

# 光子晶体光纤产生紫外超连续谱的数值研究

张甜甜, 施伟华\*

南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023

**摘要** 提出了一种基于高非线性氟化镁光子晶体光纤产生紫外超连续光源的方法。采用分步傅里叶法求解光纤的非线性薛定谔方程, 基于光子晶体光纤数值模拟了扩展到紫外波段的超连续谱的产生; 通过分析光纤结构参量与泵浦光源参数对紫外超连续谱产生的影响, 得出了光纤长度、色散参量以及泵浦脉冲峰值功率、初始脉冲宽度对超连续谱光谱宽度的影响规律。研究发现: 当光子晶体光纤长度为 8 cm、脉冲中心波长为 450 nm、峰值功率为 3.1 kW、初始脉冲宽度为 40 fs 时, 可获得展宽至紫外的超连续谱, 范围为 279.6~769.0 nm。

**关键词** 光纤光学; 紫外超连续谱; 光子晶体光纤; 非线性效应; 色散; 光纤材料

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0301012

## Numerical Research on Ultraviolet Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber

Zhang Tiantian, Shi Weihua\*

*College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics,  
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China*

**Abstract** This paper proposes a method for generating an ultraviolet supercontinuum light source (SC) using highly nonlinear magnesium fluoride photonic crystal fiber (PCF). The nonlinear Schrödinger equation was solved using the split-step Fourier method, and the generation of an ultraviolet SC in the PCF was numerically simulated. The effects of the structural parameters of the PCF and the parameters of the pump source on the ultraviolet SC were analyzed. The variations in the SC width relative to the PCF length, dispersion parameter, pump pulse peak power, and initial width of pump pulses were obtained. Simulation results reveal that the SC is extended into the ultraviolet range of 279.6~769.0 nm when the length of the PCF is 8 cm, central wavelength of the pump pulse is 450 nm, peak power is 3.1 kW, and initial pulse width is 40 fs.

**Key words** fiber optics; ultraviolet supercontinuum; photonic crystal fiber; nonlinear effect; dispersion; fiber material

**OCIS codes** 060.4370; 060.5295; 060.2400

## 1 引言

超连续光源(SC)具有输出光谱宽、峰值功率高等优点,在光通信、光电子学、生物医学及军事等方面都有重要的应用。紫外超连续光源具有荧光效应、生物效应、光化学和光电效应,因此成为一个新的研究热点。光子晶体光纤(PCF)具有单模无截止传输特性、良好的色散可控性和高的非线性效应等许多优异的性能,对超连续谱的产生具有重要的作

用。近年来,许多研究小组为了把 SC 扩展至紫外做了许多工作。2000 年,Ranka 等<sup>[1]</sup>采用钛宝石激光器输出的脉宽 100 fs、能量小于 1 nJ 的激光脉冲泵浦 PCF 的反常色散区,观察到了波长范围为 390~1600 nm 的 SC。2004 年,Champert 等<sup>[2]</sup>通过实验方法分析双泵浦光源产生 SC 的情况,发现在 PCF 中输入 1064 nm 和 532 nm 的光源时,输出光谱展宽至紫外波段的 350 nm。2006 年,Omenetto 等<sup>[3]</sup>在超短脉冲的脉宽为 110 fs 的条件下进行实

收稿日期: 2019-09-05; 修回日期: 2019-10-17; 录用日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(61571237,61275067)

