

引用格式: YU Haihu, WU Jianwen, MA Yue, et al. Generation of Visible to Near-infrared Supercontinuum in Highly-nonlinear Photonic Crystal Fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(9):0906001

余海湖, 吴建文, 马悦, 等. 高非线性光子晶体光纤中可见光至近红外超连续谱的产生[J]. 光子学报, 2022, 51(9):0906001

高非线性光子晶体光纤中可见光至近红外超连续谱的产生

余海湖, 吴建文, 马悦, 杨小涛, 郑羽

(武汉理工大学 光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 武汉 430070)

摘要: 基于光子晶体光纤的色散设计, 制备了零色散点位于 880 nm、泵浦波长处非线性系数为 $33.67 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 的实芯光子晶体光纤。使用 1 030 nm, 150 fs 的超快光源, 研究了在不同泵浦功率和不同光纤长度下, 从可见光至近红外区的超连续谱的产生过程。在 1 320 mW 的平均泵浦功率下, 使用 1.5 m 长的光子晶体光纤, 实现了从 450 nm 到 1 900 nm 的宽带超连续谱输出。光谱具有较好的平坦度和相干性。这类宽带超连续光源在光学相干层析成像、光谱学、通信、早期癌症检测和食品质量监测等领域具有应用价值。

关键词: 光子晶体光纤; 超连续谱; 高非线性; 色散; 飞秒脉冲

中图分类号: O437

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225109.0906001

0 引言

超连续(Supercontinuum, SC)是指在介质中传输的超短脉冲在多种非线性效应作用下, 脉冲频谱展宽的现象^[1-2]。超连续谱的产生可以大大拓宽光信号的频谱, 通常达到几十纳米到几百纳米的范围。此外, 超连续谱光具有超亮度、宽带和空间相干性等优点。因此, 它在光频率计算、光通信、光学相干断层扫描和生物医学科学等许多领域都有潜在的应用^[3-6]。

1976年, 在染料激光器产生的纳秒脉冲中首次观察到光纤中的超连续谱^[7], 但其超连续谱的波长范围较短, 且所需要的泵浦功率较高, 光子晶体光纤的出现弥补了这些不足^[8]。光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)是一种光纤截面具有二维周期性折射率变化并沿光纤轴向无限延伸的特殊光纤^[9]。由于纤芯和包层之间折射率对比度的变化, 光子晶体光纤具有许多独特的光学特性, 包括无截止单模传输、高非线性和色散可调等^[1, 10-11]。光子晶体光纤的结构可设计性和独特的光学特性, 使其在光纤通信、光纤传感以及超连续谱的产生等方面都发挥着重要作用^[12-14]。

自光子晶体光纤产生以来, 科研人员就对光子晶体光纤中超连续谱的产生进行了大量研究, 特别是可见光至近红外超连续谱。2003年闫培光等^[15]通过钛宝石飞秒激光器泵浦 2 m 长的光子晶体光纤, 获得谱宽超过 550 nm 的超连续谱。2008年刘卫华等^[16]使用钛宝石激光器泵浦高非线性保偏光子晶体光纤, 获得输出功率 170 mW, 范围从 420~1 700 nm 且平坦度较好的输出光谱。2014年 CHEN H 等^[17]将光纤激光器与适当设计的二氧化硅多芯光子晶体光纤相结合, 获得了宽光谱范围的超连续谱。2017年 SU N 等^[18]自制全光纤皮秒脉冲光纤放大器泵浦 10 m 长的七芯光子晶体光纤, 输出的超连续谱波长范围为 620~1 700 nm, 输出功率为 11.7 W。2019年陈兰剑等^[19]利用掺铈光纤和掺镱光纤混合增益实现了覆盖 600~1 700 nm, 且输出功率为 3.45 W 的超连续谱输出。从上述研究可以发现, 对于超连续谱的产生, 激发条件以及优化和调节其平坦度和谱宽一直都是研究热点, 特别是在工程应用上有很多具体的需求。尽管对光子晶体光纤中可见光至近红外超连续谱的研究已取得一定进展, 但所报道的光谱展宽幅度依然有限, 且所需光纤长度相对较长。

基金项目: 国家自然科学基金(No. 52072277)

第一作者: 余海湖(1963—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为特种光纤及传感器。Email: hhyu@whut.edu.cn

通讯作者: 郑羽(1989—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为微结构光纤及传感技术。Email: zhengyu0816@whut.edu.cn

