

doi: 10.3788/gzxb20174607.0706005

# 全固双层芯色散补偿光子晶体光纤的研究与设计

屈玉玮<sup>1,2</sup>, 张春兰<sup>1,2</sup>, 郭长江<sup>1,2</sup>, 张森<sup>1</sup>, 韩颖<sup>1,2</sup>, 赵兴涛<sup>1,2</sup>, 侯蓝田<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1,2</sup>

(1 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

(2 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 为了补偿光纤色散对高速信号传输的限制, 提出一种全固双层芯色散补偿光子晶体光纤. 首先对该光纤模式耦合特性进行理论分析, 然后利用多极法进行模拟计算, 得到该光纤包层结构参数与色散值以及相位匹配波长之间的关系, 并对其规律进行研究. 通过优化光纤结构参数, 得到在 1 550 nm 处, 色散值达到  $-32\ 620\ \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 、损耗为 0.29 dB/km、与标准单模光纤的熔接损耗为 4.77 dB 的色散补偿光纤. 该光纤可补偿 1 910 多倍长度的 SMF-28 单模光纤的色散, 补偿能力远大于常规色散补偿光纤. 与空气孔-石英结构色散补偿光子晶体光纤相比, 全固色散补偿光子晶体光纤具有易制备、易与传统通信光纤熔接等优点.

**关键词:** 光纤光学; 光子晶体光纤; 多极法; 全固双层芯; 色散补偿; 模式耦合

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)07-0706005-6

## Research and Design of All-solid Dual-concentric-core Photonic Crystal Fiber for Dispersion Compensation

QU Yu-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Chun-lan<sup>1,2</sup>, GUO Chang-jiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Sen<sup>1</sup>, HAN Ying<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Xing-tao<sup>1,2</sup>, HOU Lan-tian<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>

(1 School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

(2 The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract:** In order to compensate the transmission limits of the high-speed signal caused by dispersion of the fiber, an all-solid dual-concentric-core photonic crystal fiber for dispersion compensation was proposed. Firstly, the mode coupling characteristics of the fiber was theoretically analyzed, and then multipole method was used to calculate the relationship between the parameters of the fiber and the dispersion value as well as the shift of phase matching wavelength, and the regularity was studied. Finally a dispersion compensating fiber with dispersion value of  $-32\ 620\ \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  at 1 550 nm was achieved by optimizing the structural parameters of fiber, and numerical results also show that the loss is 0.29 dB/km and the splicing loss with SMF-28 fiber is 4.77 dB at 1 550 nm. The fiber can compensate 1 910 times the length of the SMF-28 single-mode fiber dispersion, its compensation ability is much larger than the conventional dispersion compensation fiber. The all-solid dispersion compensating photonic crystal fiber has the advantages of easy to fabricate and easy to splice with the traditional communication fiber compared with air-silica photonic crystal fiber.

**Key words:** Fiber optics; Photonic crystal fiber; Multipole method; All-solid dual-concentric-core; Dispersion compensation; Mode coupling

**OCIS Codes:** 060. 5295; 060. 2270; 060. 2330; 060. 2280; 060. 4510

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61405173, 61405172)资助

第一作者: 屈玉玮(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光子晶体光纤设计及非线性特性. Email: laigen007@163.com

导师: 王伟(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光子晶体光纤设计及非线性特性. Email: wangwei@ysu.edu.cn

收稿日期: 2017-02-20; 录用日期: 2017-04-25

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

色散是现代光纤通信系统,特别是高速率长距离光纤通信系统的主要限制,如何克服该类系统的色散成为当前光纤通信领域的一个研究热点.随着对光子晶体光纤的理论研究和制备技术的不断了解<sup>[1-2]</sup>,人们发现通过调整光纤微结构设计,可以极大地调节光纤的色散特性,如光纤的色散平坦特性、色散补偿特性等<sup>[3-5]</sup>.

