

## 近零平坦色散三包层光子晶体光纤的设计

宋昭远, 黄金华, 张磊磊

(辽宁石油化工大学 理学院, 辽宁 抚顺 113001)

**摘要:** 为了使光子晶体光纤(PCF)在钛宝石飞秒激光器的工作波长  $0.80\ \mu\text{m}$  和光通信窗口  $1.55\ \mu\text{m}$  处获得宽的近零超平坦色散, 使用了三包层六角空气孔环结构设计来代替普通的单包层结构。应用了改进的有效折射率法对该三包层 PCF 进行了数值模拟。结果表明: 三包层 PCF 的色散随结构参数的微小变化而有较大的变化, 因此通过对 PCF 结构参数的合理调节, 分别实现了在  $0.80\pm 0.02\ \mu\text{m}$  和  $1.55\pm 0.15\ \mu\text{m}$  波长范围内近零、平坦色散(色散范围  $\pm 0.5\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ ), 色散斜率范围  $\pm 0.02\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)$  的结构设计。这对于光通信系统及研究飞秒激光在 PCF 中的传输特性, 拓展飞秒激光的研究和应用都具有重要意义。

**关键词:** 光子晶体光纤; 多包层; 有效折射率法; 色散

**中图分类号:** TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0823-05

## Design of triple-cladding photonic crystal fiber with near-zero flattened dispersion

Song Zhaoyuan, Huang Jinhua, Zhang Leilei

(College of Science, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

**Abstract:** In order to obtain the near-zero flattened dispersion at the wavelengths of  $0.80\ \mu\text{m}$  and  $1.55\ \mu\text{m}$ , at which the Ti: Sapphire femtosecond laser working wavelength and the optical communication window center, respectively, for the photon crystal fiber (PCF), we used the structural design of a triple-cladding PCF with the hexangular air-hole loop arrangement instead of the general mono-cladding one. Using the improved effective refraction index method on this triple-cladding PCF to perform the numerical simulation, we achieved satisfying results. The numerical simulation shows that the dispersion of this type of PCF changes apparently with small variations of the structural parameters, and therefore the structural designing, that leads to a near-zero(the dispersion range of  $\pm 0.5\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ ) and flattened (the dispersion slope range of  $\pm 0.02\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)$ ) dispersion property at the wavelength ranges of  $0.80\pm 0.02\ \mu\text{m}$  and  $1.55\pm 0.15\ \mu\text{m}$ , respectively, is actualized through adjusting reasonably the PCF structural parameters. This result may play an important role on studying the optical communication system and femtosecond laser transmission characteristics in the PCFs to extend its applications.

**Key words:** photonic crystal fiber; multi-cladding; effective index method; chromatic dispersion

收稿日期: 2013-07-06; 修订日期: 2013-08-14

基金项目: 辽宁省自然科学基金(2013020151); 辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2012135)

作者简介: 宋昭远(1967-), 男, 副教授, 博士, 主要从事特种光纤及稀土掺杂光电材料方面的研究。Email: zysong815@163.com

## 0 引言

光子晶体光纤(Photonic crystal fiber, PCF)<sup>[1]</sup>是光子晶体与光纤技术相结合的新型技术,由沿轴向规则排列着空气孔的石英阵列包层和一个缺陷纤芯组成,且缺陷纤芯破坏了包层结构的周期性,由于包层和纤芯结构设计的特殊性以及调整方便,使其与传统光纤相比具有更为优越的特性<sup>[2-6]</sup>。通过调节包层结构参数,PCF可以在很宽的波长范围内具有平坦色散,且宽带平坦色散曲线的中心波长可以移动<sup>[7]</sup>,这样就可以在光通信窗口 1.55  $\mu\text{m}$  和钛宝石飞秒激光器的工作波长 0.80  $\mu\text{m}$  处获得宽的近零超平坦色散。

利用简单的三角结构 PCF 可以实现近零超平坦色散的研究很多,但是这对 PCF 结构参数的把握要相当的严格,而且相关研究发现,要把简单三角结构 PCF 的限制损耗降至很低,至少需要 20 层空气孔,因此拉制出一根完全符合结构参数的 PCF 更是难上加难。然而,人们发现如果空气孔大小呈阶梯状变化,这样可以有效地降低光纤的限制损耗<sup>[8]</sup>,因此文中设计了一种三包层 PCF,其空气孔大小呈阶梯状变化,可以有效地降低光纤的限制损耗,并应用改进的有效折射率法对 PCF 的色散特性进行了深入缜密的分析<sup>[9]</sup>,得到了 PCF 的总色散值与孔直径  $d$ 、波长  $\lambda$ 、 $d/\lambda$ 、孔间距  $\Lambda$  之间的关系。通过调节各参数,设计出了 0.80  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  处近零色散平坦多包层 PCF,为笔者制备光纤提供了很好的理论基础。