收稿日期: 2022-01-12; 录用日期: 2022-04-12

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

所以为了提高光谱谱宽,使其能够具有更高的应用价值,本文从理论和实际光纤制备角度分析了光纤结构参数对其色散的影响,自主设计并制备得到不同高非线性的光子晶体光纤,使用飞秒激光脉冲泵浦高非线性光子晶体光纤,在低泵浦功率上即实现输出光谱的展宽。本文还进一步研究了不同入射脉冲功率和不同光纤长度对超连续谱的影响,最终得到具有较好平坦度和相干性的可见光至近红外区的宽带超连续谱输出。

1 光子晶体光纤的设计与制备

光子晶体光纤的色散和非线性系数是影响光纤中脉冲传输的两个重要因素。色散是指光波在光纤中以不同的模式和频率传输时,因为传播速度不同而导致脉冲展宽的现象。光子晶体光纤的色散包括材料色散与波导色散。石英玻璃材料在 1 030 nm 波长处的材料色散非常小,可忽略不计。波导色散随光纤结构的变化而变化,可表示为^[20]

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

式中, λ 表示入射光波长; c 表示真空中的光速; $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 表示有效模式折射率实部。

当脉冲在光纤中传输时,光纤的非线性系数 γ 对光谱的展宽也极为重要,可表示为^[20]

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

式中, $n_2 = 2.73 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$,表示石英玻璃材料的非线性折射率系数, A_{eff} 表示有效模场面积,可表示为^[21]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\iint |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint |E(x, y)|^4 dx dy} \quad (3)$$

式中, $E(x, y)$ 表示横向电场分布。从式(2)可以看出,有效模场面积越小,非线性系数越大,因此对于石英玻璃光纤可以通过减小有效模场面积,即改变光纤结构来调控非线性系数的大小。

无论是在传统光纤还是光子晶体光纤中,色散在非线性过程中都起着重要作用。与传统的石英玻璃光纤不同,光子晶体光纤的色散调制更加灵活。通过调整空气孔间距 Λ 和空气孔直径 d ,可以很容易地控制空气填充率,从而改变纤芯-包层折射率差和纤芯的尺寸,获得理想的色散。

图 1(a)为保持光纤纤芯直径 $d_{\text{core}} = 5 \mu\text{m}$ 不变时,改变占空比 d/Λ 得到的相应色散曲线。由图可知,当纤芯直径不变时,增大占空比,零色散点向短波方向移动,并且随着占空比的增加,偏移变慢,这是由于大的占空比增加了纤芯和包层的折射率差,导致波导色散的变化,从而使总色散曲线发生位移,同时光纤对光的束缚能力加强,有效模场面积减小,使非线性效应增强。当占空比增大到一定程度时(例如 $d/\Lambda = 0.9$),纤芯和包层的折射率差将不再发生显著变化。

图 1(b)为保持占空比 $d/\Lambda = 0.9$ 不变时,改变纤芯直径得到的相应色散曲线。由图可知,纤芯直径从 $5 \mu\text{m}$ 逐渐减小到 $1.5 \mu\text{m}$ 时,调制程度随着纤芯直径的减小变得更加剧烈,零色散点由 $1 050 \text{ nm}$ 向短波方

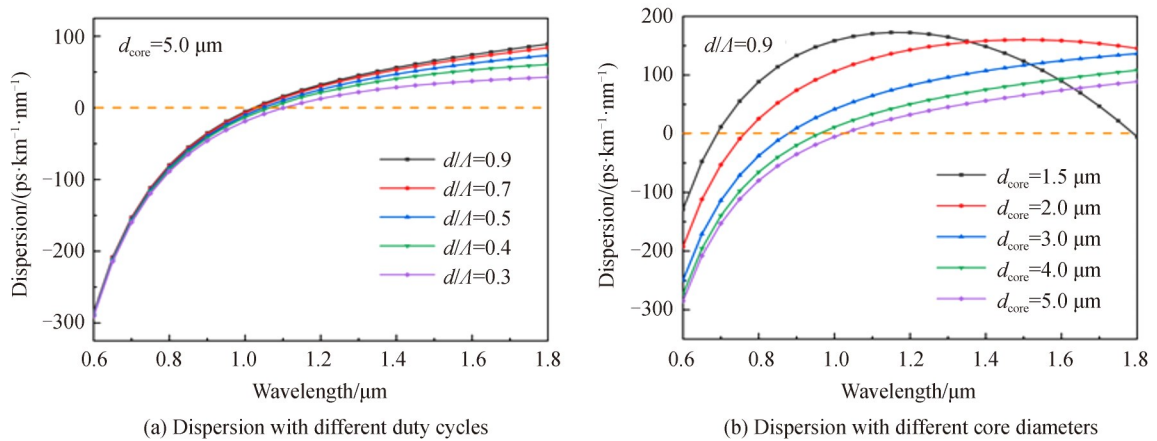


图 1 结构参数对色散特性的影响

Fig. 1 The influence of structural parameters on dispersion characteristics

向移动至 700 nm,同时在长波长 1 790 nm 处,出现第二个零色散点。所以保持占空比在一定数值时,减小纤芯直径可以有效使零色散点向短波长方向移动。

通过分析结构参数对色散特性的影响,并根据实际情况对光子晶体光纤进行设计,得到的光子晶体光纤结构设计图如图 2,由图可知,所设计的光子晶体光纤纤芯直径为 3 μm,空气孔直径为 2.21 μm,空气孔间距为 2.6 μm。