\* E-mail: shiwh@njupt.edu.cn

验,选择中心波长为 1550 nm 的激光来泵浦高非线性的 SF6 型 PCF,成功获得了光谱范围为 350 nm~3 μm 的 SC,将光谱展宽至紫外波段。2008 年,孟佳等<sup>[4]</sup>制备出呈柚子形的小芯径折射率引导型 PCF,光纤纤芯周围第一层空气孔存在形变,在反常色散区选取中心波长 800 nm,最终的 SC 覆盖从紫外 330 nm 到红外 1560 nm 的波长范围。2010 年,Stark 等<sup>[5]</sup>通过理论和实验的结合,采用 50 fs 的亚飞秒激光器在 532 nm 中心波长处泵浦锥形光纤得到了延伸至紫外 350 nm 的 SC。2012 年,Han 等<sup>[6]</sup>在实验中探究 PCF 的正常色散区,将 780 nm 和 830 nm 作为中心波长分别进行泵浦,利用非线性产生的反斯托克斯脉冲和泵浦光脉冲之间的交叉相位调制效应,将 SC 展宽至 320 nm 的紫外区。2013 年,Yuan 等<sup>[7]</sup>通过在 PCF 中产生三次谐波,利用 PCF 中的相位匹配效应(即基模和高阶模式的相位匹配)产生了波长覆盖 288~500 nm 的光谱,将光谱展开至紫外波段。2016 年,Yan 等<sup>[8]</sup>利用实验,选取近零色散的 850 nm 为泵浦的中心波长,并将飞秒脉冲耦合进 PCF 的正常色散区,产生了 280 nm 的紫外 SC。2018 年,Wang 等<sup>[9]</sup>在七芯 PCF 的正常色散区泵浦,产生的超连续谱可展宽至紫外的 350 nm。2018 年,Qi 等<sup>[10]</sup>在七芯 PCF 反常色散区进行泵浦,产生了高功率的 SC,光谱范围为 350~2400 nm。2019 年,李子熙等<sup>[11]</sup>在不同入射激光能量和晶体取向条件下进行了实验研究,强飞秒激光在氟化钙晶体中产生了稳定的 SC,测得 SC 的蓝移截止波长达到了 300 nm。

通过分析以上研究可知:1)采用可见光区域的泵浦光源或双泵浦光源泵浦高非线性的 PCF,产生的 SC 虽可以拓展到紫外波段,但波长不是很短,一般不低于 300 nm;2)对 PCF 的要求比较高,采用拉锥的 PCF、级联拉锥的 PCF 或者新型的多芯 PCF 可将 SC 展宽至紫外波段,但对光纤进行拉锥以及多芯光纤的耦合与熔接增大了工艺实现的难度。

综上,紫外 SC 的研究存在以上不足,主要是受到选取的 PCF 材料和结构的影响,故本文从材料和结构的角度出发,仿真设计氟化镁 PCF,将 PCF 的色散零点偏移到靠近短波紫外处,再选取合适的泵浦条件产生拓展至紫外的 SC,产生的光源的光谱范围为 279.6~769.0 nm。

## 2 PCF 结构设计

基于 PCF 产生紫外 SC 时主要考虑 PCF 结构

和基底材料的选取,PCF 的结构决定了 PCF 的色散特性,选取基底材料时要同时考虑其在紫外波段的透过率、材料色散及非线性效应,因此只有选取合适的 PCF 结构和材料,并不断调节色散参量,才会产生光谱扩展到紫外的 SC。

### 2.1 材料的选取

常用的产生 SC 的 PCF 基底材料有硫化物<sup>[3]</sup>、氟化物<sup>[12]</sup>、碲化物<sup>[13]</sup>,虽然在一定条件下可以产生展宽至紫外的超连续谱,但材料自身的属性使得其在紫外波段的透射率比较小或材料色散比较大,从而易导致产生的紫外光谱的性能比较差。氟化镁是一种重要的无机化工原料和光学材料,具有稳定性高、机械性能好等性质<sup>[14]</sup>,且在紫外波段具有很高的透射性<sup>[15]</sup>,因此材料吸收引起的衰减可忽略;其非线性折射率系数为  $9 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$ <sup>[16]</sup>,比常用基底材料二氧化硅 ( $3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ) 高一个数量级,这会增大 PCF 的非线性效应,从而有利于超连续谱的产生。利用二级 Sellmeier 方程<sup>[17]</sup>计算得到氟化镁在 0.6 μm 处的折射率为 1.377。

### 2.2 PCF 的基本结构

本文基于实心全内反射型 PCF 进行结构研究,所设计的光纤结构如图 1(a)所示,包层由三角晶格周期性排列的空气孔构成,去掉两层内层空气孔,形成的缺陷即为纤芯。其中 Δ 表示空气孔间距,d 表

