材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021071703

800 nm 处近零色散高非线性光子晶体光纤的设计

杜海龙[1*]，郑 义[2]

（1. 郑州西亚斯学院 电子信息工程学院，郑州 451150；2. 北京交通大学 理学院，北京 100044）

摘 要： 设计了一种用于产生超连续谱的新型高非线性光子晶体光纤结构，其光纤包层空气孔大小从内到外呈凹型分布，将最内层空气孔直径 d_1 和最外两层空气孔直径 d_5 和 d_6 设置为较大值以分别获得高非线性和低损耗特性；为了降低光纤制作难度，将第二至第四层空气孔直径设置为相同。基于多极法分析了光纤包层空气孔间距 Λ 和各层空气孔直径对色散、非线性系数和损耗的影响规律，并设计了最佳结构参数。仿真结果表明，该结构光纤双零色散点分别为 798 和 1 260 nm，色散极大值为 71.6 ps·nm^{-1}·km^{-1}，在 0.72～1.3 μm 波长范围内，色散斜率小于 0.81 ps·km^{-1}·nm^{-2}，780 nm 处的非线性系数为 153.2 W^{-1}·km^{-1}，800 nm 处损耗为 3.1×10^{-3} dB/km，性能相比市场同类型光子晶体光纤更具优势。

关键词： 光子晶体光纤；近零色散；非线性系数；有效模场面积；损耗

中图分类号： TN253 **文章编号：** 1001－5868(2021)05－0686－06

Design of Photonic Crystal Fiber with Nearly Zero Dispersion and High Nonlinearity at 800 nm

DU Hailong[1], ZHENG Yi[2]

（1. School of Electronic Information Engineering, Zhengzhou Sias University, Zhengzhou 451150, CHN;
2. School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, CHN）

Abstract: A novel and high nonlinear photonic crystal fiber structure for supercontinuum generation was designed, and the size of the air holes in the cladding layer of the fiber is concave. The diameter of the innermost air hole d_1 and the diameter of the outermost two air holes of d_5 and d_6 are set to a larger value to obtain high nonlinearity and low loss, respectively. In order to reduce the difficulty of optical fiber fabrication, the diameters of the second to the fourth air holes are set to be the same. Based on multipole method, the effects of air hole spacing Λ and air hole diameter on dispersion, nonlinear coefficient and loss of PCF are analyzed, and the optimal structure parameters are designed. The simulation results show that the double zero dispersion points of the fiber are 798 and 1 260 nm, respectively, and the maximum dispersion is 71.6 ps·nm^{-1}·km^{-1}. In the wavelength of 0.72～1.3 μm, the dispersion slope of the PCF structure is less than 0.81 ps·km^{-1}·nm^{-2}, the nonlinear coefficient is 153.2 W^{-1}·km^{-1} at 780 nm, and the loss is 3.1×10^{-3} dB/km at 800 nm.

Key words: photonic crystal fiber; nearly zero dispersion; nonlinearity coefficient; effective mode area; loss

收稿日期：2021－07－17.

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).

* **通信作者：**杜海龙

0　引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber,PCF),也称为微结构光纤,最早由英国学者 Knight 等于 1992 年基于光子晶体的概念提出,第一个光纤样品于 1996 年在英国南安普顿大学成功研制[1]。相对于传统光纤,PCF 包层结构参数灵活可调,可有效管理色散特性,同时降低有效模场面积,使得非线性效应大大增强[2-4]。钛宝石激光器输出的高峰值功率飞秒或皮秒脉冲作用于高非线性 PCF,会发生丰富的四波混频、自相位调制、光孤子频移等非线性效应,使光信号谱线极大展宽,从而形成超连续谱[5-8]。超连续谱因为谱线宽、宽带相干等优势而广泛应用于光计量学、波分复用、波长转换、光学相干层析等领域[9-11]。

围绕高非线性 PCF,国内外相关科研团队从调整包层结构、纤芯掺杂特殊元素等方面开展了广泛而深入的研究。2015 年,张清淼等[12]设计了一种四孔复合结构的高非线性 PCF 结构,1.55 μm 处非线性系数达 83.3 $W^{-1}\cdot km^{-1}$;2018 年,Begum 等[13]提出了一种用于医学和光通信的高功率高非线性光子晶体光纤,实现了 960～1 870 nm 的超连续谱产生;同年,燕山大学赵兴涛等[14]设计了一种双零色散高非线性 PCF,并将钛宝石激光器产生中心波长为 800 nm 的飞秒激光脉冲入射 PCF 开展了非线性光谱实验;2019 年,侯尚林等[15]设计了一种二氧化硅芯 PCF 结构,并用全矢量有限元法仿真了 850 nm 处的飞秒脉冲孤子效应;2020 年,李晓龙等[16]设计了一种色散平坦高非线性 PCF,1.55 μm 处非线性系数为 37.98 $W^{-1}\cdot km^{-1}$,限制损耗达 10^{-7} 量级;同年,Li 等[17]采用填充材料的方法设计了一种高非线性 PCF 结构,在 1.55 μm 附近以 1.5 W 的低入射光功率泵浦,获得了最大 450 nm 的超连续谱输出。

