion parameter of the PQF as a function of wavelength λ with $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ and $d_2/\Lambda = 0.8$ for different d_1/Λ

从图5可以看出, 随着孔径比 d_1/Λ 的增加, 色散值在短波长处反而越来越小且浮动范围较大, 在长波长处色散值浮动范围较小。因为其在整个通信波段较为平坦, 于是在研究其他参量对光纤色散特性的影响时, 这里我们暂取 $d_1/\Lambda = 0.31$ 。

其次, 从图6中大孔对总色散值的影响情况

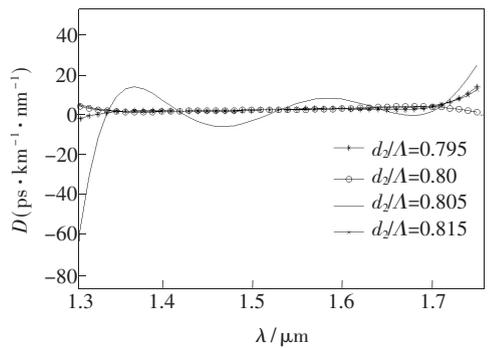


图6 在 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ 、 $d_1/\Lambda = 0.31$ 条件下, 不同 d_2/Λ 值对应的总色散 D 随波长 λ 的变化关系。

Fig. 6 Dispersion parameter of the PQF as a function of wavelength λ with $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ and $d_1/\Lambda = 0.31$ for different d_2/Λ

可以看出,当 $d_2/\Lambda = 0.805$ 时,其对色散影响较大,造成色散浮动很大较不平坦;当 $d_2/\Lambda = 0.795, 0.8, 0.815$ 时,对色散值曲线平坦程度影响不明显。所以我们暂时保留取这 3 个值的可能,并根据另一个参量即孔间距 Λ 的取值情况来讨论 d_2/Λ 和 Λ 同时对色散平坦程度的影响。经过反复调整比值 d_2/Λ ,最终可以得出当 $d_2/\Lambda = 0.8$ 时色散曲线平坦度相对比较理想。因此,我们固定大小孔径比分别为 $d_1/\Lambda = 0.31$ 和 $d_2/\Lambda = 0.8$,孔间距 Λ 分别取为 $2.03, 2.04, 2.05, 2.06 \mu\text{m}$ 时的色散曲线如图 7 所示。可以看出,随着 Λ 的增大,色散值曲线向上移动,且距离 $\Lambda = 2.04 \mu\text{m}$ 越远则曲线越不平坦。因此,对于图 1(c) 结构的 PQF₂,当大小孔径比取 $d_1/\Lambda = 0.31$ 、 $d_2/\Lambda = 0.8$,孔间距取 $2.04 \mu\text{m}$ 时, $1.45 \sim 1.68 \mu\text{m}$ 波长范围内的色散值可以控制在 $4.795 \pm 0.355 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。

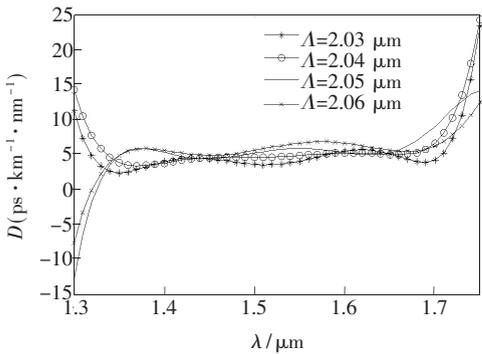


图 7 在 $d_1/\Lambda = 0.31$ 、 $d_2/\Lambda = 0.8$ 条件下,不同 Λ 值对应的总色散 D 随波长 λ 的变化关系。

Fig. 7 Dispersion parameter of the PQF as a function of wavelength λ with $d_1/\Lambda = 0.31$ and $d_2/\Lambda = 0.8$ for different Λ

由此可知,同样地调整不同的结构参数,可以很方便地设计出具有正平坦色散、近零平坦色散、负平坦色散等不同性质的准晶格光子晶体光纤结构。由于本文提出的 PQF 是基于单一基质的石英材料,所以在基质材料不变的情况下,其材料色散保持不变,波导色散随着光纤几何结构参数的

变化而改变。因此,在对色散的设计上,只需调整 PQF 的波导色散。通过调节各结构参数,使得 PQF 的波导色散与材料色散在很宽的波段范围内相互抵消,就可以实现宽带的色散平坦的设计要求。准光子晶体光纤由于其独特的结构,表现出不同于传统光纤和 PCF 的色散性质,具有良好的可控色散特性,在产生超连续谱等方面将有很好的应用。