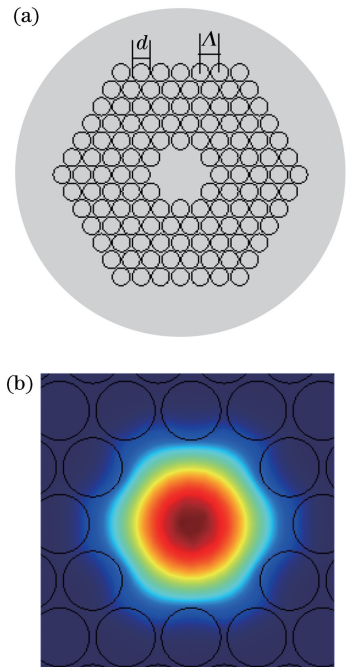


图 1 氟化镁 PCF。(a)结构示意图;(b)基模模场分布图  
Fig. 1 Magnesium fluoride PCF. (a) Schematic of structure; (b) field distribution of fundamental mode

示空气孔直径,包层层数  $N = 5$ 。基底材料为氟化镁晶体(氟化镁的折射率随波长的变化而改变,在仿真计算时取波长  $0.6 \mu\text{m}$  处的折射率为 1.377),空气孔的折射率设为 1。图 1(b)为基模模场分布图,可以看出,电磁波几乎都集中在中间的高折射率的纤芯内,说明 PCF 对光有很好的限制作用。

### 2.3 PCF 结构对色散参数的影响

氟化镁的材料色散系数在紫外波段上是固定的,通过改变占空比  $d/\Lambda$  和空气孔大小就可以方便地调节波导色散的大小,灵活地改变 PCF 的总色散,从而使激发的 SC 扩展到紫外波段。

#### 2.3.1 空气孔直径不变,占空比变化

保持空气孔直径  $d = 600 \text{ nm}$  不变,改变占空比  $d/\Lambda$ ,取值分别为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9,相应的总色散曲线如图 2 所示。

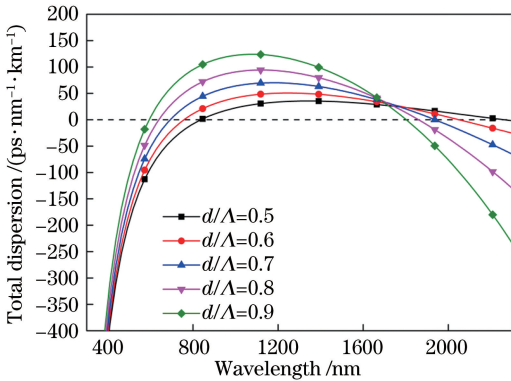


图 2 空气孔直径不变时,总色散与占空比的关系曲线  
Fig. 2 Relationship between the total dispersion and duty ratio when the air hole diameter is constant

由图 2 可以看出,所设计的 PCF 有两个色散零点。保持空气孔的直径不变,增大占空比即减小孔间距,PCF 的色散零点向短波方向移动。为了使产生的超连续谱展开至紫外波段,本文在研究的时候选取更靠近紫外波段的波长作为泵浦光的中心波长,且选取的中心波长靠近色散零点波长时光谱的展宽效果会更好。因此,为了使色散零点尽可能地向外短波方向移动,需要选取大一些的占空比,但同时从工艺的角度考虑,本文选取  $d/\Lambda = 0.9$ 。

#### 2.3.2 占空比不变,空气孔大小改变

保持占空比  $d/\Lambda = 0.9$  不变,改变空气孔大小,取值分别为  $d = 400, 500, 600, 700, 800 \text{ nm}$ ,相应的总色散曲线如图 3 所示。

由图 3 可以得出,当保持占空比不变时,增大孔直径  $d$  即增大孔间距,PCF 的两个色散零点向长波长方向移动。为了使色散零点尽可能地向外短

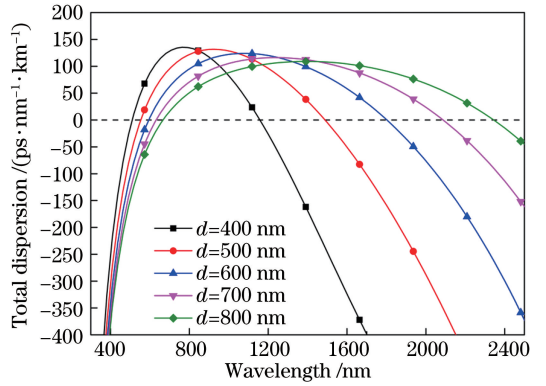


图 3 占空比不变时,总色散与孔直径的关系曲线  
Fig. 3 Relationship between total dispersion and hole diameter when the duty ratio does not change