本文基于多极法,通过调整 PCF 包层空气孔结构参数,设计了一种在钛宝石飞秒激光器中心波长 800 nm 处具有近零色散和高非线性特性的 PCF 结构,同时尽可能降低该结构的复杂度和限制损耗。

1　理论分析

多极法最早是由 White 等[18]在 2002 年提出并用于研究光子晶体光纤,是一种广泛用于求解圆柱形结构光波导的分析和计算方法。其主要思路是将包层空气孔电磁场分量在柱坐标系下表示为贝塞尔函数形式,利用边界条件,求解亥姆霍兹方程。PCF 包层中第 l 个空气孔内部及邻近介质的轴向电场可以表达为式(1)和(2):

$$E_z=\sum_{m}^{\infty}a_m^{(l)}J_m(k_\perp^{i},r_l)\exp(im\Phi_l)\exp(i\beta_z)\tag{1}$$

$$E'_z=\sum_{m}^{\infty}[b_m^{(l)}J_m(k_\perp^{e},r_l)+c_m^{(l)}H_m(k_\perp^{e},r_l)]\cdot\exp(im\Phi_l)\exp(i\beta_z)\tag{2}$$

其中,J_m 表示纵向场在孔附近的驻波分量,H_m 表示由孔中心向外散射的倏逝波分量,r_l 为 l 孔半径,β_z 为对应模式的传播常数,空气孔内折射率 $n_i=1$,$k_\perp^{i}=(k_0^2n_i^2-\beta^2)^{1/2}$,$k_\perp^{e}=(k_0^2n_e^2-\beta^2)^{1/2}$,$n_e$ 为石英折射率,$k_0=2\pi/\lambda$ 为自由空间波矢量。根据式(1)和(2),通过在空气孔的界面上利用电磁场的边界条件,可以得到、和的表达式,进而求得模式折射率 n_{eff}。

多极法充分利用 PCF 包层空气孔结构的对称性及空气孔为圆形这两大特点,利用群论中的对称规则简化计算模型。与平面波法、正交函数展开法相比,该方法具有更优的运算速度和精度;多极法的另一个优点是通过寻找系统行列式零点求解出的模式折射率是一个复数,通过实部可以求解 PCF 色散系数、色散斜率、有效模式面积等,通过虚部可以求解 PCF 损耗特性。多极法的缺点是当光纤包层空气孔层数和空气孔数量较多时,数据量急剧增加,系统计算时间冗长,因此本文将包层空气孔层数 N_r 限定于六层。根据模式折射率的实部和虚部可以在 Matlab 中编写程序进一步求解非线性系数、损耗、色散系数等参数,求解过程如式(3)～(6)所示,假设光沿轴向入射 PCF,式(4)中 θ 取为 0,在式(5)求解非线性系数的过程中,n_2 取 2.76×10^{-20} m^2/W,式(6)损耗 L 的单位为 dB/km。

$$D=-\frac{\lambda}{c}\frac{d^2\mathrm{Re}(n_{eff})}{d\lambda^2}\tag{3}$$

$$r_{eff}=r_{co}+\lambda/[2\pi\sqrt{n_c^2\cos\theta-n_{eff}^2}]\tag{4}$$

$$\gamma=\frac{2n_2}{\lambda r_{eff}^2}\tag{5}$$

$$L=\frac{20}{\ln(10)}\frac{2\pi}{\lambda}\mathrm{Im}(n_{eff})\times10^6\tag{6}$$

2　PCF 结构模型

本文设计的 PCF 结构如图 1 所示,包层空气孔

排列为六角对称，孔间距为 Λ，空气孔层数 $N_r=6$，空气孔直径从内到外分别为 $d_1\sim d_6$，空气孔大小整体成凹型分布，d_1，d_5 和 d_6 设置为大孔径，d_2，d_3 和 d_4 设置为相同且为小孔径。PCF 的色散和非线性特性主要由靠近纤芯的几层空气孔决定，另外随着包层空气孔层数 N_r 的增加，多极法的计算量急剧增加，因此考虑计算量和计算速度，在分析结构参数对色散和非线性的影响时先取 $N_r=4$，后期计算损耗时再将 N_r 增加。