本文对于这种准晶格双包层结构光子晶体光纤的研究,尽量从简化其结构的角度出发,以求制造简单从而增加其实用性。在准晶体构成的一般结构中和改进光纤的色散平坦特性方面得到了有意义的结果。如果保持其他参数不变,只增加它的空气孔层数,这对色散平坦特性的影响不大,但可以使损耗降得非常低甚至接近于零,即可以得到宽波长低损耗色散平坦曲线,只是结构变得相对复杂。通过上述分析和仿真,可以证明所得到的几种结构简单的 PQF 具有明显的优越性,它们不仅在结构上更加灵活简单,并且显然比文献 [8] 中的结构更趋于平坦,色散值更小;而对于同样水平的色散平坦曲线的取得,准光子晶体光纤要比普通的 PCF 结构^[11-16]更简单,更易于实现。

4 结 论

本文提出的结构不同于传统的光子晶体光纤和普通的 n 重准晶体光纤,而是从 PQF 的包层基模理论出发,基于准晶体结构的一般特点灵活设计其结构,并研究了空气孔各参数对准光子晶体光纤色散性能的影响。结果显示:可在较简单的结构基础上,得到较理想的色散平坦曲线。所设计的在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近具有宽带平坦正、零和负色散平坦的 PQF,对进一步关于准晶格结构的理论设计和色散研究以及实现色散平坦化有一定意义。这项工作不仅将有利于研究光通信波段的光脉冲在具有平坦色散的 PQF 中的传输,还将对新型光电子器件的研制和全光纤通信网络的实现及优化产生影响。

参 考 文 献:

- [1] Hou S L, Han J W, Zhu P, *et al.* A novel design of a dual-core photonic crystal fiber for broadband dispersion compensation with low nonlinearity [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(3):449-453 (in Chinese).
- [2] Chen Y Z, Li Y Z, Xu W C. Research on flat ultra-wideband supercontinuum generated in dispersion-flattened decreasing

- fiber [J]. *Acta Phys. Sinica* (物理学报), 2008, 51(12):7693-7698 (in Chinese).
- [3] Shechtman D, Blech I, Gratias D, *et al.* Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, 53(20):1951-1953.
- [4] Yin J L, Huang X G, Liu S H, *et al.* Properties applications of photonic quasicrystals [J]. *Laser & Optoelectronics Progress* (激光与光电子学进展), 2010, 47(1):011601-1-5 (in Chinese).
- [5] Wang Y Q, Guan G H. The transmission properties of quasiperiodic photonic crystals [J]. *J. CUN (Natural Sciences Edition)*, (中央民族大学学报:自然科学版), 2007, 16(2):108-113 (in Chinese).
- [6] Kim S, Kee C. S., Lee J. Novel optical properties of six-fold symmetric photonic quasicrystal fibers [J]. *Opt. Exp.*, 2007, 15(20):13221-13226.
- [7] Kim S, Kee C. S. Dispersion properties of dual-core photonic-quasicrystal fiber [J]. *Opt. Exp.*, 2009, 17(18):15885-15890.
- [8] Wang Y M, Xue W R, Zhang W M. Dispersion properties of modified octagon photonic quasicrystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2009, 29(6):1644-1648 (in Chinese).
- [9] Zhang S H, Yao J Q, Lu Y, *et al.* High Nonlinear photonic crystal fibers with ultra-flattened chromatic dispersion and low confinement loss [J]. *Laser & Optoelectronics Progress* (激光与光电子学进展), 2011, 48(12):120605-1-5 (in Chinese).
- [10] Li W, Chen H, Chen M. High symmetry of the mode field distribution photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2012, 39(2):0205002-1-5 (in Chinese).
- [11] Wang D, Zheng Y. Numerical simulation and analysis of double cladding photonic crystal fiber with flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2011, 31(8):0806010-1-5 (in Chinese).
- [12] Li S G, Liu X D, Hou L T. Numerical simulation and analysis on photonic crystal fibers with closing to zero and flattened chromatic dispersion [J]. *Chin. J. Lasers.* (中国激光), 2004, 31(6):713-717 (in Chinese).
- [13] Hou S L, Han J W, Qiang Z J, *et al.* The dispersive and nonlinear properties of photonic crystal fibers with modified honeycomb lattice structure [J]. *Chin J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(2):179-183 (in Chinese).
- [14] Cui Y L, Hou L T. Dispersion characteristic of a new hybrid cladding photonic crystal fiber [J]. *Acta Phys. Sinica* (物理学报), 2010, 59(4):2571-2576 (in Chinese).
- [15] Wang W, Hou L T, Song J J, *et al.* Design of double cladding dispersion flattened photonic crystal fiber with deformation in sensitive outer cladding air-holes [J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282(17):3468-3472.
- [16] Wang J Y, Jiang C, Hu W S, *et al.* Modified design of photonic crystal fibers with flattened dispersion [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2006, 38(3):169-172.