近年来关于空气孔-石英结构的色散补偿光子晶体光纤已经有很多研究.2008年,Xingtao Zhao等<sup>[6]</sup>设计了一种双层芯色散补偿光子晶体光纤,该光纤在1550nm处,负色散值达-23000ps/(nm·km);2011年,Jinhui Yuan等<sup>[7]</sup>设计了一种双层芯色散补偿光子晶体光纤,该光纤在1550nm处,负色散值为-39500ps/(nm·km),模式面积28.3μm<sup>2</sup>;2011年,张立超等<sup>[8]</sup>设计了一种八边形色散补偿光子晶体光纤,该光纤在1550nm处,负色散值为-1434.9ps/(nm·km);2012年,Ying Liu等<sup>[9]</sup>设计了一种具有混合导光机制模式耦合的色散补偿光子晶体光纤,该光纤具有多个大负色散波长,能够同时补偿多个波长下的色散累积;2013年,Gautam Prabhakar等<sup>[10]</sup>设计了一种内芯高掺杂的双层芯色散补偿光子晶体光纤,该光纤在1550nm处,负色散值达-4200ps/(nm·km),模式面积为67μm<sup>2</sup>;2015年,Jui-Ming Hsu等<sup>[11]</sup>设计了一种内芯高掺杂的双层芯色散补偿光子晶体光纤,该光纤在1550nm处,负色散值达-51626ps/(nm·km).

然而,这些光纤在制备过程中空气孔易形变,使实际制备的光纤与设计结构不符,从而影响最终的色散补偿效果,同时由于光纤含有空气孔,不易与传统光纤熔接,限制了工程上的实际需求.全固光子晶体光纤由不同折射率的介质柱代替空气孔构成,由于固体材料的多样性,理论上通过合理掺杂,能在很大范围内获得所需的折射率值<sup>[12-13]</sup>.全固结构光子晶体光纤不含任何空气孔,在制备过程中避免了由于空气孔塌陷、熔死带来的问题,同时具有易与传统光纤熔接等优点,但有关全固色散补偿光子晶体光纤还未见相关研究.

因此,本文利用多极法对全固色散补偿光子晶体光纤进行研究,提出一种双层芯结构,在获得较高补偿的同时,具有易与传统光纤熔接、易制备等优点.

## 1 基本理论

多极法的理论最早由Rayleigh在1892年提出,T. P. White等将它引入到光子晶体光纤的色散特性及损耗特性的计算中<sup>[14-15]</sup>.这种方法适合于计算包层含圆形介质柱的光子晶体光纤,可以计算出模式有效折射率的实部和虚部,利用模式有效折射率实部可以得到光子晶体光纤的色散.

此方法的主要思想是将每一个微结构或者柱都当成是散射源,在它们的附近把电磁场表示出来.应用麦克斯韦约束条件将这些独立的场表达出来,形成了一个方程组.利用柱型贝塞尔函数(Bessel)就可以求解出在极坐标系下第 $l$ 个介质柱内部纵向电场展开式,即

$$\mathbf{E}_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \mathbf{A}_{ml} J_m(\mathbf{k}_{\perp}^i) e^{im\varphi_l} e^{i\beta z} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{k}_{\perp}^i = (k_0^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}$ 为第 $l$ 个光波的纵向波矢分量, $\beta$ 为传播常数, $n_i$ 为介质柱的折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间的波数, $\lambda$ 为光纤中传输光的波长; $r_l$ 和 $\varphi_l$ 为以介质柱中心 $l$ 为圆心,附近基座上点的极坐标值; $\mathbf{A}_{ml}$ 为系数矩阵; $z$ 为沿介质柱的纵向距离.在此圆柱周围,电场的纵向分量可用以圆柱 $l$ 为中心的局部极坐标展开,即

$$\mathbf{E}_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [\mathbf{B}_{ml} J_m(\mathbf{k}_{\perp}^e r_l) + \mathbf{C}_{ml} H_m^{(l)}(\mathbf{k}_{\perp}^e r_l)] e^{im\varphi_l} e^{i\beta z} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{k}_{\perp}^e = (k_0^2 n_c^2 - \beta^2)^{1/2}$ 为第 $l$ 个介质柱近邻的介质中光波长的纵向波矢分量, $n_c$ 为基底折射率; $\mathbf{B}_{ml}$ 和 $\mathbf{C}_{ml}$ 为系数矩阵.