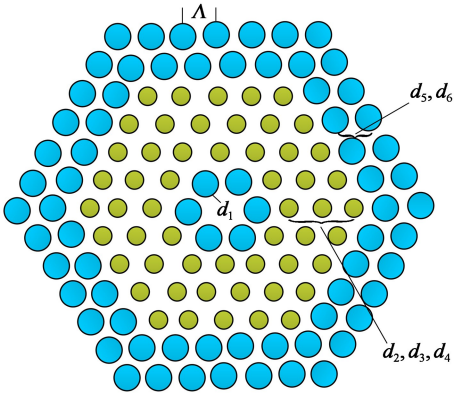


图 1 PCF 结构

3 计算分析与结果讨论

3.1 最内层 d_1 对 PCF 特性的影响

令 $\Lambda=1.0$ μm，$d_2=d_3=d_4=0.6$ μm，最内层空气孔直径 d_1 分别取 0.6，0.7，0.8 和 0.84 μm，PCF 色散系数(D)、有效模式面积(A_{eff})和非线性系数(γ)分析结果如图 2～4 所示。由图 2 可知，随着最内层空气孔直径 d_1 的增加，PCF 短波长和长波长处两个零色散点均朝外侧移动，短波长处零色散点由 741 nm 分别减小至 684，645 和 631 nm，两零色散点间隔逐渐拉大有利于超连续谱线的展宽，同时色散曲线极值变大，色散平坦度降低。

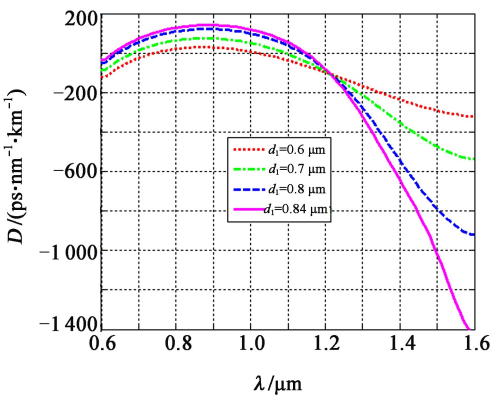


图 2 d_1 对色散的影响

由图 3 和 4 可知，d_1 变化对有效模场面积和非线性系数影响很大，随着 d_1 的增加，包层空气填充率变大，纤芯包层折射率差变大，更多的信号光被束缚在纤芯中传输，从而使得有效模场面积减小，非线性系数变大。因为距离纤芯最近，PCF 特性受最内层空气孔影响最为直接，所以从要求 PCF 在 800 nm 处具备高非线性特性角度考虑，d_1 应尽可能取较大值。

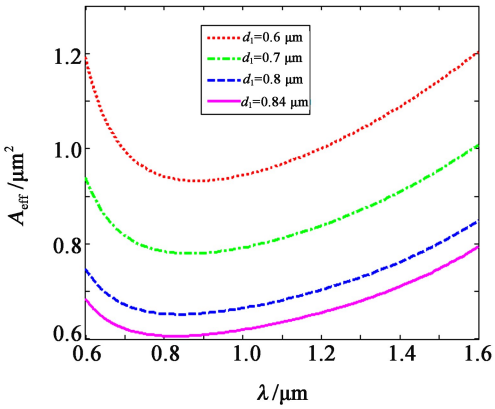


图 3 d_1 对有效模场面积的影响

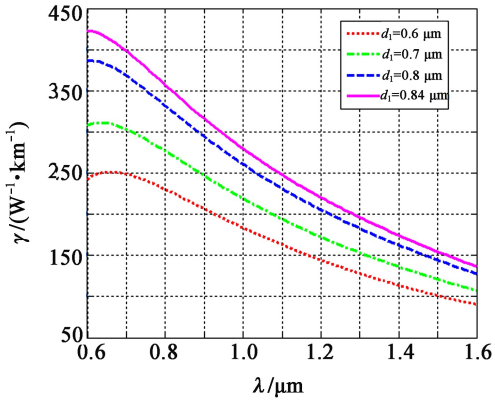


图 4 d_1 对非线性系数的影响

3.2 空气孔间距对 PCF 特性的影响

令 $d_1=d_2=d_3=d_4=0.6$ μm，Λ 分别取 0.9，1.1，1.3 和 1.5 μm，分析空气孔间距 Λ 对 PCF 特性的影响，结果如图 5～7 所示。由图 5 和 6 可知，与 d_1 的影响不同，随着 Λ 的增加，PCF 两零色散点均向长波长方向移动，同时色散极值中心波长也明显红移，色散峰值逐渐降低，色散曲线也趋于平坦。图 5 中 $\Lambda=1.5$ μm 时出现了色散全部小于零的情况，即 PCF 在整个研究波长范围内全部工作在正常色散区。由图 7 非线性系数分析结果可以看出，包层空气孔间距 Λ 越大，包层空气填充率下降，导致非线性系数降低，但相对于传统光纤，非线性系数仍保持在一个较高的水平。由上可见，Λ 对 PCF 特性