波方向移动,应该使空气孔直径越小越好,但从工艺制造角度和适合泵浦的激光器光源考虑,本文选取  $d = 500 \text{ nm}$ 。

选取  $d = 500 \text{ nm}$ 、 $d/\Lambda = 0.9$ ,所设计的 PCF 存在两个色散零点,分别为  $550 \text{ nm}$  和  $1480 \text{ nm}$ ,如图 4 所示。为了产生紫外的超连续谱,一般选取靠近短波的色散零点对应的波长为泵浦中心波长或者在反常色散区选取靠近短波的波长为泵浦中心波长,本文选取  $450 \text{ nm}$  为泵浦中心波长。在仿真计算中发现:色散零点随着纤芯的减小向短波方向移动,纤芯直径越小,色散零点的波长越短;选取这样的色散零点对应的波长作为泵浦中心波长,产生的超连续谱易于扩展到紫外短波区域;但纤芯直径过小时会使泵浦光耦合出现困难。因此,综合考虑泵浦光耦合和产生的超连续谱的紫外展宽,选取如图 1(a)所示的纤芯结构,在靠近短波的反常色散区选取泵浦中心波长,产生的超连续谱在紫外波段可以向较短波长延展,同时光纤制备和与泵浦光源的耦合都能实现。

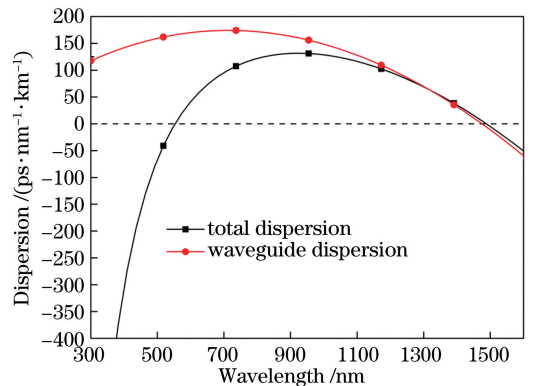


图 4 产生 SC 的波导色散及总色散曲线图  
Fig. 4 Waveguide dispersion and total dispersion for generating SC

### 3 紫外超连续谱产生的数值模拟分析

本文利用广义非线性薛定谔方程描述光脉冲在光纤中的传输情况,采用分布傅里叶算法求解该方程,模拟分析脉冲在光纤中的传输和 SC 的产生。仿真分析时采用无啁啾双曲正割型的飞秒激光器作为泵浦光源,中心波长为 450 nm。超连续谱的产生方法如下:泵浦光脉冲经衰减器和显微镜耦合进

PCF,PCF 输出的光束经聚焦透镜会聚后进入光谱分析仪,用于测量和分析输出光谱。仿真 PCF 参数为  $d=500\text{ nm}$ 、 $d/\Lambda=0.9$ ,分析光纤长度、脉冲功率和初始宽度对产生超连续谱的影响。

#### 3.1 光纤长度对超连续谱的影响

选取脉冲峰值功率  $P=1.5\text{ kW}$ ,脉宽  $T=40\text{ fs}$ ,PCF 长度分别取  $L=2,4,6,8,10\text{ cm}$ ,对应的输出光谱如图 5 所示。

