



# 低损耗宽带近零色散高非线性光子晶体光纤设计

杜海龙<sup>1</sup>, 郑 义<sup>2</sup>, 庞学民<sup>1</sup>

(1. 郑州西亚斯学院, 郑州 451150; 2. 北京交通大学 理学院, 北京 100044)

**摘 要:** 提出了一种兼具低损耗、宽带近零色散和高非线性的光子晶体光纤结构, 该结构光纤包层空气孔直径从纤芯向外层方向渐进增加; 应用多极法, 通过改变包层空气孔间距  $A$ 、各层空气孔直径和空气孔层数  $N_r$ , 对光子晶体光纤色散、损耗和非线性特性进行分析, 获得了各特性随包层结构参数变化的规律, 并最终设计出最佳结构参数。计算结果表明, 该结构光纤存在 3 个零色散点, 在  $1.25 \sim 1.55 \mu\text{m}$  较宽的波长范围内, 色散值波动小于  $0.27 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , 色散斜率小于  $0.008 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-2}$ ,  $1.55 \mu\text{m}$  波长处损耗为  $0.021 \text{ dB/km}$ , 在常用的飞秒激光泵浦波长  $0.8, 1.06, 1.55 \mu\text{m}$  处非线性系数分别达到  $78.6, 60.4, 38.2 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

**关键词:** 光子晶体光纤; 高非线性; 低损耗; 宽带近零色散; 超连续谱

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210221

## Design of photonic crystal fibers with low loss broadband near-zero dispersion and high nonlinearity

Du Hailong<sup>1</sup>, Zheng Yi<sup>2</sup>, Pang Xuemin<sup>1</sup>

(1. Zhengzhou Sias University, Zhengzhou 451150, China;

2. School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A photonic crystal fiber (PCF) structure with low loss, broadband near-zero dispersion and high nonlinearity is proposed. The diameter of the air hole in the cladding increases gradually from the core to the cladding. The dispersion, loss and nonlinear characteristics of the PCF are analyzed by the multipole method through changing the air hole spacing, diameter and the number of air hole layers. Finally, the variation law of each characteristic is obtained and the optimal structure parameters of PCF are designed. The results show that the fiber has three zero dispersion points, the dispersion and dispersion slope is less than  $0.27 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  and  $0.008 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-2}$  respectively between  $1.25 \mu\text{m}$  and  $1.55 \mu\text{m}$ , and the loss is  $0.021 \text{ dB/km}$  at  $1.55 \mu\text{m}$ . The nonlinear coefficients are  $78.6 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $60.4 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , and  $38.2 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  at the femtosecond laser pumping wavelength  $0.8 \mu\text{m}$ ,  $1.06 \mu\text{m}$  and  $1.55 \mu\text{m}$  respectively.

**Key words:** photonic crystal fiber; high nonlinearity; low loss; broadband near-zero dispersion; supercontinuum

光子晶体光纤 (PCF) 是基于光子晶体发展起来的一种新型光纤, 1996 年英国 Bath 大学 J. C. Knight, T. A. Birks 等人成功研制出世界上第 1 根 PCF<sup>[1]</sup>。高峰值功率超短激光脉冲在高非线性 PCF 中传输时, 会产生自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM)、受激拉曼散射 (SRS) 和四波混频 (FWM) 等多种非线性现象<sup>[2-4]</sup>, 各种非线性效应相互作用使得信号光谱展宽形成超连续谱, 超连续谱广泛应用于光学相干层析成像、频率转换、宽带光源、脉冲压缩、光学开关、波分复用等技术领域<sup>[5-8]</sup>; 高非线性 PCF 是产生超连续谱的优良非线性光学介质, 通过灵活调整包层空气孔结构参数可以减小有效模场面积, 从而获取远高于普通光纤的非线性系数和奇异色散特性<sup>[9-11]</sup>。

近年来, 国内外学者针对高非线性和优良色散 PCF 结构设计开展了大量的研究, 如 P. A. Agbemabiese<sup>[12]</sup> 等人提出了一个四层六角结构高非线性 PCF,  $1.55 \mu\text{m}$  处非线性系数达  $40.682 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , 色散值为  $-47.72 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ; 李绪友<sup>[13]</sup> 等人提出了一种五角芯型 PCF 最内层添加微孔的结构, 基于全矢量有限元分析法设计了 3 种不同波段具

\* 收稿日期: 2021-06-03; 修订日期: 2021-08-31

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划项目 (162300410269); 河南省科技攻关项目 (202102310630, 202102310201)