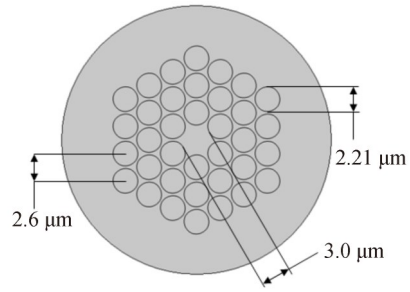


图 2 光子晶体光纤结构设计图
Fig. 2 Structure design of photonic crystal fiber

堆拉法制备光子晶体光纤的技术比较成熟,本文采用堆拉法制备光子晶体光纤。如图 3 所示,光子晶体光纤的制备工艺流程主要由三个步骤组成。如图 3(a),首先按照光纤端面结构将 36 根毛细管和 1 根石英玻璃棒进行堆栈,形成空气-石英玻璃结构,所用的毛细管和石英玻璃棒直径均为 2.5 mm,其中纤芯为石英玻璃棒,包层为毛细管按每层 6 根、12 根、18 根的排列进行堆叠形成。再将堆栈结构插入石英玻璃套管中,套管两端通过氧乙炔火焰进行烧结密封,确保毛细管和石英玻璃棒处于正确位置。如图 3(b),将石英玻璃套管保护的堆栈结构放入拉丝塔进行第一步拉丝,得到尺寸缩小至原始尺寸十分之一左右的中间体预制棒。再将中间体预制棒插入另一石英玻璃套管中,增加包层厚度与强度,便于拉丝过程中的气压和温度控制,得到最终的光纤预制棒。如图 3(c),将最终的光纤预制棒放入拉丝塔进行拉丝,得到所需光子晶体光纤,在拉丝过程中,可以通过控制压力与温度来调整空气孔直径。