的影响主要体现在零色散点的平移和色散曲线的平坦度，因此可以主要通过调整 Λ 将 PCF 短波长处零色散点调整至 800 nm 附近。

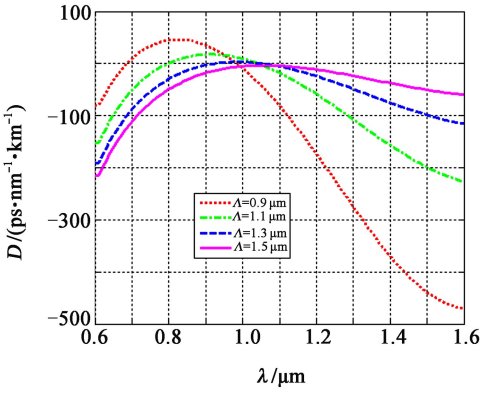


图 5　Λ 对色散的影响

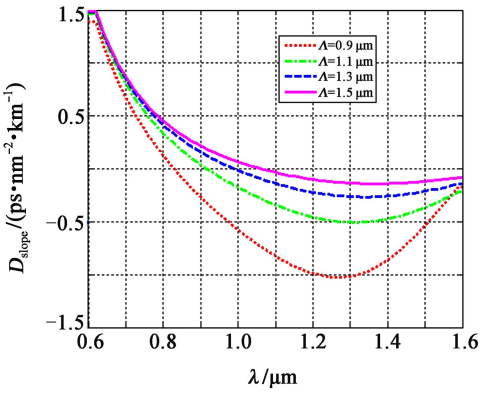


图 6　Λ 对色散斜率的影响

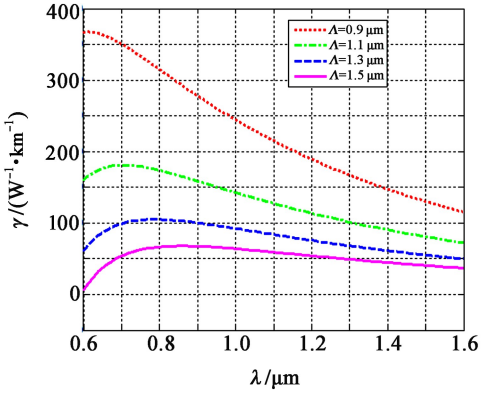


图 7　Λ 对非线性特性的影响

3.3　d_2，d_3，d_4 变化对 PCF 特性的影响

为了降低 PCF 拉制工艺的复杂度，令 d_2，d_3，d_4 取值相同，即第二至第四层的空气孔直径保持一致，令 $\Lambda=1.3$ μm，$d_1=0.84$ μm，d_2，d_3，d_4 整体分别取 0.56，0.60 和 0.64 μm 来分析 PCF 的特性变化情况，结果如图 8～10 所示。由图 8 和 9 可以看出，PCF 色散特性在短波长处受影响较小，长波长处差异明显，当 $d_2=d_3=d_4=0.56$ μm 时，色散曲线在 1.24 μm 处出现了较大的凹陷，色散极小值达 −1 508 ps/(nm·km)，此结构 PCF 在色散补偿方面具有较大潜力。随着孔径的增加，色散凹陷中心波长向长波长方向移动，凹陷极值变大，色散曲线趋于平坦。如图 9 所示，当 $d_2=d_3=d_4=0.64$ μm 时，在波长 0.75～1.26 μm 范围内色散斜率(D_{slope})波动小于 0.5 ps/(nm²·km)；非线性方面，由图 10 可以看出，第二至第四层空气孔直径变化对 PCF 非线性影响较小，三条非线性特性曲线在短波长区间近乎重合。可见 d_2，d_3，d_4 的不同取值对非线性特性的影响较小，可以主要用于调整 PCF 长波长处零色散点和色散平坦度。