联系方式: 杜海龙, duhailong9804@163.com。

有高非线性近零色散平坦光子晶体光纤结构;王江昫<sup>[14]</sup>等人在 PCF 纤芯和包层分别引入 4 个呈类矩形排列的小圆孔和大的空气孔,孔间距设置为 1  $\mu\text{m}$ , 1.55  $\mu\text{m}$  处非线性系数为 52  $\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,色散曲线存在 2 个零色散点;杨建菊<sup>[15]</sup>等人设计并控制了一种石英基高非线性双包层结构 PCF,并进行了超连续产生实验,中红外孤子移动范围达 470 nm。

目前,已有文献设计的高非线性 PCF 大多数只考虑了色散和非线性特性,综合考虑损耗特性的研究较少,而 PCF 损耗较大又是产生超连续谱实验中普遍存在的问题。因此,本文综合考虑 PCF 损耗特性,通过分析包层结构参数对 PCF 色散、损耗和非线性特性的影响,设计一种同时具备低损耗、宽带近零色散和高非线性的 PCF 结构。

## 1 研究方法 with PCF 结构

T. P. White 等人于 2002 年最早提出了多极法<sup>[16]</sup>,其主要思想是将空气孔周围的电磁场分量基于傅里叶-贝塞尔函数展开,通过寻找系统行列式零点求取纵向传播常数和模式有效折射率。本文采用多极法对 PCF 进行计算和分析,多极法充分利用了 PCF 包层空气孔的结构对称性,使计算能够快速收敛且精度较高,但当包层空气孔层数较多时,此方法计算量急剧增加,计算时间冗长。所以兼顾计算量和时长,同时考虑降低光纤预制棒拉制过程中的复杂度,在满足 PCF 损耗降低至传统光纤水平的前提下将包层空气孔层数  $N_f$  设定在 6 层以下,前期计算内层空气孔参数变化对 PCF 色散和非线性系数影响时,先适当降低包层空气孔层数。

通过模式有效折射率的实部和虚部可以分别求解色散和损耗<sup>[17]</sup>

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2} \quad (1)$$

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

式中:  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  为模式有效折射率实部;  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为模式有效折射率虚部;  $c$  为真空中光速;  $\lambda$  为入射光信号波长;  $L$  为损耗(单位: dB/m)。

将色散系数求导可以求色散斜率

$$D_{\text{slope}} = \frac{dD}{d\lambda} \quad (3)$$

PCF 非线性的强弱用非线性系数  $\gamma$  的大小进行衡量,定义为<sup>[18]</sup>

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} = \frac{2n_2}{\lambda r_{\text{eff}}^2} \quad (4)$$

式中:  $n_2$  为非线性折射率系数,取  $2.76 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ;  $A_{\text{eff}}$  为有效模场面积;  $r_{\text{eff}}$  为有效模场半径,参考传统阶跃折射率光纤有效模场半径计算方法,PCF 的  $r_{\text{eff}}$  计算过程为

$$r_{\text{eff}} = r_{\text{co}} + \lambda / [2\pi \sqrt{n_c^2 \cos^2 \theta - n_{\text{eff}}^2}] \quad (5)$$

式中:  $n_c$  为纤芯二氧化硅折射率;  $r_{\text{co}}$  为纤芯半径;  $\theta$  为纤芯模入射角。

本文设计的 PCF 结构如图 1 所示,包层空气孔间距为  $A$ ,孔层数  $N_f=6$ ,空气孔直径从内向外分别为  $d_1 \sim d_6$ 。光纤结构设计首先考虑预制棒拉制过程中最内层空气孔最易发生变形,从而引起包层大面积塌陷,所以最内层空气孔直径  $d_1$  取较小值;然后包层空气孔从纤芯向外层方向渐进增加;通过调整  $A$  和内层空气孔直径的大小获得宽带零色散特性和高非线性;最后通过增大外层空气孔直径和包层空气孔层数的方法来降低 PCF 损耗。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 包层空气孔直径均匀分布和渐进增加的 PCF 特性比较

令  $A=1.6 \mu\text{m}$ ,  $N_f=4$ ,取两组数据,一组包层空气孔直径均为 0.7  $\mu\text{m}$ ,另一组直径渐进增加,  $d_1, d_2, d_3, d_4$  分别取 0.4, 0.6, 0.8, 1.0  $\mu\text{m}$ ,结果如图 2、图 3 所示。由图 2 可知,相较于相同孔径,空气孔渐进变化的灵活性更大,更易于对 PCF 色散进