在介质柱的边界面上,利用电磁场的边界条件,可得关于 $\mathbf{A}_{ml}$ 、 $\mathbf{B}_{ml}$ 和 $\mathbf{C}_{ml}$ 的表达式,再通过寻找系统矩阵行列式的零点来确定 $\beta$ ,进一步可得光子晶体光纤的模式有效折射率为 $n_{\text{eff}} = \beta/k$ ,其中 $k$ 为真空中的波矢.这样,光纤基模的波导色散可以表示为

$$D_w = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}[n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2} \quad (3)$$

式中,  $c$  为真空中的光速,  $\text{Re}[n_{\text{eff}}]$  为基模有效折射率的实部.

光纤的总色散  $D(\lambda)$  由材料色散  $D_m(\lambda)$  和波导色散  $D_w(\lambda)$  两部分组成, 即

$$D(\lambda) = D_w(\lambda) + D_m(\lambda) \quad (4)$$

有效模场面积可以表示为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left( \iint_S |\mathbf{E}|^2 dx dy \right)^2}{\iint_S |\mathbf{E}|^4 dx dy} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{E}$  是电场矢量,  $S$  代表光纤模场面积. 再由  $A_{\text{eff}} = \pi\omega^2$  就可计算出光子晶体光纤的有效模场半径  $\omega$ . 其与标准单模光纤间的耦合损耗可以表示为

$$\alpha_{\text{splice}} = -20 \log \left( \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right) \quad (6)$$

式中,  $\omega_1$  表示标准单模光纤的模场半径,  $\omega_2$  表示光子晶体光纤的有效模场半径.

色散补偿技术结合两种具有不同特性的光纤, 这两种光纤色散的符号相反, 而每种光纤的色散又足够大, 以至于四波混频效应可以忽略. 二者结合使用可使平均色散降到很小的值, 若平均色散为零, 则色散可完全得到补偿<sup>[16]</sup>.

## 2 结构设计和数值分析

### 2.1 光纤结构和模式分析

设计的全固双层芯色散补偿光子晶体光纤端面结构及其等效折射率剖面图如图 1. 从图 1 可以看出, 其端面微结构包含三种不同尺寸、不同折射率的介质柱. 其中内层芯中心介质柱折射率为  $n_1$ , 半径为  $r_1$ ; 第四层介质柱折射率为  $n_2$ , 半径为  $r_2$ , 由第四层介质柱构成的环形区域为外层芯; 其余包层介质柱折射率为  $n_3$ , 半径为  $r_3$ ; 柱间距均为  $\Lambda$ , 基底材料折射率为  $n_0 = 1.45$ . 初始参数分别为  $n_1 = 1.462$ ,  $n_2 = 1.39$ ,  $n_3 = 1.32$ ,  $r_1 = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $r_2 = 0.255 \mu\text{m}$ ,  $r_3 = 0.7 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$ .

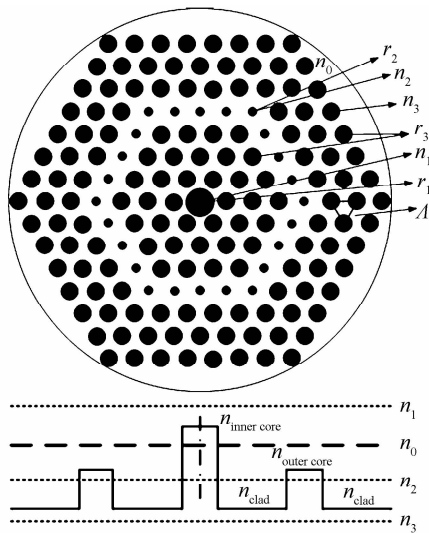


图 1 全固双层芯色散补偿光子晶体光纤端面结构及其等效折射率剖面图  
Fig. 1 Cross-section and equivalent refractive index profile of all solid dual-concentric-core photonic crystal fiber