## 1 基本理论

对于单一包层结构的 PCF,其包层孔径大小相等,一般利用传统有效折射率法计算,但是并不能对更多结构的 PCF(如具有色散补偿、色散平坦等特性的 W 型或多包层 PCF)进行模拟。为了克服传统有效折射率法的这一缺陷,文中利用了改进的有效折射率方法,把它应用于三包层 PCF 的计算中,其截面如图 1 所示,它是由多个空气孔环组成,相邻的空气孔大小相同的环看作 PCF 的一个包层,这样具有不同空气孔大小的 PCF 就成了多包层 PCF。

根据标量近似理论<sup>[10]</sup>,标量场为  $\Psi e^{j(\alpha r - \beta z + m\theta)}$  的形式,在柱坐标系中,应满足贝塞耳方程:

$$\frac{d^2\Psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Psi}{dr} + \left( k_0^2 n_i^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) \Psi = 0 \quad (1)$$

式中:  $k_0$  为真空中的波数;  $n_i$  分别对应纤芯和各包层折射率。

在包层和纤芯中分别对该波动方程求解,在纤芯中,  $n = n_c, k_0^2 n_c^2 - \beta^2 > 0$ , 方程的解为:

$$\Psi = A J_m(Ur) \quad (2)$$

式中:  $U = \sqrt{k_0^2 n_c^2 - \beta^2}$ 。

在各个内包层中,  $n = n_i$ , 分别有两种情况考虑,若  $k_0^2 n_i^2 - \beta^2 > 0, i = 1, 2, \dots, N-1$ , 则对应方程的解为:

$$\Psi = A J_m(Pr) + B Y_m(Pr) \quad (3)$$

式中:  $P = \sqrt{k_0^2 n_i^2 - \beta^2}$ 。

若  $k_0^2 n_i^2 < 0, i = 1, 2, \dots, N-1$ , 则对应的方程的解为:

$$\Psi = A I_m(Qr) + B K_m(Qr) \quad (4)$$

式中:  $Q = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_i^2}$ 。

在最外包层中,  $n = n_N, k_0^2 n_N^2 - \beta^2 < 0$ , 则对应的方程的解为:

$$\Psi = A K_m(Wr) \quad (5)$$

式中:  $W = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_N^2}$ 。

以上各式中,  $r$  为横截面的径向半径,  $J_m, Y_m, I_m, K_m$  分别第一和第二阶贝塞耳函数以及虚宗量第一和第二阶贝塞耳函数。

## 2 近零平坦色散 PCF 的设计

### 2.1 0.80 $\mu\text{m}$ 处近零平坦色散三包层 PCF

三包层 PCF 的截面图及等效折射率剖面如图 1 所示,由于每一包层的空气孔大小不同,其所对应的等效折射率也不同。因此,可以把三包层 PCF 等效

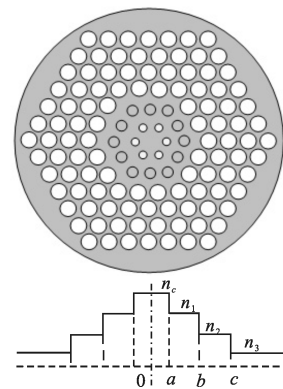


图 1 三包层 PCF 截面及等效折射率分布

Fig.1 Cross section and effective index profile of tri-cladding PCF

成折射率分布的阶跃光纤,用阶跃光纤的理论来计算。首先模拟一下普通结构的PCF,其参数是包层孔直径  $d=0.6\ \mu\text{m}$ ,  $\Lambda=1.0\ \mu\text{m}$ ,PCF的色散随波长的变化关系如图2所示。可以发现,在  $0.78\sim 0.9\ \mu\text{m}$  波长范围内,色散值基本上趋向于平坦状态,且色散的绝对值小于  $5\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 。