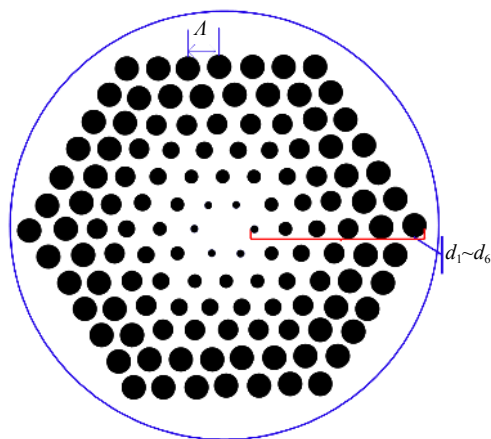


Fig. 1 Cross-section of PCF

图 1 PCF 截面结构

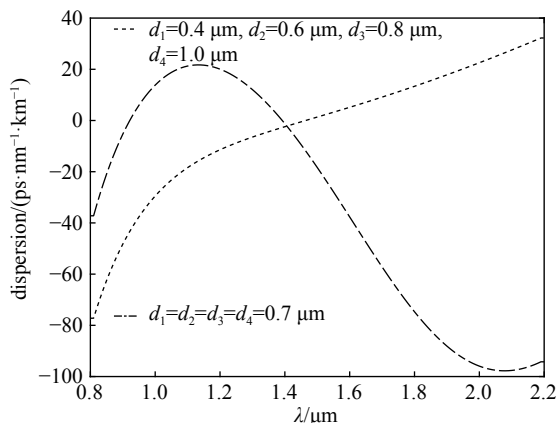


Fig. 2 Dispersion comparison between uniform and progressive aperture

图2 统一孔径和渐进孔径的色散比较

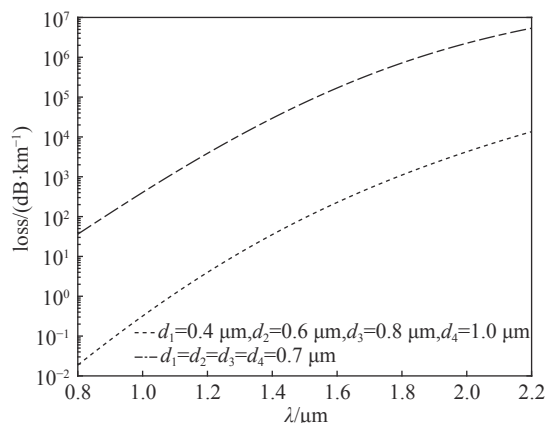


Fig. 3 Loss comparison between uniform and progressive aperture

图3 统一孔径和渐进孔径的损耗比较

行管理,其最内层空气孔小,使得色散曲线更趋向于纯石英基质材料色散曲线,更易获得近零平坦色散特性;由图3可知,渐进空气孔径由于外层空气孔直径的增加,包层空气填充率变大,更多的光被束缚在纤芯中传输,进一步降低了光的泄漏损耗,相比于相同孔径,渐进空气孔径 PCF 损耗降低明显,下降约3个数量级。因此,在获取宽带近零色散和低损耗方面,本文提出的包层空气孔渐进变化结构 PCF 更具优势。

### 2.2 包层空气孔间距 $\Lambda$ 变化

令  $d_1=0.5 \mu\text{m}$ ,  $d_2=d_3=d_4=0.8 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda$  分别取 1.2, 1.4, 1.6, 1.9  $\mu\text{m}$  分析不同空气孔间距对 PCF 特性的影响,结果如图4~图6所示。由图4可知,随着  $\Lambda$  的增加,包层空气孔填充率降低,2个零色散点均向长波长方向移动,色散曲线长波处逐渐向上提升;由图5可知,不同  $\Lambda$  在短波长处非线性区分明显,长波长处差异减小,且在短波长处更容易获得大的非线性系数,随着  $\Lambda$  减小,纤芯和包层的折射率差变大,PCF 对光的束缚能力加强,PCF 有效模场面积减小,从而使非线性效应增强,当  $\Lambda=1.4 \mu\text{m}$  时,PCF 1.55  $\mu\text{m}$  处  $A_{\text{eff}}$  约为  $2.7 \mu\text{m}^2$ ,仅为传统光纤模场面积的 1/30;由图6可知,PCF 损耗在短波长处受  $\Lambda$  影响较大,长波长处不同  $\Lambda$  的损耗趋于一致,这是因为短波长处光主要被约束在纤芯和内层空气孔传输, $\Lambda$  不同对损耗影响较大,随着光波长的增加,光向外包层方向泄漏严重,传输损耗快速增加, $\Lambda$  对损耗影响变小。因此在获取高非线性方面, $\Lambda$  应尽可能取较小值,同时考虑 PCF 宽带近零色散特性,如图4中  $\Lambda=1.4 \mu\text{m}$  时色散曲线较为平坦,因此下文以  $\Lambda=1.4 \mu\text{m}$  为基础展开分析。