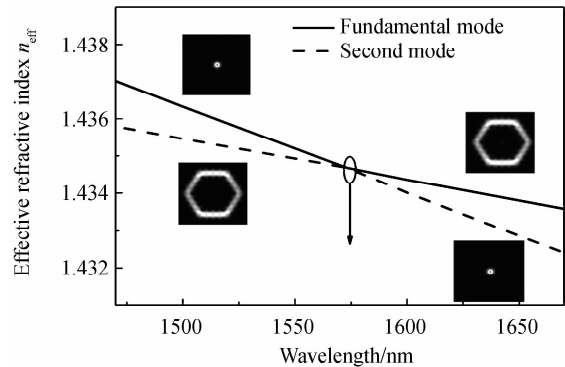


图 2 基模和二阶模的有效折射率随波长的变换关系以及不同波长下两类模式的模场分布  
Fig. 2 Relationship between effective refractive index of the fundamental mode and the second mode and wavelength, and the mode field distribution of two kinds of modes at different wavelengths

图 2 表示的是在初始参数下基模和二阶模的有效折射率随波长的变换关系以及不同波长下两类模式的模场分布. 由图 2 可以看出在某一波长处, 基模折射率产生突变, 该波长就称为相位匹配波长  $\lambda_p$ . 当波长小于相位匹配波长时, 在内层芯中传播的模式为基模, 在外层芯中传播的模式为高阶模, 此时内层芯基模有效折

射率大于外层芯高阶模有效折射率;当波长大于相位匹配波长时,在外层芯中传播的模式为基模,在内层芯中传播的模式为高阶模,即内层芯基模能量扩散到外层芯,并在外层芯中得到有效传播,而外层芯高阶模能量扩散到内层芯,并在内层芯中得到有效传播,此时外层芯基模有效折射率大于内层芯高阶模有效折射率.由于在相位匹配波长处,内层芯基模有效折射率等于外层芯高阶模有效折射率,内层芯和外层芯的模式之间发生耦合,即两种模式的传输特性发生了交换,导致在 $\lambda = \lambda_p$ 处对应的色散发生突变,产生大负色散值,如图3.

### 2.2 数值分析

为了在1550 nm处得到大的负色散值,在初始参数的结果之下,利用控制变量法,逐一改变包层结构参数,对相位匹配波长位置变化以及色散变化进行分析,如图4~7.

由图4可以看出,当其余参数固定,随着孔间距 $\Lambda$ 的增大,相位匹配波长发生红移,即向长波方向移动,色散的绝对值逐渐减小.由于 $\Lambda$ 的增大,相当于内层芯的等效折射率增大幅度小于外层芯的等效折射率增大幅度,使相位匹配波长向长波移动,造成耦合过程趋于缓慢,色散的绝对值逐渐减小.

由图5可以看出,当其余参数固定,随着内层芯中心介质柱折射率 $n_1$ 的增大或内层芯中心介质柱半径 $r_1$ 的增大,相位匹配波长发生红移,即向长波方向移动,色散的绝对值逐渐减小.由于 $n_1$ 的增大或 $r_1$ 的增大,均相当于内层芯的等效折射率增大,相位匹配波长向长波移动,造成耦合过程趋于缓慢,色散的绝对值逐渐减小.