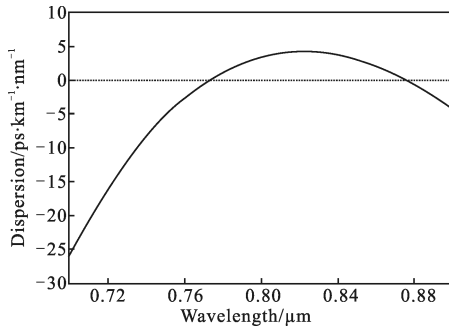


图2 PCF的色散随波长的变化关系

Fig.2 Chromatic dispersion as a function of wavelength for PCF

在图2基础上,对上述普通结构的PCF的参数进行一下修改。图3为当包层孔直径从内到外  $d_1=0.65\ \mu\text{m}$ 、 $d_2=0.66\ \mu\text{m}$ 、 $d_3=0.67\ \mu\text{m}$ ,节距  $\Lambda=0.9\ \mu\text{m}$  和  $0.95\ \mu\text{m}$  时,色散的曲线随波长的变化关系。可以看出,当包层孔直径  $d_1=0.65\ \mu\text{m}$ 、 $d_2=0.66\ \mu\text{m}$ 、 $d_3=0.67\ \mu\text{m}$ ,节距  $\Lambda=0.9\ \mu\text{m}$  时,在波长  $0.78\sim 0.82\ \mu\text{m}$  的范围内,PCF色散值在  $0.5\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$  间变化。并且当包层孔  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  保持一定值不变时,随着节距  $\Lambda$  的增大,色散曲线向右移动,但是差别不是很大。

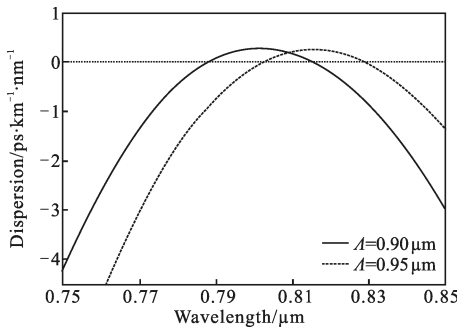


图3 三包层PCF的色散随波长的变化关系

Fig.3 Chromatic dispersion as a function of wavelength for tri-cladding PCF

当  $\Lambda=0.9\ \mu\text{m}$ ,包层孔直径  $d_1=0.65\ \mu\text{m}$ 、 $d_2=0.66\ \mu\text{m}$ 、 $d_3=0.67\ \mu\text{m}$  时,色散斜率随波长的变化曲线如图4所示。可以看出,波长在  $0.75\sim 0.85\ \mu\text{m}$  的范围内,色散斜率值在  $0.02\sim -0.015\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)$  之间变化,这

说明色散的变化也很小,色散很平坦。同时,这条色散斜率曲线的零点在  $0.80\ \mu\text{m}$  附近,说明在  $0.80\ \mu\text{m}$  附近,PCF的色散最平坦。

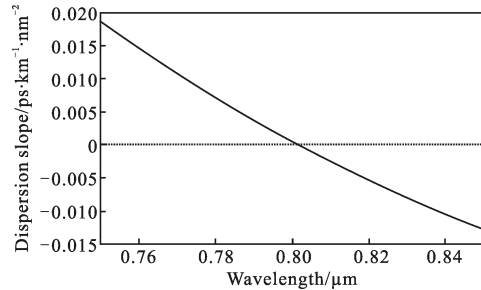


图4 三包层PCF的色散斜率随波长的变化关系

Fig.4 Dispersion slope as a function of wavelength for tri-cladding PCF

### 2.2 1.55 μm附近的近零平坦色散三包层PCF

当  $\Lambda=2.3\ \mu\text{m}$ 、 $d=0.6\ \mu\text{m}$  时,PCF的色散随波长的变化关系如图5所示,从图中可以看出,在  $1.4\sim 1.7\ \mu\text{m}$  波长范围色散值在  $-0.2\sim 1.4\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$  之间变化。下面,对结构进行一下调整,最内层孔孔径调整为  $d_1=0.58\ \mu\text{m}$ 、 $0.6\ \mu\text{m}$ 、 $0.61\ \mu\text{m}$ 、 $0.62\ \mu\text{m}$ ,其余孔径保持不变,此时PCF的色散随波长的变化关系如图6所示。可以看出,随着  $d_1$  的增大,PCF的色散值逐渐减小,并且当  $d_1=0.61\ \mu\text{m}$  时,在  $1.4\sim 1.7\ \mu\text{m}$  波长范围内,PCF的色散值在  $-0.5\sim 0.5\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$  之间变化。于是,笔者选取  $\Lambda=2.3\ \mu\text{m}$ 、 $d_3=0.6\ \mu\text{m}$ 、 $d_1=0.61\ \mu\text{m}$  这根光纤,再次调整它的第二层空气孔。图7所示的是PCF的参数为  $\Lambda=2.3\ \mu\text{m}$ 、 $d_3=0.6\ \mu\text{m}$ 、 $d_1=0.61\ \mu\text{m}$  保持不变,  $d_2$  从  $0.58\ \mu\text{m}$  变化到  $0.62\ \mu\text{m}$  时,PCF的色散曲线随波长的变化关系。