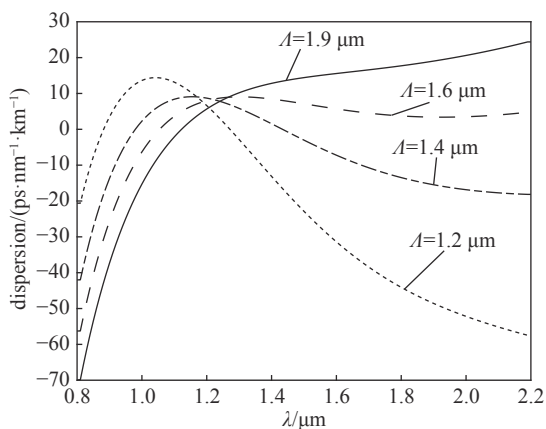


Fig. 4 Dispersion with different air hole spacing

图4  $\Lambda$  不同的色散比较

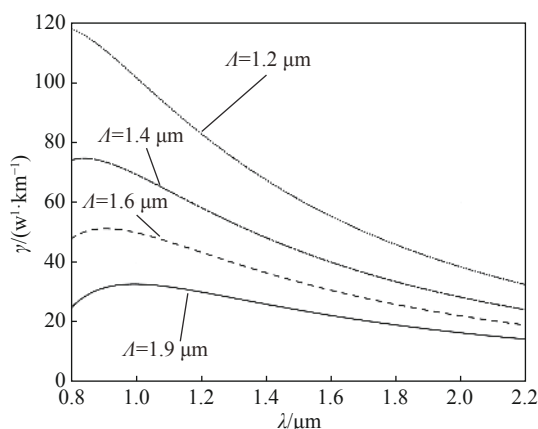


Fig. 5 Nonlinearity with different air hole spacing

图5  $\Lambda$  不同的非线性比较

### 2.3 最内层空气孔直径 $d_1$ 变化

令  $\Lambda=1.4 \mu\text{m}$ ,  $d_2=d_3=d_4=0.8 \mu\text{m}$ , 改变最内层空气孔直径  $d_1$  分析 PCF 特性变化,结果如图7~图9所示。由图可知,随着  $d_1$  的增加,尽管 PCF 非线性系数增加明显,但色散曲线波动剧烈,说明  $d_1$  变化对 PCF 色散影响较大,同时损耗也大幅度增加,当  $d_1$  由  $0.52 \mu\text{m}$  分别增至  $0.72 \mu\text{m}$  和  $0.92 \mu\text{m}$ , 对应 PCF 1.55  $\mu\text{m}$  处损耗分别增大至原来的 2.4 倍和 7.2 倍,且  $d_1$  越大,损耗越大;与  $\Lambda$  类似,图7中  $d_1$  主要影响 PCF 长波长处的走向和短波长处的色散极值, $d_1$  越大,PCF