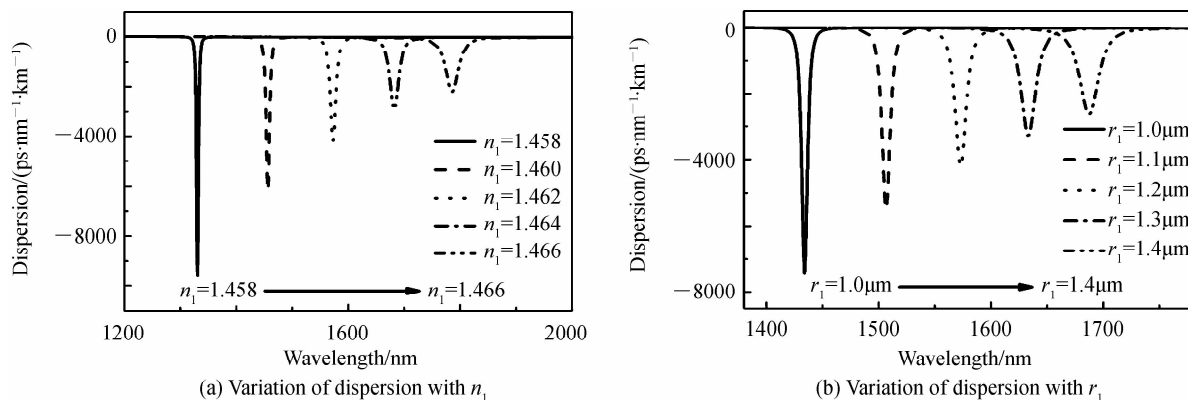


图5 色散值随 $n_1$ 及 $r_1$ 的变化  
Fig. 5 Variation of dispersion with  $n_1$  and  $r_1$

由图6可以看出,当其余参数固定,随着第四层介质柱折射率 $n_2$ 的减小或第四层介质柱半径 $r_2$ 的增大,相位匹配波长发生红移,即向长波方向移动,色散的绝对值逐渐减小.由于 $n_2$ 的减小或 $r_2$ 的增大,均相当于外层芯的等效折射率减小,相位匹配波长向长波移动,造成耦合过程趋于缓慢,色散的绝对值逐渐减小.