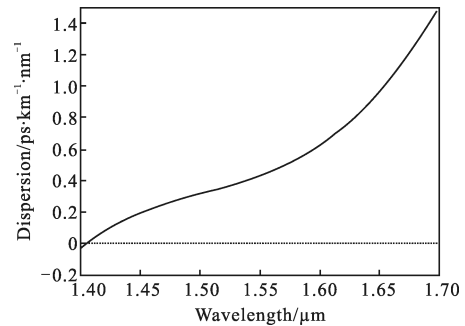


图5 当  $\Lambda=2.3\ \mu\text{m}$ 、 $d=0.6\ \mu\text{m}$  时,PCF的色散随波长的变化  
Fig.5 Dispersion as a function of wavelength with  $\Lambda=2.3\ \mu\text{m}$ ,  $d=0.6\ \mu\text{m}$

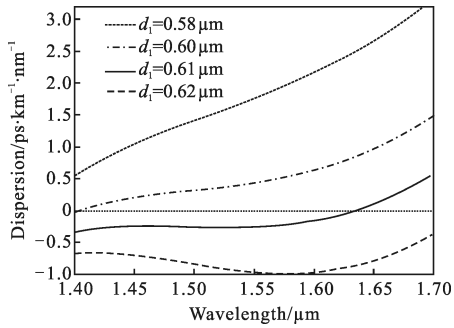


图 6 当  $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$ 、 $d=0.6 \mu\text{m}$  保持不变,  $d_1$  变化时, PCF 的色散随波长的变化

Fig.6 Dispersion curves with  $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$ ,  $d=0.6 \mu\text{m}$ , for different  $d_1$

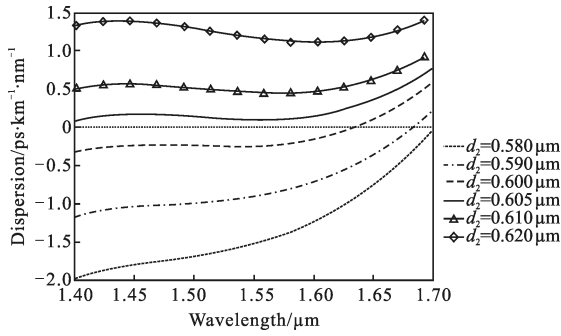


图 7 当  $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$ 、 $d=0.6 \mu\text{m}$ 、 $d_1=0.61 \mu\text{m}$  不变,  $d_2$  变化时, PCF 的色散曲线

Fig.7 Dispersion curves with  $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$ ,  $d=0.6 \mu\text{m}$ ,  $d_1=0.61 \mu\text{m}$ , for different  $d_2$

从图 7 可以看出, 保持  $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$ 、 $d_3=0.6 \mu\text{m}$ 、 $d_1=0.61 \mu\text{m}$  不变, 随着  $d_2$  的增大, PCF 的色散值也增大, 并且当  $d_2=0.605 \mu\text{m}$  时, PCF 的色散值最为平坦, 在  $1.4\sim 1.7 \mu\text{m}$  波长范围内, 其色散值保持在  $0\sim 0.5 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$  之间。图 8 是参数为  $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$ 、 $d_3=0.6 \mu\text{m}$ 、 $d_1=0.61 \mu\text{m}$ 、 $d_2=0.605 \mu\text{m}$  的 PCF 的色散斜

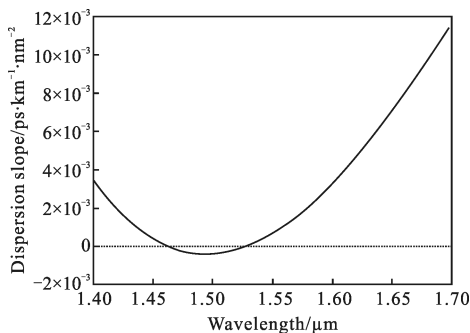


图 8 PCF 的色散斜率随波长的变化关系

Fig.8 Dispersion slope as a function of wavelength

率随波长的变化关系, 可以看出, 在  $1.4\sim 1.7 \mu\text{m}$  波长范围内, PCF 的色散斜率值小于  $0.012 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)$ , 这进一步说明了其色散的超平坦特性。这样, 就得到了一组色散平坦三包层 PCF, 可以看出, 在允许的误差范围内, 尽管 PCF 的参数出现了微小变化, 但这并不影响 PCF 的平坦特性。