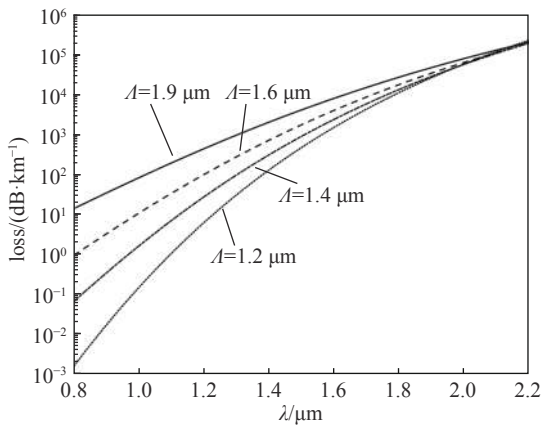


Fig. 6 Loss with different air hole spacing  
图 6  $A$  不同的损耗比较

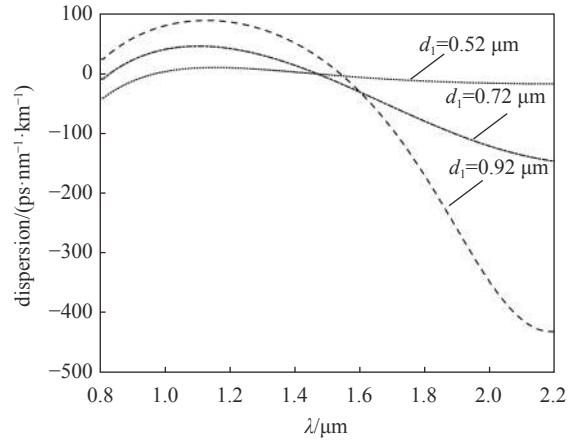


Fig. 7 Dispersion with different  $d_1$   
图 7  $d_1$  不同的色散

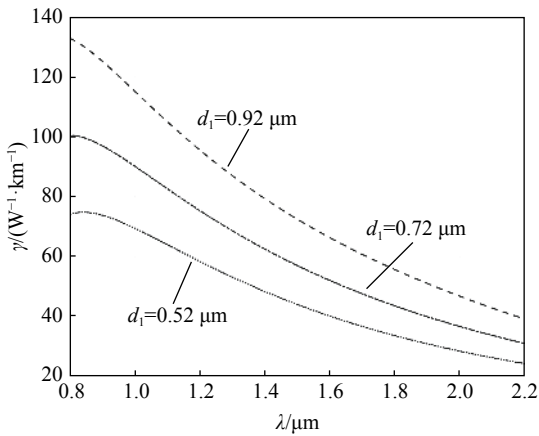


Fig. 8 Nonlinearity with different  $d_1$   
图 8  $d_1$  不同的非线性

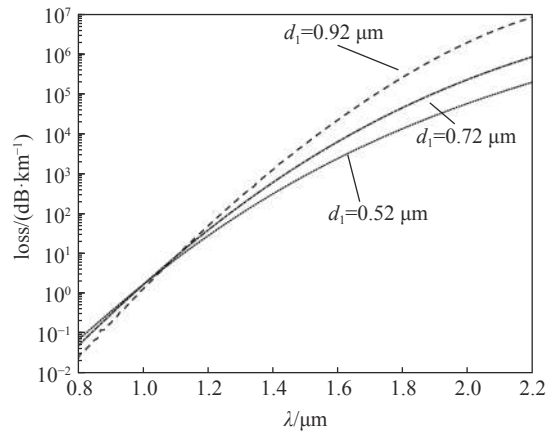


Fig. 9 Loss with different  $d_1$   
图 9  $d_1$  不同的损耗

长波长处的色散波动越大,因此  $d_1$  较大的 PCF 适用于色散补偿光纤制作。综上所述,从防止 PCF 预制棒拉制过程中最内层孔塌陷变形、色散尽可能近零且平坦和损耗尽可能低 3 个方面考虑,PCF 最内层空气孔直径  $d_1$  应取一个较小值,尽管会使非线性系数适当减小,但如图 8 所示, $d_1=0.52 \mu\text{m}$  时 PCF 在  $1.55 \mu\text{m}$  处非线性系数还高达  $42.4 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,仍然满足高非线性的要求,故本文  $d_1$  以  $0.52 \mu\text{m}$  为基础进行计算,后期再根据色散的平坦度适当进行微调。

## 2.4 $d_2$ 变化

令  $A=1.4 \mu\text{m}$ ,  $d_1=0.52 \mu\text{m}$ ,  $d_3=d_4=0.8 \mu\text{m}$ , 单独改变  $d_2$  分析 PCF 特性变化,结果如图 10、图 11 所示,  $d_2$  对色散的

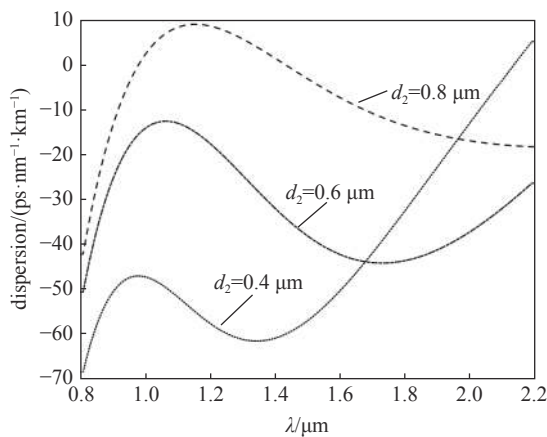


Fig. 10 Dispersion with different  $d_2$   
图 10  $d_2$  不同色散比较

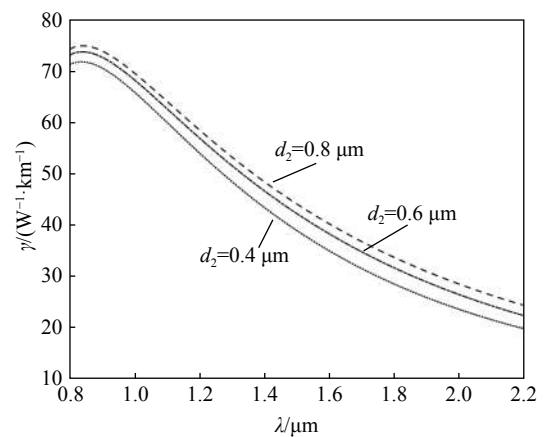


Fig. 11 Nonlinearity with different  $d_2$   
图 11  $d_2$  不同的非线性比较

影响主要体现到曲线的整体下沉以及平坦度的影响,但相对  $d_1$  影响要小得多。随着  $d_2$  从  $0.8 \mu\text{m}$  减小至  $0.6 \mu\text{m}$  和  $0.4 \mu\text{m}$ , 色散曲线整体下沉明显,短波长处色散极值分别下降  $22.9$  和  $57.6 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,且在较长的波长范围内 PCF 均处于正常色散区,长波长处色散曲线增长斜率增加,波动加大;非线性曲线变化较小,PCF  $1.55 \mu\text{m}$  的非线性系数由  $42.4 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$  分别减小至  $40.5$  和  $37.2 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