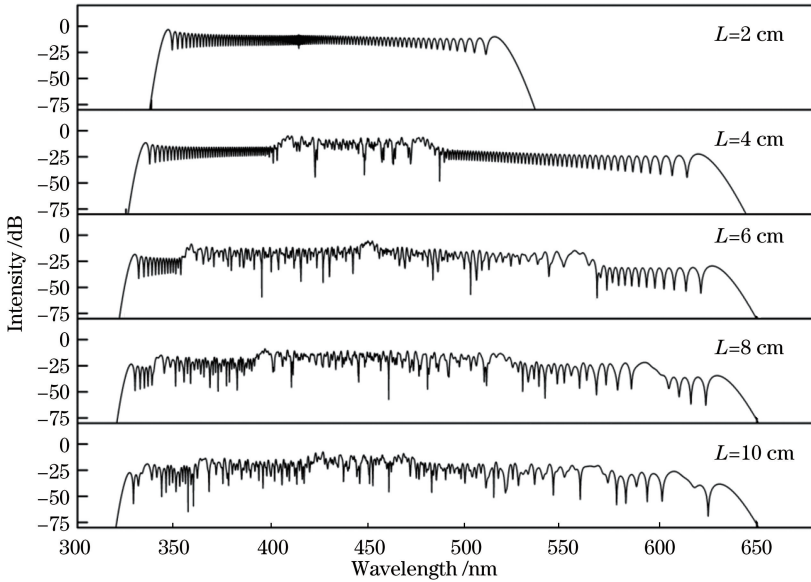


图 5 不同光纤长度时的输出光谱

Fig. 5 Output spectra under different fiber lengths

由图 5 可以看出,随着光纤长度的增加,光谱的展宽也在增加,但长度增加到一定程度后,光谱向短波方向的展宽不再明显,且短波处光谱的平坦性降低,出现明显的振荡峰,这是因为拉曼孤子与色散波通过自相位调制以及四波混频效应同时作用,频谱的展宽也就变得不对称<sup>[18]</sup>。考虑光谱展宽和平坦性,选取  $L=8\text{ cm}$ 。

#### 3.2 初始脉冲宽度对超连续谱的影响

选取脉冲峰值功率  $P=1.5\text{ kW}$ ,PCF 长度  $L=8\text{ cm}$ ,初始脉冲宽度分别为  $T=10,20,30,40,50\text{ fs}$ ,输出的光谱如图 6 所示。

由图 6 可以看出,在选取的 PCF 长度和泵浦峰值功率相同的条件下,随着初始脉冲宽度的逐渐增大,脉冲展宽范围逐渐减小,且随着产生的光谱宽度的减小,光谱的平坦性逐渐下降。因为光谱的展宽与脉冲的初始宽度密切相关,脉冲宽度增大,二阶色散长度增加,非线性长度不变,所以分裂的孤子数目增多,导致频谱中的分裂峰增多<sup>[19]</sup>。通过比较发现: $T=20\text{ fs}$  和  $40\text{ fs}$  时,产生的 SC 的平坦度相对较好;

当  $T=40\text{ fs}$  时短波的平坦度优于  $T=20\text{ fs}$  的,且上升沿的陡峭程度比  $T=20\text{ fs}$  时的大,光谱在短时间内容易生成。综合考虑脉冲的上升沿比较陡峭、形成光谱的平坦度以及展宽范围的程度,选取  $T=40\text{ fs}$ 。

#### 3.3 脉冲峰值功率对超连续谱的影响

选取 PCF 长度  $L=8\text{ cm}$ ,泵浦初始脉冲宽度  $T=40\text{ fs}$ ,光功率  $P=1.6,2.1,2.6,3.1,3.15\text{ kW}$  时的输出超连续光谱如图 7 所示。

由图 7 可知,随着泵浦脉冲的峰值功率的增大,输出的光谱宽度也是增大的,且频谱振荡更剧烈,当峰值功率增大到一定程度时,超连续谱的宽度不再增加。这是因为随着峰值功率的增大,孤子阶数升高,导致不同频率的高阶孤子发生破裂和裂变,产生频率红移的孤子辐射和频率蓝移的非孤子辐射<sup>[20]</sup>。同时可以看出,虽然峰值功率  $P=3.15\text{ kW}$  时,整体光谱没有达到饱和状态,但光谱不再向紫外短波区域展宽,且在这个功率下,光谱出现有剧烈的振荡峰,相比  $P=3.1\text{ kW}$  时,频谱展宽且比较平坦。因此,选取  $P=3.1\text{ kW}$ 。