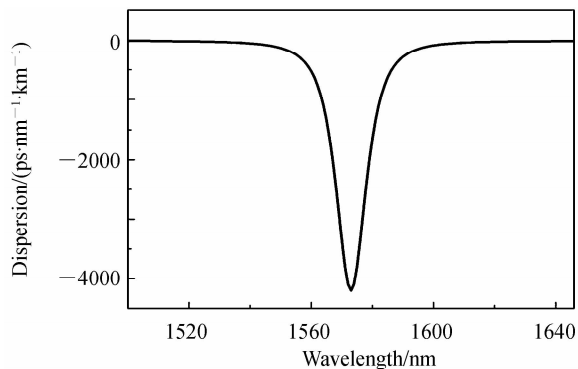


图3 色散值随波长的变化  
Fig. 3 Variation of dispersion with wavelength

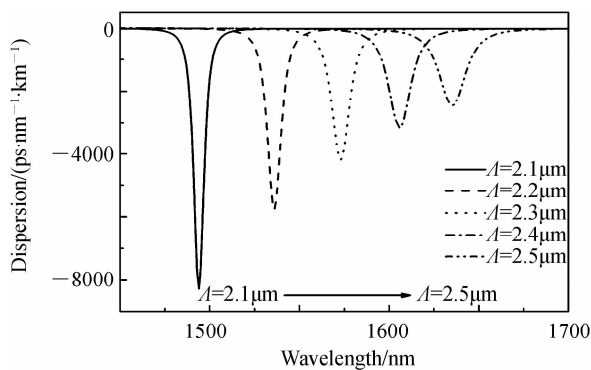


图4 色散值随 $\Lambda$ 的变化  
Fig. 4 Variation of dispersion with  $\Lambda$

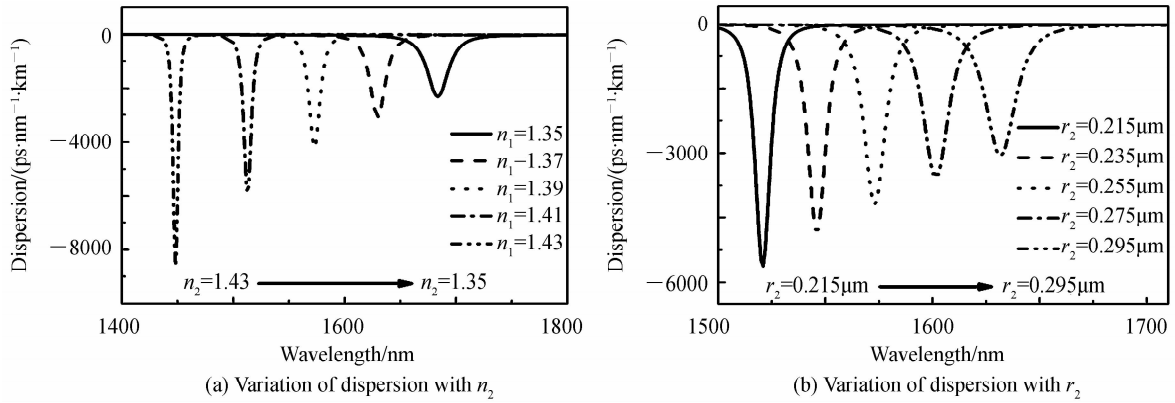


图6 色散值随  $n_2$  及  $r_2$  的变化

Fig. 6 Variation of dispersion with  $n_2$  and  $r_2$

由图7可以看出,当其余参数固定,随着包层介质柱折射率  $n_3$  的增大或包层介质柱半径  $r_3$  的减小,相位匹配波长发生红移,即向长波方向移动,色散的绝对值逐渐减小. 由于  $n_3$  的增大或  $r_3$  的减小,均相当于内层芯和外层芯的等效折射率增大,但内层芯的等效折射率增大幅度小于外层芯的等效折射率增大幅度,最终结果为相位匹配波长向长波移动,造成耦合过程趋于缓慢,色散的绝对值逐渐减小.

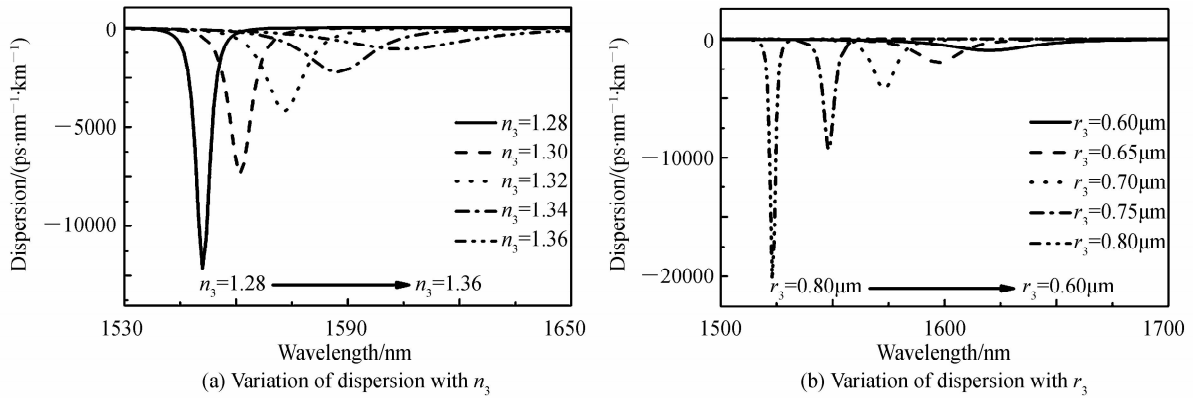


图7 色散值随  $n_3$  及  $r_3$  的变化

Fig. 7 Variation of dispersion with  $n_3$  and  $r_3$

### 2.3 参数优化

由图4~7可以看出,当相位匹配波长发生红移时,色散的绝对值逐渐减小. 在此基础上对包层结构各参数进行优化计算,设计出一根参数为  $n_1 = 1.463, n_2 = 1.39, n_3 = 1.32, r_1 = 1.2 \mu\text{m}, r_2 = 0.255 \mu\text{m}, r_3 = 0.85 \mu\text{m}, \Lambda = 2.3 \mu\text{m}$  的全固双层芯色散补偿光子晶体光纤,该光纤色散值和损耗随波长的变化关系分别如图8和图9.