## 2.5 $d_3$ , $d_4$ 及外层空气孔直径变化

令  $A=1.4 \mu\text{m}$ ,  $d_1=0.52 \mu\text{m}$ ,  $d_2=d_3=d_4=0.8 \mu\text{m}$ ,  $d_3$  和  $d_4$  分别单独由  $0.8 \mu\text{m}$  减小至  $0.6$  和  $0.4 \mu\text{m}$ , 结果如图 12 和图 13 所示。对比图 7、图 10、图 12 和图 13 可知,  $d_1\sim d_4$  分别单独变化时,空气孔距离纤芯越远,其变化对色散的影响越小,与  $d_1$  和  $d_2$  相比,  $d_3$  和  $d_4$  主要影响 PCF 长波长处的色散曲线,对短波长处影响较小,这是因为短波长光信号大部分被束缚在内包层中,外层空气孔结构变化对其影响较小,而随着波长的增加,泄漏到外层空气孔的光功率增大,色散受外层空气孔的影响也逐渐变大;与  $d_3$  相比,  $d_4$  变化对 PCF 色散影响进一步减小,如图 13 所示,中短波长范围内色散曲线更加趋向于一条曲线,长波长处也进一步收敛;非线性方面,  $d_1\sim d_4$  的影响也是逐渐减小,当各层空气孔均单独变化  $0.2 \mu\text{m}$  时,  $1.55 \mu\text{m}$  处非线性系数变化量分别为  $13.4$ ,  $2.1$ ,  $0.05$  和  $5\times 10^{-4} \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。基于以上分析可以得出,4 层以外空气孔变化对 PCF 色散和非线性的影响会在  $d_4$  基础上进一步减小,因此通过调整  $d_3$  及外层空气孔直径大小,可以在保证 PCF 非线性变化较小的前提下对色散进行微调从而获得宽带近零平坦特性。

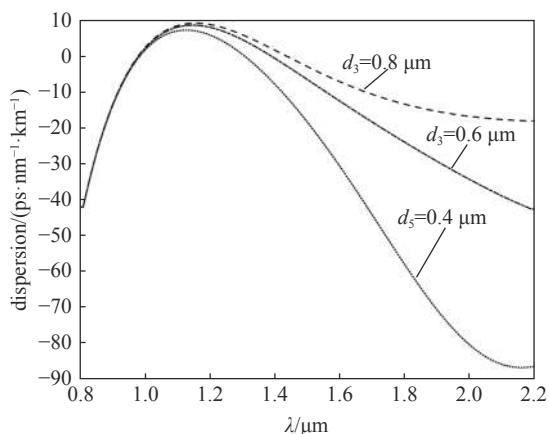


Fig. 12 Dispersion with different  $d_3$

图 12  $d_3$  不同的色散比较

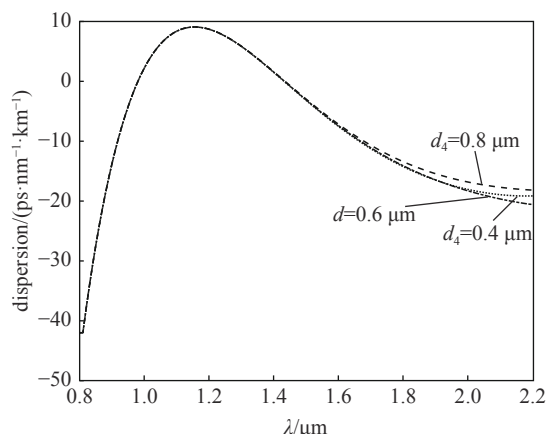


Fig. 13 Dispersion with different  $d_4$

图 13  $d_4$  不同的色散比较

## 2.6 空气孔层数 $N_r$ 变化

令  $A=1.4 \mu\text{m}$ ,  $d_1=0.52$ ,  $d_2=d_3=0.8 \mu\text{m}$  保持不变,  $N_r$  分别等于  $4, 5, 6$ , 对  $d_4$  及外层孔径均增大为  $1.0 \mu\text{m}$  进行分析, PCF 在  $1.31$  和  $1.55 \mu\text{m}$  处的损耗结果如表 1 所示。由表 1 可知, PCF 损耗下降明显, 当  $N_r=6$  时, PCF 损耗已远远小于传统光纤损耗,  $N_r$  由  $4$  依次增加为  $5$  和  $6$  时, PCF  $1.31 \mu\text{m}$  处损耗分别下降为原来的  $1/39$  和  $1/1379$ ,  $1.55 \mu\text{m}$  处损耗降至原来的  $1/32$  和  $1/854$ , 相较于调整  $A$  和  $d_1$ , 通过增加外层空气孔直径和空气孔层数的方法来降低 PCF 损耗更加有效, 同时能够保证 PCF 的色散和非线性特性基本保持不变。