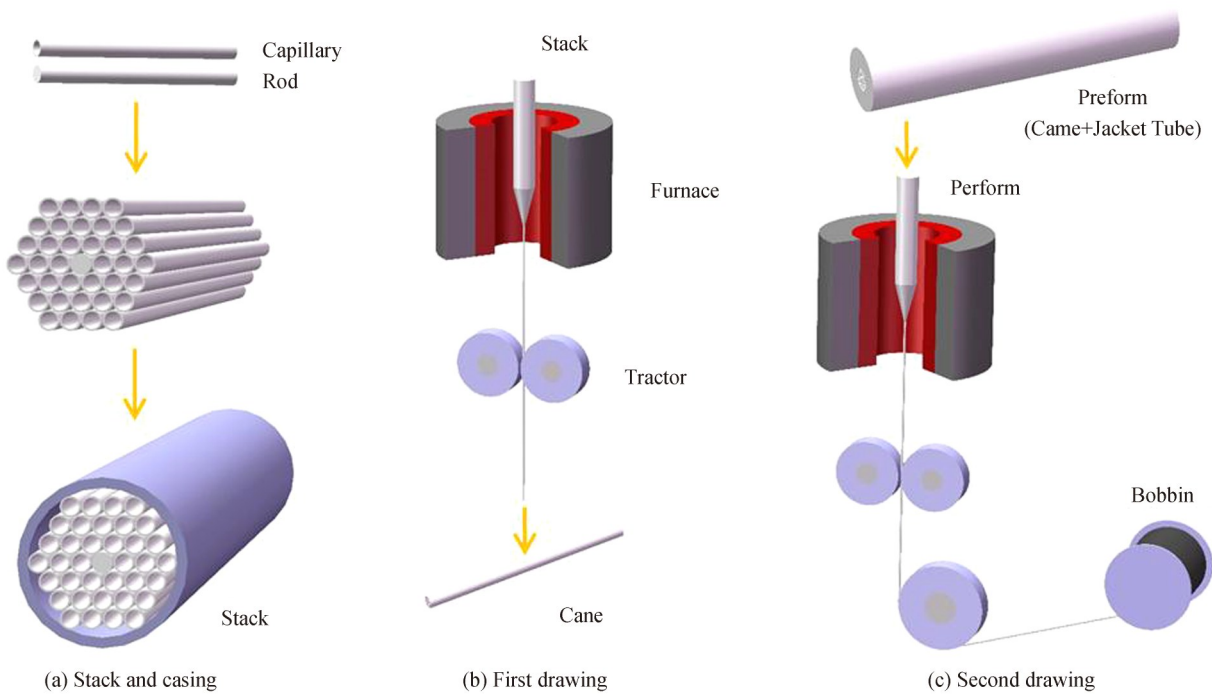


图 3 光子晶体光纤制备流程
Fig. 3 Flow of photonic crystal fiber preparation

在光纤设计的基础上,从工艺和适合泵浦激光器光源的角度考虑,采用上述堆拉法制备得到了一种纤芯较小、包层为三层空气孔结构的光子晶体光纤。图 4 为该光子晶体光纤的扫描电子显微照片和矢量化模型图,其纤芯直径为 3.03 μm,内包层空气孔直径为 2.74 μm,空气孔间距为 3.09 μm。通过与图 2 比较可发现,制备所得到的光子晶体光纤各项尺寸参数均稍大于所设计的光纤结构尺寸参数,且得到的空气孔尺寸大小不均匀,其原因是堆栈结构中各毛细管之间存在间隙以及中间体预制棒和套管之间存在间隙。采用等效面积法,将包层的空气填充率 f 取为 $f = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\pi/6\right)\left(d/\Delta\right)^2$ ^[22],计算出空气填充系数为 71.3%。光纤损耗采用截断法测试为 ~9 dB/km。由于超连续谱实验所用光纤长度为米量级,故损耗对实验影响不大。

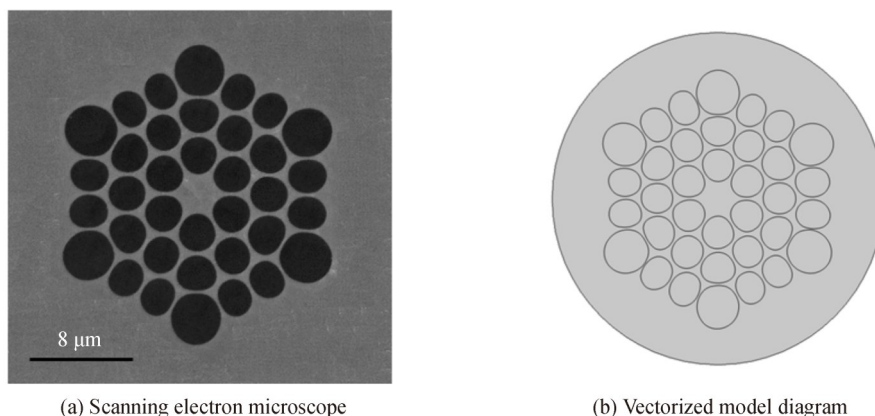


图4 光子晶体光纤横截面
Fig. 4 Cross section of PCF

使用有限元分析方法对光子晶体光纤的色散、有效模场面积和非线性系数进行计算。图5(a)为光子晶体光纤色散随波长的变化曲线。由图可知,波长在600~2 000 nm范围时,色散曲线呈现单调递增趋势,光纤的零色散点位于880 nm。图5(b)为光子晶体光纤有效模场面积和非线性系数随波长的变化曲线。由图可知,有效模场面积随波长增大而增大,而非线性系数随波长增大而减小,在泵浦波长1 030 nm处,光子晶体光纤的有效模场面积为 $4.72 \mu\text{m}^2$,非线性系数为 $33.67 \text{ km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$,该光子晶体光纤具有较小的模场面积和高非线性。