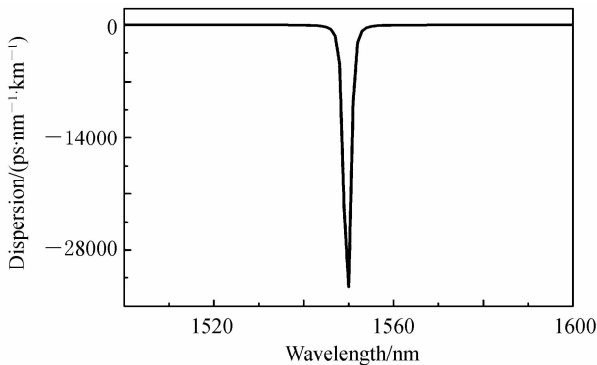


图8 参数优化后光纤色散值随波长的变化  
Fig. 8 Variation of fiber dispersion with wavelength

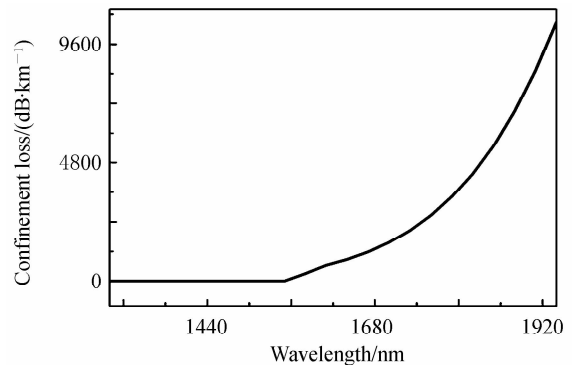


图9 参数优化后光纤损耗随波长的变化  
Fig. 9 Variation of fiber loss with wavelength

该光纤在 1 550 nm 处大负色散值达  $-32\ 620\ \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ , 损耗仅为 0.29 dB/km, 模式面积为  $A_{\text{eff}} = 6.46\ \mu\text{m}^2$ , 与标准单模光纤的熔接损耗  $\alpha_{\text{splice}} \approx 4.77\ \text{dB}$ . SMF-28 单模光纤在 1 550 nm 处色散值为  $17\ \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ , 根据色散补偿技术, 可补偿 1 910 多倍长度的 SMF-28 单模光纤的色散.

### 3 结论

本文提出一种全固双层芯结构的色散补偿光子晶体光纤. 首先对其模式特性进行理论分析, 然后利用多极法对其色散补偿特性进行数值模拟, 通过逐一改变包层结构各参数可看出, 随着相位匹配波长的红移, 色散的绝对值逐渐减小. 优化参数后设计出参数为  $n_1 = 1.463, n_2 = 1.39, n_3 = 1.32, r_1 = 1.2\ \mu\text{m}, r_2 = 0.255\ \mu\text{m}, r_3 = 0.85\ \mu\text{m}, \Lambda = 2.3\ \mu\text{m}$  的全固双层芯结构的色散补偿光子晶体光纤. 该光纤在 1 550 nm 处, 色散值达  $-32\ 620\ \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ , 损耗仅为 0.29 dB/km, 模式面积为  $A_{\text{eff}} = 6.46\ \mu\text{m}^2$ , 与标准单模光纤的熔接损耗  $\alpha_{\text{splice}} \approx 4.77\ \text{dB}$ , 可补偿 1 910 多倍长度的 SMF-28 单模光纤的色散. 该光纤具有易与传统通信光纤熔接、易制备等优点, 可用于未来高速率、长距离的光纤通信系统中.