表 1  $N_r$  不同的 PCF 损耗

Table 1 Loss with different  $N_r$

$L/\mu\text{m}$	loss/(dB·km <sup>-1</sup> )		
	$N_r=4$	$N_r=5$	$N_r=6$
1.31	1.93	0.049	0.0014
1.55	45.3	1.42	0.053

## 2.7 低损耗宽带近零色散高非线性 PCF 设计

基于以上分析, 确定获取 PCF 最佳结构的步骤为: 先确定  $A$ , 然后由内到外依次确定  $d_1\sim d_4$  取值保证 PCF 的宽带近零色散和高非线性特性, 最后通过增加外层空气孔直径和外层空气孔层数的方法来获得 PCF 低损耗特性。经过大量的数据计算和结构参数微调, 本文设计的同时具备低损耗、宽带近零色散和高非线性的 PCF 结构参数为:  $A=1.4 \mu\text{m}$ ,  $d_1=0.45$ ,  $d_2=0.75$ ,  $d_3=0.85$ ,  $d_4=1.0$ ,  $d_5=1.14$ ,  $d_6=1.14 \mu\text{m}$ , 如图 14 和图 15 所示, 该结构 PCF 存在 3 个零色

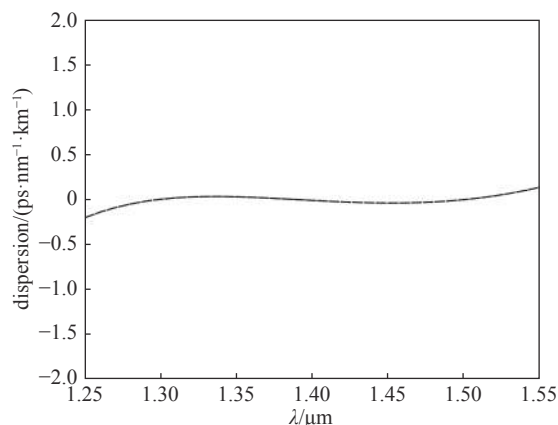


Fig. 14 Dispersion

图 14 色散系数

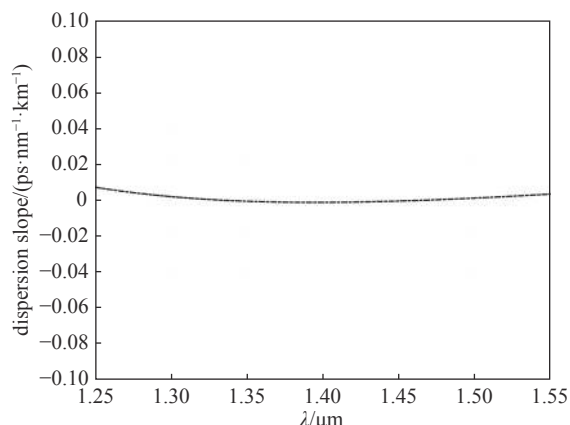


Fig. 15 Dispersion slope

图 15 色散斜率

散点, 分别为 1.29, 1.41 和 1.5  $\mu\text{m}$ ; 在 1.25~1.55  $\mu\text{m}$  较宽的波长范围内, 色散值波动小于 0.27  $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ , 色散斜率小于 0.008  $\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-2}$ , 满足宽带近零色散特性; 1.55  $\mu\text{m}$  波长处损耗为 0.021  $\text{dB}/\text{km}$ , 在常用的飞秒激光泵浦波长 0.8, 1.06, 1.55  $\mu\text{m}$  处非线性系数分别为 78.6, 60.4, 38.2  $\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ , 与 NKT 公司的 NL-1050-NEG-1 型号 PCF 相比较, 非线性系数、损耗和宽带近零色散特性均更具优势。

### 3 结 论

基于多极法设计了一种用于超连续谱产生的 PCF 结构, 该结构包层空气孔大小自纤芯向外层方向渐进增加, 最内层空气孔取较小值以防止预制棒拉制过程中最内层空气孔塌陷变形, 外层空气孔径较大以降低 PCF 损耗; 对包层各结构参数对 PCF 特性的影响进行了数值计算, 结果表明, 越靠近纤芯的空气孔对 PCF 色散和非线性特性影响越大, 通过大量数值计算和分析, 获得了满足宽带近零色散和高非线性的 PCF 结构参数, 然后通过增加外层空气孔直径和层数达到了降低 PCF 损耗的目的, 最终设计了同时具备低损耗、宽带近零色散和高非线性特性的 PCF 结构。