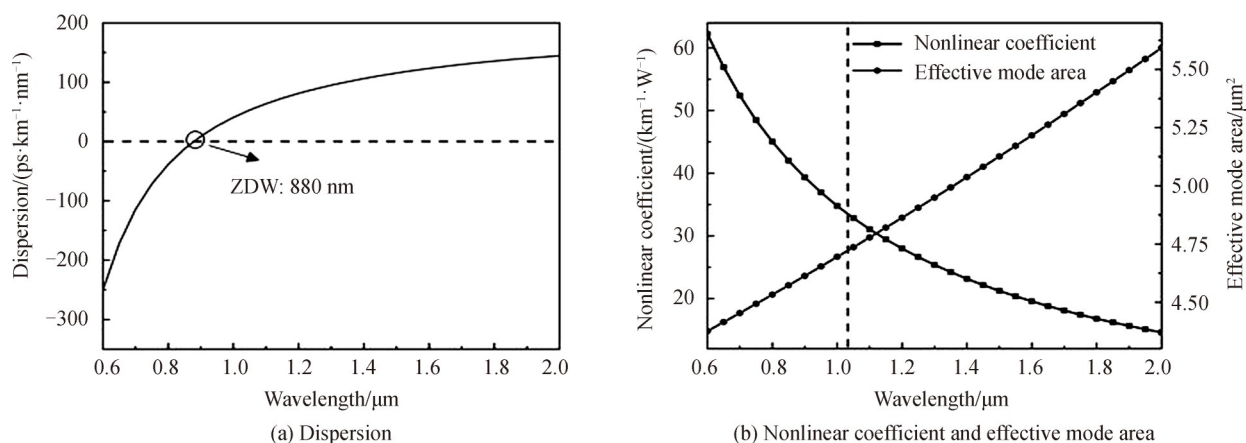


图5 光子晶体光纤特性参数随波长的变化
Fig. 5 Variation of photonic crystal fiber characteristic parameters as a function of the wavelength

2 超连续谱的产生与分析

实验中采用的泵浦光源为飞秒脉冲光纤激光器,其中心波长在1 030 nm,最大平均功率为5 W,脉冲宽度为150 fs,重复频率为70 MHz,脉冲偏振态为线偏振。超连续谱产生的实验装置如图6,空间光路的输出

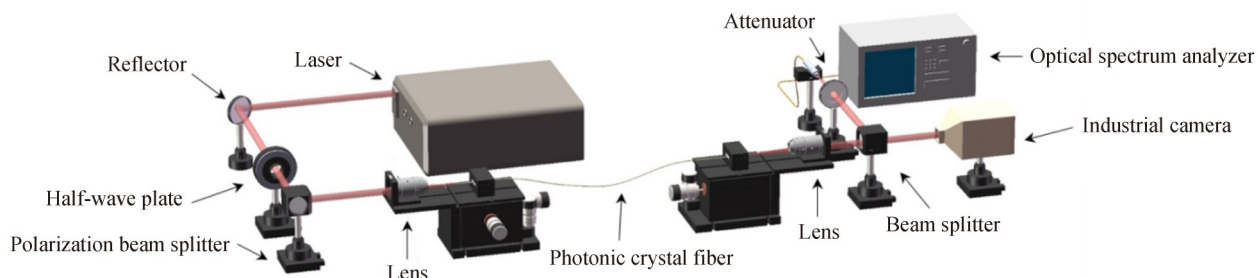


图6 实验装置
Fig. 6 The experimental setup

激光经反射镜反射后,依次通过半波片和偏振分束器,再经合适 NA 的透镜耦合到光子晶体光纤中。输出光通过分束器使一部分光进入相机,便于观察光斑位置,确保脉冲光耦合进光纤纤芯,另一部分输出光进入光谱分析仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA) 进行光谱测量。

如图 7 所示,为了优化耦合效率,测试了低功率下输出功率随入射功率的变化曲线,通过对测量数据进行线性拟合,测得低功率下耦合效率为 52.7%。

图 8(a) 为相机拍摄的纤芯近场像。由图可知,随着泵浦功率增大,在可见光波段,光斑颜色由红色逐渐变为绿色。图 8(b) 为光纤长度 0.5 m 时,不同入射脉冲功率下的光谱变化。当泵浦功率较低时,非线性效应并不明显。当平均泵浦功率达到 120 mW 时,在近红外波长范围内,受孤子