由于在现有工艺基础上, 掺杂材料折射率棒的制备可以得到精准控制, 本课题组下一步拟采用堆积-拉制法, 利用预制棒制备模具制备原始预制棒, 再利用掺杂材料折射率棒直接填充到空气孔中; 或者利用掺杂材料折射率棒外套玻璃管之后, 直接制备预制棒, 然后精密控制拉制过程中的温度、送棒速度、牵引速度等关键参数来制备所设计光纤.

### 参考文献

- [1] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P S J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(19): 1547-1549.
- [2] BIRKS T A, KNIGHT J C, RUSSELL P S J. Endless single-mode photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(13): 961-963.
- [3] WANG Dan, ZHENG Yi. Numerical simulation and analysis of double cladding photonic crystal fiber with flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806010.  
王丹, 郑义. 双包层色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806010.
- [4] SHEN L P, HUANG W P, CHEN G X, *et al.* Design and optimization of photonic crystal fibre for broad-band dispersion compensation[J]. *Photonic Technology Letters*, 2003, **15**(4): 540-542.
- [5] GEROME F, AUGUSTE J L, BLONDY J M. Design of dispersion-compensating fibres based on a dual-concentric-core photonic crystal fibre[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(23): 2725-2727.
- [6] ZHAO Xing-tao, ZHOU Gui-yao, LI Shu-guang, *et al.* Photonic crystal fibre for dispersion compensation[J]. *Applied Optics*, 2008, **48**(28): 5190-5195.
- [7] YUAN Jin-hui, SANG Xin-zhu, YU Chong-xiu, *et al.* Large negative dispersion in dual-concentric-core photonic crystal fiber with hybrid cladding structure based on complete leaky mode coupling[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**: 5847-5852.
- [8] ZHANG Li-chao, HOU Lan-tian, ZHOU Gui-yao. Study on dispersion compensation property of octagonal photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(5): 054217.  
张立超, 侯蓝田, 周桂耀. 八边形光子晶体光纤色散补偿特性分析[J]. *物理学报*, 2011, **60**(5): 054217.
- [9] LIU Ying, WANG Jing-yuan, LI Yu-quan, *et al.* A novel hybrid photonic crystal dispersion compensating fibre with multiple windows[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**: 2072-2079.
- [10] GAUTAM P, AKSHIT P, VIPUL R, *et al.* Large-effective-area dispersion-compensating fiber design based on dual-core microstructure[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(19): 4505-4509.
- [11] HSU Jui-ming, ZHENG Wen-hao, LEE Cheng-ling, *et al.* Theoretical investigation of a dispersion compensating photonic crystal fibre with ultra-high dispersion coefficient and extremely low confinement loss[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2015, **16**: 1-8.
- [12] BARTLOMIEJ S, MARIUSZ K, RYSZARD S, *et al.* Super-continuum generation enhancement in all-solid all-normal dispersion soft glass photonic crystal fiber pumped at 1550 nm[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, **25**: 64-71.
- [13] LIU Zhao-lun, DU Hai-li, WANG Ming. All-solid three-core photonic crystal fiber polarization splitter[J] *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(10): 1023002.  
刘兆伦, 杜海丽, 汪明. 全固三芯光子晶体光纤偏振分束器[J] *光子学报*, 2016, **45**(10): 1023002.
- [14] WHITE T P, KUHLMEY B T, MCPHEDRAN R C, *et al.* Multipole method for microstructured optical fibers. I. formulation[J]. *Journal of Optical Society of America B*, 2002, **19**(10): 2322-2330.
- [15] BORIS T K, THOMAS P W, GILLES R, *et al.* Multipole method for microstructured optical fibers. II. implementation and results[J]. *Journal of Optical Society of America B*, 2002, **19**(10): 2331-2340.
- [16] GOVIND A. *Nonlinear fiber optics*[M]. Elsevier, 2007.