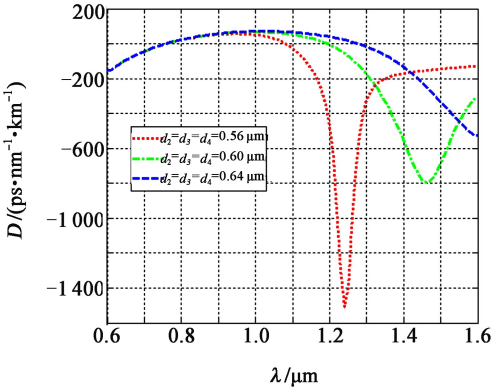


图 8　d_2，d_3 和 d_4 对色散的影响

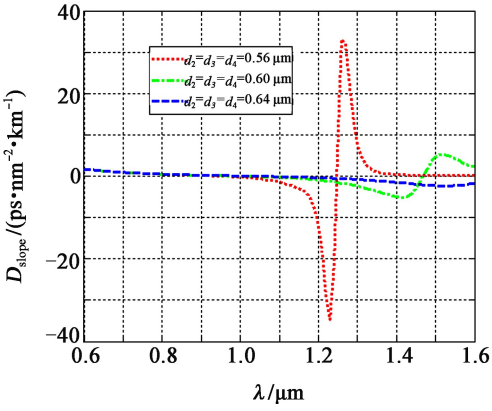


图 9　d_2，d_3 和 d_4 对色散斜率的影响

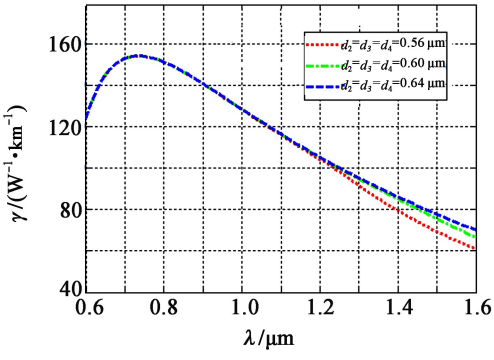


图 10　d_2，d_3 和 d_4 对非线性特性的影响

3.4 外层空气孔层数和大小对 PCF 特性的影响

由上可知，第二层至第四层空气孔大小对 PCF 非线性特性的影响已经较小，故第五层和第六层空气孔直径 d_5 和 d_6 对非线性的影响不再分析，主要分析它们对色散和损耗的影响规律。在 $\Lambda=1.3\ \mu m$，$d_1=0.84\ \mu m$，$d_2=d_3=d_4=0.64\ \mu m$ 的基础上取两组数据，第一组增加空气孔层数，N_r 由 4 分别增加至 5 和 6，第二组整体变化外两层空气孔直径 d_5 和 d_6，分别取 0.56，0.64 和 0.72 μm。色散计算结果如图 11 所示，损耗计算结果如表 1 和表 2 所示。由图 11 可以看出，PCF 色散特性主要由内四层空气孔决定，第五层和第六层空气孔加入后对 PCF 色散影响很小，1.25 μm 之前三条色散曲线近乎重合；损耗方面，由表 1 可知，随着包层空气孔由 4 层分别增加至 5 层和 6 层，PCF 损耗迅速衰减，0.78 和 1.06 μm 处 PCF 损耗值分别下降了约两个和三个数量级；随着外层空气孔直径 d_5 和 d_6 的增加，如表 2 所示，PCF 损耗也下降明显，下降约一个数量级。因此可以通过增加外层空气孔层数和增加外层空气孔直径的方法来获取 PCF 的低损耗特性。

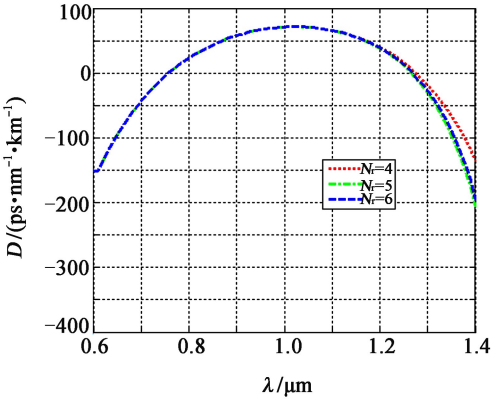


图 11 N_r 对色散的影响

表 1 N_r 对 PCF 损耗的影响 单位：dB/km

损耗	$N_r=4$	$N_r=5$	$N_r=6$
$L_{0.78\ \mu m}$	10.04	0.3	0.012
$L_{1.06\ \mu m}$	1 996	61.4	2.48

表 2 d_5 和 d_6 对 PCF 损耗的影响 单位：dB/km

损耗	$d_5=d_6=0.56\ \mu m$	$d_5=d_6=0.64\ \mu m$	$d_5=d_6=0.72\ \mu m$
$L_{0.78\ \mu m}$	0.075	0.012	0.001 9
$L_{1.06\ \mu m}$	13.86	2.48	0.425