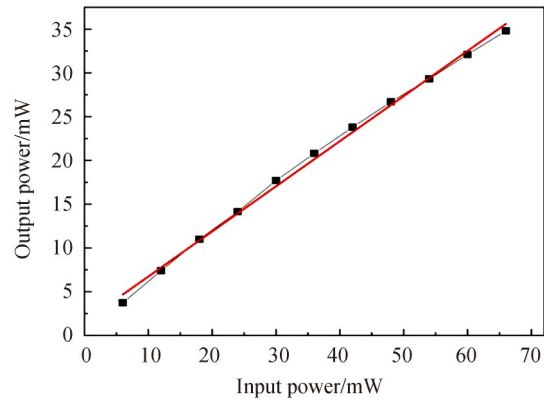
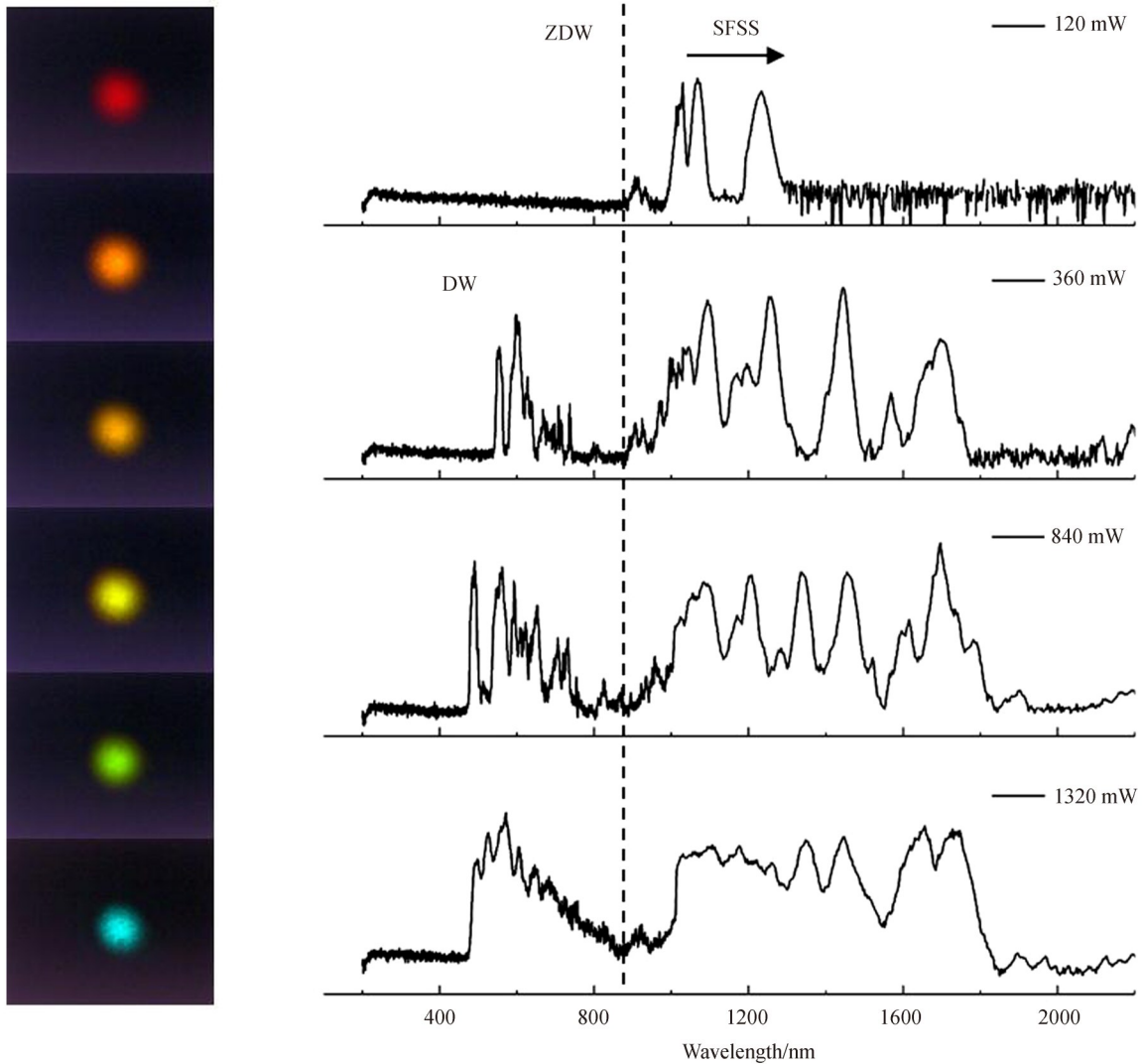


图 7 超连续谱的输出功率随输入功率的变化

Fig. 7 Variation of the output power of supercontinuum as a function of the input power



(a) Spot photos with different pump powers

(b) Supercontinuum spectra with different pump powers

图 8 超连续谱随平均泵浦功率的变化

Fig. 8 Variation of supercontinuum as a function of the average pump power

效应的影响,在入射脉冲中心波长附近出现红移频谱,色散和自陡峭效应导致了频谱的不对称性,而在短波长范围内,由于脉冲中心波长离光纤零色散波长较远,高阶色散的扰动较弱,孤子与色散波无法满足相位匹配条件,短波段色散波尚未产生。当平均泵浦功率达到 360 mW 时,输出光谱在近红外波长范围内继续向长波方向移动,在可见光波长范围内 620 nm 附近出现色散波,其主要原因是随着平均泵浦功率增大,发生高阶孤子裂变,由孤子分裂得到的基阶孤子在拉曼散射作用下发生孤子红移,出现多峰结构,多余能量通过相位匹配转移给色散波,从而产生短波方向的频谱。当平均泵浦功率达到 840 mW 时,长波成分拓展至 1 860 nm,在可见光范围内,色散波强度增加,光谱展宽至 480 nm,其原因是随着泵浦功率的进一步增大,高阶孤子裂变和色散波所引起的频谱效应更加显著,孤子和色散波使光谱更宽更平坦。当平均泵浦功率达到 1 320 mW 时,光谱进一步平坦化,但展宽程度变化不大,接近饱和,获得展宽范围从 475 nm 到 1 870 nm 的超连续谱。