### 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] 杨建菊. 飞秒脉冲在光子晶体光纤中传输的非线性机理与实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017 (Yang Jianju. Nonlinear mechanism and experimental study of femtosecond pulse propagating in photonic crystal fiber[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017)
- [3] 赵兴涛, 王书涛, 刘晓旭, 等. 光子晶体光纤非线性光谱特性的理论与实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(6): 1650-1655. (Zhao Xingtiao, Wang Shutao, Liu Xiaoxu, et al. Study on nonlinear spectral properties of photonic crystal fiber in theory and experiment[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1650-1655)
- [4] 丁慧宇. 高非线性光子晶体光纤特性分析及其布里渊散射效应研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020 (Ding Huiyu. Analysis of the characteristics of highly nonlinear photonic crystal fibers and study on their Brillouin scattering effect[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020)
- [5] 黎玥, 董克攻, 李峰云, 等. 长锥区光子晶体光纤实现 300 W 高功率可见光超连续谱输出[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(2): 4-6. (Li Yue, Dong Kegong, Li Fengyun, et al. 300 W high power supercontinuum generation of complete visible spectrum by long tapered photonic crystal fiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(2): 4-6)
- [6] 李严. 基于高非线性光纤产生超连续谱的数值研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020 (Li Yan. Numerical study of supercontinuum generation based on high nonlinear fiber[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020)
- [7] Zhang Haoyu, Li Fengyun, Liao Ruoyu, et al. Supercontinuum generation of 314.7 W ranging from 390 to 2400 nm by tapered photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(6): 1429-1432.
- [8] Yin Ke, Zhang Bin, Yao Jinmei, et al. 1.9–3.6  $\mu\text{m}$  supercontinuum generation in a very short highly nonlinear Germanium fiber with a high mid-infrared power ratio[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5067-5070.
- [9] Liu Zhaolun, Zhang Chunlan. Tapered  $\text{Yb}^{3+}$ -doped photonic crystal fiber for blue-enhanced supercontinuum generation[J]. *Optik*, 2018, 161: 172-179.
- [10] Bai Yu, Hao Rui. A simple design of highly birefringent and nonlinear photonic crystal fiber with ultra-flattened dispersion[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51: 372.
- [11] 张学典, 袁曼曼, 常敏, 等. 正方形空气孔光子晶体光纤特性分析[J]. *光电工程*, 2018, 45(5): 20-28. (Zhang Xuedian, Yuan Manman, Chang Min, et al. Characteristics in square air hole structure photonic crystal fiber[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(5): 20-28)
- [12] Agbemabese P A, Akowuah E K. Numerical analysis of photonic crystal fiber of ultra-high birefringence and high nonlinearity[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 21182-21182.

- [13] 李绪友, 许振龙, 凌卫伟, 等. 高非线性色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. [中国激光](#), 2014, 41: 0505003. (Li Xuyou, Xu Zhenlong, Ling Weiwei, et al. Numerical simulation and analysis of photonic crystal fibers with high nonlinearity and flattened chromatic dispersion[J]. [Chinese Journal of Lasers](#), 2014, 41: 0505003)
- [14] 王江昀, 张勇, 曹晔, 等. 一种新型高双折射高非线性的光子晶体光纤特性研究[J]. [南开大学学报\(自然科学版\)](#), 2014, 47(3): 86-92. (Wang Jiangyun, Zhang Yong, Cao Ye, et al. A novel high birefringence photonic crystal fibers with high nonlinear[J]. [Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis](#), 2014, 47(3): 86-92)
- [15] 杨建菊, 韩颖, 屈玉玮, 等. 高非线性石英基光子晶体光纤产生宽带可调中红外孤子的实验研究[J]. [红外与毫米波学报](#), 2017, 36(5): 636-640. (Yang Jianju, Han Ying, Qu Yuwei, et al. Broadband tunable mid-infrared soliton generation in a highly nonlinear silica based photonic crystal fiber[J]. [Journal of Infrared and Millimeter Waves](#), 2017, 36(5): 636-640)
- [16] White T P, Kuhlmeier B T, McPhedran R C, et al. Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation[J]. [Journal of the Optical Society of America B](#), 2002, 19(10): 2322-2330.
- [17] Xu Huizhen, Wu Jian, Xu Kun, et al. Highly nonlinear all-solid photonic crystal fibers with low dispersion slope[J]. [Applied Optics](#), 2012, 51(8): 1021-1027.
- [18] 刘兆伦. 光子晶体光纤的光学特性分析与优化设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2007 (Liu Zhaolun. Simulation of optical properties and optimal designing of photonic crystal fibers[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2007)