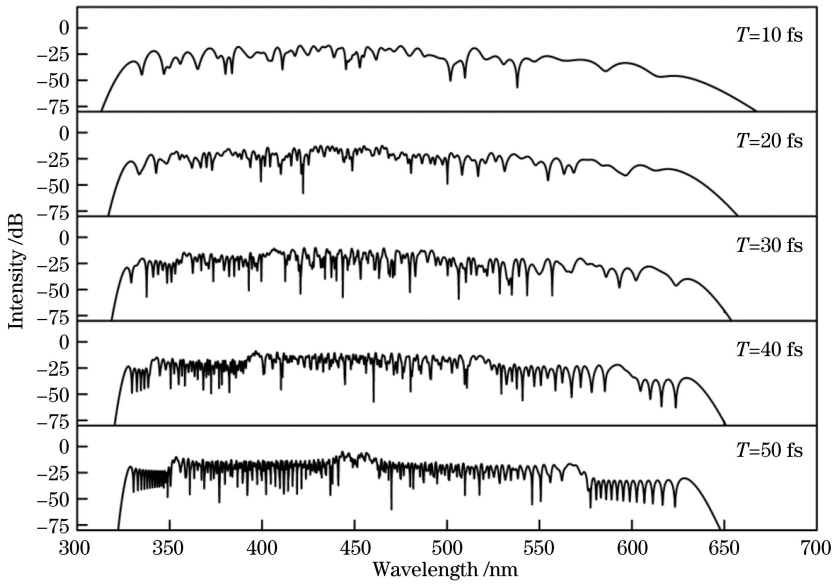


图 6 不同脉冲宽度下的超连续谱

Fig. 6 Supercontinuum spectra under different pulse widths

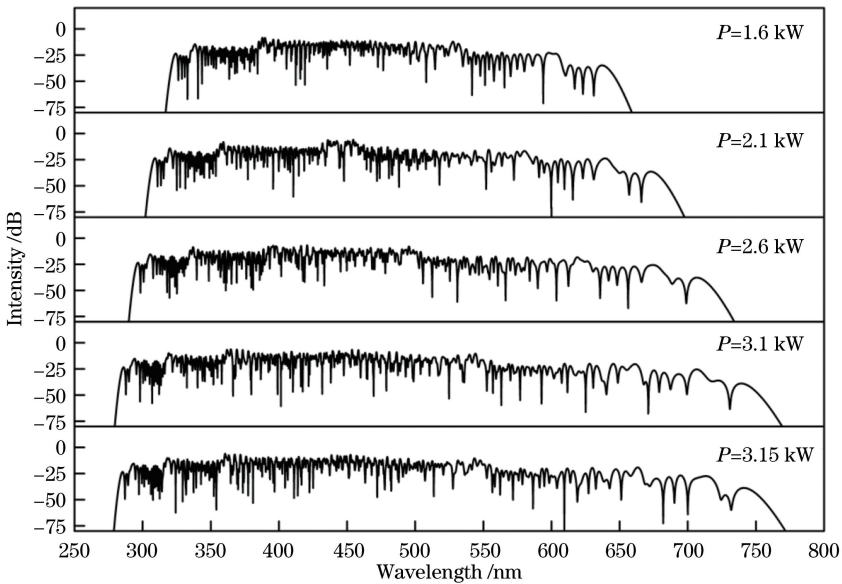


图 7 不同泵浦光的峰值功率下的超连续谱

Fig. 7 Supercontinuum spectra under different pump light power peaks

相比更小纤芯、泵浦中心波长选取在色散零点的超连续谱的数值模拟结果,以上结果基本保证了紫外短波的延展和超连续谱的平坦性,一定程度上降低了泵浦光与光纤的耦合难度,但也相对牺牲了超连续谱在长波方向的扩展。

## 4 结 论

本文选取紫外波段有较高透射率和高非线性折射率的氟化镁晶体作为 PCF 的基底材料,同时设计了双零色散的 PCF。采用分步傅里叶算法求解非线性薛定谔方程,模拟了波长为 450 nm 的无啁啾

双曲正割脉冲在 PCF 中的传输特性,以及影响 SC 产生和频谱特性的各种因素。通过仿真发现,在反常色散区选取中心波长为 450 nm、脉冲峰值功率为 3.1 kW、脉冲宽度为 40 fs 的泵浦光在 PCF 中传输 8 cm 时,超连续光谱的范围可达 279.6~769.0 nm。所设计的 PCF 在紫外光源的需求领域具有广泛的应用价值和前景。

## 参 考 文 献

- [1] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J. Optical properties of high-delta air-silica microstructure

- optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(11): 796-798.
- [2] Champert P A, Couderc V, Leproux P, et al. White-light supercontinuum generation in normally dispersive optical fiber using original multi-wavelength pumping system [J]. *Optics Express*, 2004, 12(19): 4366-4371.
- [3] Omenetto F G, Wolchover N A, Wehner M R, et al. Spectrally smooth supercontinuum from 350 nm to 3  $\mu\text{m}$  in sub-centimeter lengths of soft-glass photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(11): 4928-4934.
- [4] Meng J, Hou L T, Zhou G Y, et al. Fabrication and study on the small-core index-guiding photonic crystal fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(9): 1350-1354.  
孟佳, 侯蓝田, 周桂耀, 等. 小芯径折射率引导型光子晶体光纤的制备和研究 [J]. *中国激光*, 2008, 35(9): 1350-1354.
- [5] Stark S P, Podlipensky A, Joly N Y, et al. Ultraviolet-enhanced supercontinuum generation in tapered photonic crystal fiber [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(3): 592-598.
- [6] Han Y, Hou L T, Yuan J H, et al. Ultraviolet continuum generation in the fundamental mode of photonic crystal fibers [J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(1): 014201.
- [7] Yuan J, Sang X, Yu C, et al. Efficient third harmonic generation from visible to deep ultraviolet wavelength in a photonic crystal fiber [J]. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 2013, 7(1/2): 18-21.
- [8] Yan B B, Yuan J H, Sang X Z, et al. Combined nonlinear effects for UV to visible wavelength generation in a photonic crystal fiber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(5): 050603.
- [9] Wang N, Chen S P, Qi X, et al. Ultraviolet-extended flat supercontinuum generation in seven-core photonic crystal fiber [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(2): 026110.
- [10] Qi X, Chen S P, Li Z H, et al. High-power visible-enhanced all-fiber supercontinuum generation in a seven-core photonic crystal fiber pumped at 1016 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1019-1022.
- [11] Li Z X, Gong C, Hua L Q, et al. Supercontinuum generation in calcium fluoride crystals using high-intensity femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508021.  
李子熙, 龚成, 华林强, 等. 强飞秒激光在氟化钙晶体中产生的超连续谱 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508021.
- [12] Qin G S, Yan X, Kito C, et al. Supercontinuum generation spanning over three octaves from UV to 3.85  $\mu\text{m}$  in a fluoride fiber [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 2015-2017.
- [13] Feng X. Broadband infrared supercontinuum generation in hexagonal-lattice tellurite photonic crystal fiber with dispersion optimized for pumping near 1560 nm: comment [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2240.
- [14] Wang L P, Han P D, Xu B S. Research progress on application of magnesium fluoride crystals [J]. *Materials Review*, 2013, 27(9): 38-41.  
王丽平, 韩培德, 许并社. 氟化镁晶体的应用研究进展 [J]. *材料导报*, 2013, 27(9): 38-41.
- [15] Xue C R, Yi K, Qi H J, et al. Optical constants of fluoride films in the DUV range [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(7): 5035-5040.  
薛春荣, 易葵, 齐红基, 等. 氟化物材料在深紫外波段的光学常数 [J]. *物理学报*, 2009, 58(7): 5035-5040.
- [16] Ghanbari A, Kashaninia A, Sadr A, et al. Supercontinuum generation for optical coherence tomography using magnesium fluoride photonic crystal fiber [J]. *Optik*, 2017, 140: 545-554.
- [17] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics* [M]. Jia D F, Yu Z H, Tan B, et al., Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.  
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [18] Liu S L, Chen D N, Liu W, et al. Supercontinuum generation based on all normal dispersion photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(18): 184210.  
刘双龙, 陈丹妮, 刘伟, 等. 基于全正色散光子晶体光纤的超连续谱光源 [J]. *物理学报*, 2013, 62(18): 184210.
- [19] Wang Z W, Zhang X J. Generation of supercontinuum in anomalous dispersion photonic crystal fiber [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2016, 12(33): 254-255.  
王振威, 张晓娟. 反常色散光子晶体光纤中超连续谱的产生 [J]. *电脑知识与技术*, 2016, 12(33): 254-255.
- [20] Schreiber T, Limpert J, Zellmer H, et al. High average power supercontinuum generation in photonic crystal fibers [J]. *Optics Communications*, 2003, 228(1/2/3): 71-78.