入射脉冲的平均功率为 1 320 mW 时,随着光纤长度增加,输出光谱的变化如图 9。由图可知,随着光纤长度的增加,输出光谱逐渐展宽,一定波长范围内超连续谱的平坦度得到提高。当光纤长度为 0.2 m 时,脉冲在光纤中的传输距离较短,非线性没有足够积累,光谱展宽较少,输出光谱范围为 1 210 nm 左右,输出光谱较不平坦。当光纤长度达到 0.5 m 时,1 040~1 260 nm 范围内的光谱强度波动减小,平坦度有所提高,同时光谱得到进一步展宽,光谱展宽达 1 370 nm,主要是由于光纤长度增大,高阶非线性效应和高阶色散会共同作用于高阶孤子,使其分裂成若干个基阶孤子,拉曼散射引起的孤子自频移效应使得基阶孤子向长波方向红移,同时满足相位匹配条件的孤子会将能量转移至短波长区间,形成色散波,孤子与色散波共同作用使频谱得到进一步展宽。当光纤长度继续增大至 1.5 m 时,非线性效应得到充分激发,分裂的孤子数目增多,使得频谱的分裂峰增多,1 040~1 260 nm 与 1 470~1 730 nm 波长范围内的光谱平坦性得到进一步提高,获得从 450 nm 到 1 900 nm 的宽带超连续谱。

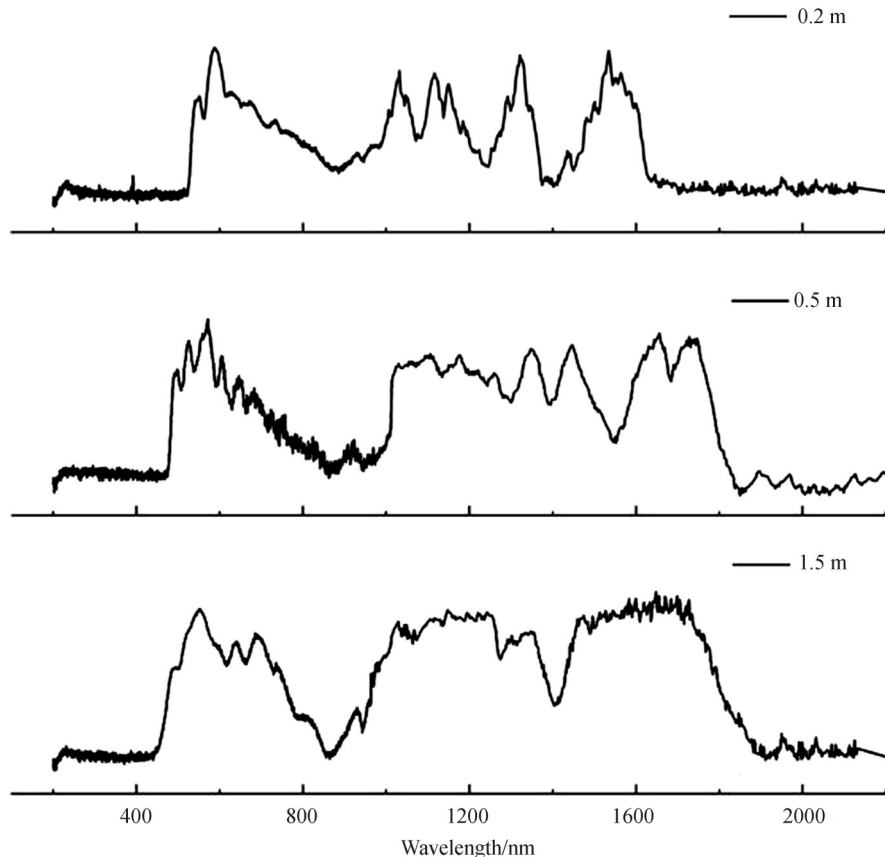


图 9 不同光纤长度下的超连续光谱
Fig. 9 Supercontinuum spectra with different fiber lengths

表1列举了近年来一些国内外课题组关于使用不同类型光子晶体光纤产生可见光至近红外超连续谱的报道。表1列举的研究成果中,长波长可达1 750 nm,短波长可至350 nm,最大展宽范围在420~1 700 nm。而本文工作最终在1.5 m长的光纤中实现了450~1 900 nm的展宽,光谱展宽范围有了一定的提高,且在一定波长范围内光谱具有较好的平坦性。