3.5 800 nm 高非线性 PCF 设计

基于以上分析，本文以图 5 中 $\Lambda=0.9\ \mu m$，$d_1=d_2=d_3=d_4=0.6\ \mu m$ 为基础，通过以下四步来设计 800 nm 处具备近零色散和高非线性特性的 PCF。第一步，通过增加最内层空气孔直径 d_1 以增强非线性特性并向上提升色散曲线；第二步，利用增加空气孔间距 Λ 来降低色散极大值并提高色散平坦度，同时使 PCF 短波长处的零色散点接近 800 nm；第三步，通过调整 d_2，d_3 和 d_4 取值来平移长波长处零色散点及提高色散平坦度；第四步，通过增大包层空气孔层数 N_r 和最外两层空气孔大小来降低 PCF 损耗。

通过大量数值计算，本文设计的 800 nm 处具备近零色散和高非线性特性的 PCF 的结构参数为：$\Lambda=1.3\ \mu m$，$d_1=d_5=d_6=0.84\ \mu m$，$d_2=d_3=d_4=0.64\ \mu m$，包层空气孔直径大小成凹型分布，色散和色散斜率计算结果分别如图 12 和 13 所示，零色散点分别为 798 和 1 260 nm，色散极大值为 71.6 ps/(nm·km)，在 0.72～1.30 μm 波长范围内，色散斜率小于 0.81 ps/(nm^2·km)，780 nm 处非线性系数为 153.2 W^{-1}·km^{-1}，800 nm 处损耗为 3.1×10^{-3} dB/km，相比 NKT 公司的 NL-PM-750，色散曲线更加平坦，零色散点间隔更大，损耗更小，非线性系数也更具优势。

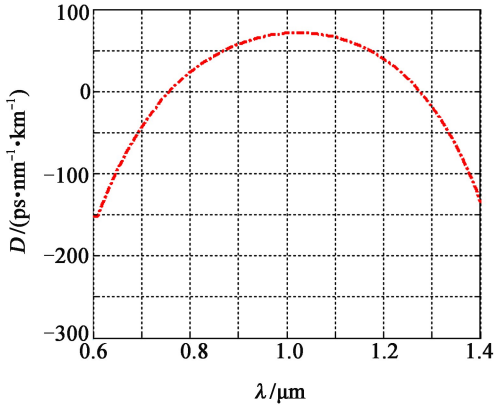


图 12 色散系数

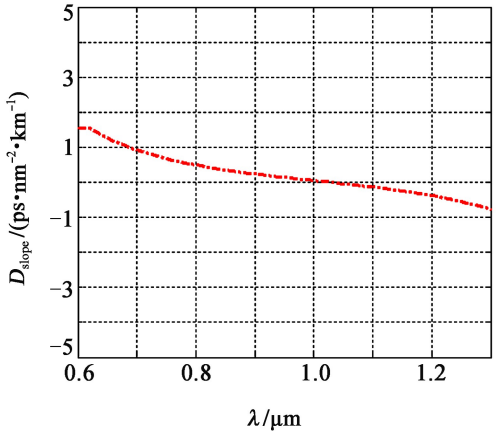


图 13 色散斜率

4　结论

为了设计 800 nm 波长处同时具备高非线性和近零色散特性的 PCF 结构，应用多极法分析了光纤包层结构参数和各层空气孔对 PCF 特性的影响；研究发现，PCF 色散特性受包层各层空气孔的影响程度从内到外依次降低，色散曲线主要由包层孔间距和内四层空气孔直径 $d_1 \sim d_4$ 决定，而 PCF 非线性特性主要由最内层空气孔直径 d_1 和孔间距 Λ 决定，第二层及其以外空气孔对非线性影响较小。损耗方面，增加包层空气孔层数 N_r 和增大外层空气孔直径 d_5 和 d_6 均可以有效地降低 PCF 损耗；在此基础之上，归纳了设计 800 nm 波长处高非线性 PCF 的步骤，并最终获取了包层空气孔大小呈凹型分布的最佳结构参数。文章的分析和计算可以为用于产生超连续谱的 PCF 设计提供理论依据和数据支持。

参考文献：

[1] Knight J C, Birks T A, Russell P S, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. Opt. Lett., 1996, 21(19): 1547-1549.

[2] 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(11): 1-13.

[3] 张甜甜，施伟华. 光子晶体光纤产生紫外超连续谱的数值研究[J]. 中国激光，2020，47(3)：100-105.
Zhang Tiantian, Shi Weihua. Numerical research on ultraviolet supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. Chinese J. of Lasers, 2020, 47(3): 100-105.