前面给出了  $0.80 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$  附近的零色散 PCF 光纤设计参数, 根据图 3、图 6、图 7 中色散随 PCF 结构参数的变化规律, 选择合适的结构参数, 能得到任意波长的零色散 PCF。

### 3 结论

应用改进的有效折射率法对三包层 PCF 进行了模拟, 当包层孔直径  $d_1=0.65 \mu\text{m}$ 、 $d_2=0.66 \mu\text{m}$ 、 $d_3=0.67 \mu\text{m}$ , 节距  $\Lambda=0.9 \mu\text{m}$  时, 在波长在  $0.75\sim 0.85 \mu\text{m}$  的范围内, 色散斜率值在  $0.02\sim -0.015 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)$  之间变化, 这说明色散的变化也很小, 色散很平坦; 同时, 这条色散斜率曲线的零点在  $0.80 \mu\text{m}$  附近, 说明在  $0.80 \mu\text{m}$  附近, PCF 的色散最平坦。当包层孔直径  $d_3=0.6 \mu\text{m}$ 、 $d_1=0.61 \mu\text{m}$ 、 $d_2=0.605 \mu\text{m}$ , 节距  $\Lambda=2.3 \mu\text{m}$  时, 在  $1.4\sim 1.7 \mu\text{m}$  波长范围内, PCF 的色散斜率值小于  $0.012 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)$ , 这进一步说明了其色散的超平坦特性。由此笔者设计了在  $0.80 \mu\text{m}$  附近和  $1.55 \mu\text{m}$  附近具有超平坦特性的三包层 PCF, 为课题组制备 PCF 提供了理论基础, 这将有利于光通信波段的光脉冲在具有平坦色散的 PCF 中的传输的研究, 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] Russell P. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, 299 (5605): 358-362.
- [2] Shen Yan, Wang Liwen, Lou Shuqin. Improved method for fast evaluating optical properties of actual photonic crystal fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (4): 1041-1046. (in Chinese)  
申艳, 王立文, 娄淑琴. 改进的快速评估实际光子晶体光纤特性的方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1041-1046.
- [3] Li Bin, Fang Xiaohui, Liu Bowen, et al. Research on 7.45 W supercontinuum generation by femtosecond laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2012-2016. (in Chinese)

- 李斌, 方晓惠, 刘博文, 等. 飞秒激光产生 7.45 W 超连续光谱实验[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2012–2016.
- [4] Ma Lingfang, Liu Min, Dong Chuanpei, et al. Dual-core photonic crystal fiber with zero inter-modal dispersion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1831–1835. (in Chinese)
- 马玲芳, 刘敏, 董传培, 等. 模间色散为零的双芯光子晶体光纤[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1831–1835.
- [5] Liu Jia, Wang Sijia, Gu Chenglin, et al. Generating square picosecond pulse with photonic crystal fiber amplification system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2023–2026. (in Chinese)
- 刘佳, 王思佳, 顾澄琳, 等. 基于光子晶体光纤放大系统的皮秒方波产生[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2023–2026.
- [6] Zhang Jianxin, Liu Lei, Chen Wei, et al. Modulating lateral modes of semiconductor laser by photonic crystal structures [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 69–72. (in Chinese)
- 张建心, 刘磊, 陈微, 等. 光子晶体调制半导体激光器侧模 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 69–72.
- [7] Reeves W H, Knight J C, P St J Russell. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2002, 10(14): 609–613.
- [8] Wu T L, Chao C H. A novel ultraflattened dispersion photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17(1): 67–69.
- [9] Zhao Xingtao, Hou Lantian, Liu Zhaolun, et al. Dispersion analysis of photonic crystal fiber using improved full-vectorial effective index method [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(5): 2275–2279. (in Chinese)
- 赵兴涛, 侯蓝田, 刘兆伦, 等. 改进的全矢量有效折射率方法分析光子晶体光纤的色散特性 [J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2275–2279.
- [10] Wei Dongbin, Zhou Guiyao, Zhao Xingtao, et al. A new analysis method of multi-cladding photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(5): 3011–3015. (in Chinese)
- 魏东宾, 周桂耀, 赵兴涛, 等. 一种新型的多包层光子晶体光纤的分析方法[J]. 物理学报, 2008, 57(5): 3011–3015.