[4] Zhang Haoyu, Li Fengyun, Liao Ruoyu, et al. Supercontinuum generation of 314.7 W ranging from 390 to 2 400 nm by tapered photonic crystal fiber[J]. Opt. Lett., 2021, 46(6): 1429-1432.

[5] 刘正一，刘双龙，黄艾旺，等. 百飞秒级脉宽的宽带超连续谱光源的产生[J]. 光子学报，2020，49(9)：33-40.
Liu Zhengyi, Liu Shuanglong, Huang Aiwang, et al. Generation of broadband supercontinuum source with pulse width of one hundred femtosecond[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9): 33-40.

[6] 李小魁，付国定，张秋慧. 光子晶体光纤中入射激光脉冲形状对超连续谱特性的影响[J]. 激光杂志，2017，38(4)：5-9.
Li Xiaokui, Fu Guoding, Zhang Qiuhui. The effects of the incident laser pulse with different shapes on the characteristics of super continuum generated in photonic crystal fibers[J]. Laser J., 2017, 38(4): 5-9.

[7] 杨未强，宋　锐，韩　凯，等. 超连续谱激光光源研究进展[J]. 国防科技大学学报，2020，42(1)：1-9.
Yang Weiqiang, Song Rui, Han Kai, et al. Research progress of supercontinuum laser source[J]. J. of National University of Defense Technol., 2020, 42(1): 1-9.

[8] 田激杨，杨光晔，王三丹，等. 基于医用光子晶体光纤泵浦脉冲优选光学相干断层成像光源的研究[J]. 光学学报，2021，41(6)：39-47.
Tian Jiyang, Yang Guangye, Wang Sandan, et al. Optimization of optical coherence tomography light source based on pump pulse of medical photonic crystal fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 39-47.

[9] 赵　磊，李　超，黎　玥，等. 基于光子晶体光纤的百瓦超连续谱的产生[J]. 中国激光，2017，44(2)：189-193.
Zhao Lei, Li Chao, Li Yue, et al. Hundred-watt-level supercontinuum spectrum generation based on photonic crystal fiber[J]. Chinese J. of Lasers, 2017, 44(2): 189-193.

[10] 赵　彬，王梦艳，施伟华，等. 基于高非线性 PCF 光纤交叉相位调制的波长转换[J]. 半导体光电，2014，35(4)：687-690.
Zhao Bin, Wang Mengyan, Shi Weihua, et al. Wavelength conversion based on cross-phase modulation of high nonlinear photonic crystal fiber[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(4): 687-690.

[11] 巩稼民，刘建花，沈一楠，等. 基于掺锗光子晶体光纤的可调谐多波长转换器[J]. 半导体光电，2018，39(1)：15-20.
Gong Jiamin, Liu Jianhua, Shen Yinan, et al. Broadband tunable multi-wavelength converter based on Ge-doped photonic crystal fiber[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(1): 15-20.

[12] 张清淼，谢　丹，熊　磊. 基于四孔复合结构的 PCF 的特性研究[J]. 光通信研究，2015(6)：43-45.
Zhang Qingmiao, Xie Dan, Xiong Lei. Research on characteristics of four-hole composite structured photonic crystal fibers[J]. Study on Optical Communications, 2015(6): 43-45.

[13] Begum, Feroza, Suhaimi, et al. Supercontinuum generated high power highly nonlinear photonic crystal fiber for medical and optical communications applications [J]. Modern Electronic Materials, 2018, 4: 53-58.

[14] 赵兴涛，蒋国辉，程吉瑞，等. 双零色散光子晶体光纤中可见及红外宽带高效色散波[J]. 光子学报，2018，47(11)：29-35.
Zhao Xingtao, Jiang Guohui, Cheng Jirui, et al. Visible and infrared broadband high efficiency dispersion wave in photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelength[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(11): 29-35.

[15] 侯尚林，雷景丽，吴七灵，等. 高非线性光子晶体光纤中飞秒脉冲压缩(特邀)[J]. 红外与激光工程，2019，48(1)：58-63.
Hou Shanglin, Lei Jingli, Wu Qiling, et al. Effect of high-order dispersion and nonlinear on compression pulse pair in PCF [J]. Laser & Infrared Engineering, 2019, 48(1): 58-63.

(下转第 703 页)

suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 678-685.

[3] Azoubel S, Cohen R, Magdassi S. Wet deposition of carbon nanotube black coatings for stray light reduction in optical systems[J]. Surface and Coatings Technol., 2015, 262(C): 21-25.

[4] Abendroth T, Althues H, Mäder G, et al. Selective absorption of carbon nanotube thin films for solar energy applications[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015(8), 143: 553-556.

[5] Chen Zhonghua, Boström T. Electrophoretically deposited carbon nanotube spectrally selective solar absorbers[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016, 144(1): 678-683.

[6] Bera R K, Mhaisalkar S G, Mandler D, et al. Formation and performance of highly absorbing solar thermal coating based on carbon nanotubes and boehmite[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 120(7): 287-293.

[7] Zhao Ling, He Xiuli, Li Jianping, et al. Electrosprayed carbon-based black coatings for pyroelectric detectors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 196(7): 16-21.

[8] Yang Zupo, Ci Lijie, Bur J A, et al. Experimental observation of an extremely dark material made by a low-density nanotube array[J]. Nano Lett., 2008, 8(2): 446-451.

[9] Selvakumar N, Krupanidhi S B, Barshilia H C. Carbon nanotube-based tandem absorber with tunable spectral selectivity: Transition from near-perfect blackbody absorber to solar selective absorber[J]. Advanced Materials, 2014, 26(16): 2552-2557.

[10] Wang X J, Flicker J D, Lee B J, et al. Visible and near-infrared radiative properties of vertically aligned multi-walled carbon nanotubes[J]. Nanotechnology, 2009, 20(21): 1-9.

[11] Ishii S, Sugavaneshwar R P, Nagao T, et al. Titanium nitride nanoparticles as plasmonic solar heat transducers[J]. J. of Physical Chemistry C, 2016, 120(4): 2343-2348.

[12] Gao Huixuan, Peng Wei, Cui Wenli, et al. Ultraviolet to near infrared titanium nitride broadband plasmonic absorber[J]. Optical Materials, 2019, 97(11): 1-7.

[13] Liu Zhengqi, Zhong Haozong, Zhang Houjiao, et al. Silicon multi-resonant metasurface for full-spectrum perfect solar energy absorption[J]. Solar Energy, 2020, 199(5): 360-365.

[14] Fan Peixun, Bai Benfeng, Zhong Minlin, et al. General strategy toward dual-scale-controlled metallic micro—Nano hybrid structures with ultralow reflectance[J]. ACS Nano, 2017, 11(7): 7401-7408.

[15] Wattoo A G, Bagheri R, Ding Xuefeng, et al. Template free growth of robustly stable nanophotonic structures: broadband light superabsorbers[J]. J. of Materials Chemistry C, 2018, 32(6): 8646-8662.

作者简介：

何志聪(1996—)，男，广东人，硕士研究生，主要从事光吸收涂层的研究；

朱丽慧(1971—)，女，浙江人，博士，教授，博士生导师，主要从事材料方面的研究。

(上接第 697 页)

[12] 姜传恺. TSV 三维封装内部典型缺陷的特征识别方法研究[D]. 武汉：湖北工业大学，2019.
Jiang Chuankai. Research on the feature recognition method of typical defects in TSV 3D package[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019.

[13] 薛栋民. 应用于 TSV 互连的电镀填充工艺研究[D]. 武汉：华中科技大学，2014.
Xue Dongmin. Research on electroplating and filling process applied to TSV interconnection[D]. Wuhan: Huazhong Unversity of Science and Technology, 2014.

[14] He Shuaijia, Gao Hongjun, Wang Lingfeng, et al. Distribution-ally robust planning for integrated energy systems incorporating electric-thermal demand response[J]. Energy, 2020, 213: 118783.

[15] Zhu J, Bykov V, Pagani I, et al. Specific features of eddy current analysis with ANSYS® for fast plasma current decay event in W7-X[J]. Fusion Engineering and Design, 2021, 163: 112136.

作者简介：

聂　磊(1978—)，男，博士，教授，从事电子制造工艺可靠性研究。

(上接第 691 页)

[16] 李晓龙，张世宏，刘先国. 色散平坦高非线性超低损耗双折射 PCF 有限元仿真[J]. 光通信技术，2020, 44(1): 58-62.
Li Xiaolong, Zhang Shihong, Liu Xianguo. Finite element simulation of high nonlinear ultra-low loss birefringent PCF with flat dispersion[J]. Optical Communication Technol., 2020, 44(1): 58-62.

[17] Li Jianhua, Wang Jingyuan, Teng Yichao, et al. Broadband supercontinuum generation based on filled structural photonic crystal fibers with low incident optical power[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(10): 1950-1956.

[18] White T P, Kuhlmey B T, MePhedran R C, et al. Multipole method for microstructured optical fibers. Ⅰ. Formation[J]. J. of the Optical Society of America B, 2002, 19(10): 2322-2330.

作者简介：

杜海龙(1983—)，男，硕士，副教授，从事光纤通信信号与信息处理研究。