表1 PCF中超连续谱的产生
Table 1 Supercontinuum generation in PCF

Researcher	Time	Optical fiber type	Pump source parameters	Spectral range/nm
YAN Peiguang ^[15]	2003	Large numerical aperture PCF	200 fs, 790 nm	350~900
HILLIGSØE K ^[23]	2004	Double zero dispersion point PCF	40 fs, 790 nm	600~1 400
LEONG J ^[24]	2006	Dispersion displacement PCF	300 fs, 1 060 nm	500~1 600
LIU Weihua ^[16]	2008	Highly nonlinear PCF	80 fs, 800 nm	420~1 700
GUO C ^[25]	2010	PCF	CW, 1 070 nm	1 050~1 470
ZHAO Wei ^[26]	2011	Highly nonlinear PCF	350 ps, 1 050 nm	500~1 700
LI Bin ^[27]	2012	Air filled PCF	85 fs, 1 040 nm	650~1 750
SUN Chang ^[28]	2014	PCF	20 ps, 1 060 nm	500~1 700
CHEN H ^[17]	2014	Seven-core PCF	13 ps, 1 060 nm	750~1 700
SU N ^[18]	2017	Seven-core PCF	221 ps, 1 150 nm	620~1 700
ZHAO Lei ^[29]	2017	PCF	12 ps, 1 060 nm	460~1 700
DONG Kegong ^[30]	2018	PCF	ps, 1 010 nm	665~1 750

3 结论

通过分析光子晶体光纤结构对波导色散的影响,得到了优化的光纤参数并制备了零色散点在880 nm的实芯光子晶体光纤。该光纤在1 030 nm处的非线性系数和有效模场面积分别为 $33.67 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $4.72 \mu\text{m}^2$ 。使用1 030 nm飞秒光源泵浦,通过改变泵浦功率和光纤长度,研究了超连续谱的展宽。在耦合至光纤中1 320 mW的平均功率下,从1.5 m长的光子晶体光纤中获得了光谱范围为450~1 900 nm的超连续谱,光谱具有较好的平坦度和相干性。这种超连续谱有望应用于光学相干层析成像、光谱学、通信、早期癌症检测和食品质量监测等领域。

参考文献

- [1] RUSSELL P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358-362.
- [2] DUDLEY J, GENTY G, COEN S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Review of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [3] MOHAMMADZADEHASL N, NOORI M. Design of low-loss and near-zero ultraflattened dispersion PCF for broadband optical communication[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2019, 35: 100703.
- [4] GUO Y, YUAN J, WANG K, et al. Generation of supercontinuum and frequency comb in a nitrobenzene-core photonic crystal fiber with all-normal dispersion profile[J]. *Optics Communications*, 2021, 481(4): 126555.
- [5] PORSEZIAN K, RAJA R. Soliton fission and supercontinuum generation in photonic crystal fibre for optical coherence tomography application[J]. *Pramana*, 2015, 85(5): 993-1007.
- [6] LABRUYERE A, TONELLO A, COUDERC V, et al. Compact supercontinuum sources and their biomedical applications[J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(5): 375-378.
- [7] LIN C, STOLEN R. New nanosecond continuum for excited-state spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 28(4): 216-218.
- [8] RANKA J, WINDELER R, STENTZ A. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(1): 25-27.
- [9] KNIGHT J. Photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 847-851.
- [10] WRIGHT A, GIRKIN J, GIBSON G, et al. Transfer of orbital angular momentum from a super-continuum, white-light beam[J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9495-9500.
- [11] YUE Y, LIN Z, YAN Y, et al. Octave-spanning supercontinuum generation of vortices in an As_2S_3 ring photonic crystal fiber[J]. *Optics Letter*, 2012, 37(11): 1889-1891.
- [12] LAVANYA A, GEETHA G. A novel hybrid hexagonal photonic crystal fibre for optical fibre communication[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 59(24): 102321.

- [13] VIGNESWARAN D, AYYANAR N, SHARMA M, et al. Salinity sensor using photonic crystal fiber[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2018, 269: 22–28.
- [14] ALKESKJOLD T, LAURILA M, WEIRICH J, et al. Photonic crystal fiber amplifiers for high power ultrafast fiber lasers[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5–6): 369–381.
- [15] YAN Peiguang, RUAN Shuangchen, DU Chenlin, et al. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber pumped by femtosecond pulses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(11): 1299–1301.
闫培光, 阮双琛, 杜晨林, 等. 飞秒脉冲作用下光子晶体光纤超连续谱的产生[J]. *光子学报*, 2003, 32(11): 1299–1301.
- [16] LIU Weihua, SONG Xiaozhong, WANG Yishan, et al. Experimental research of supercontinuum generation by femtosecond pulse in highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(2): 917–922.
刘卫华, 宋啸中, 王屹山, 等. 飞秒激光脉冲在高非线性光子晶体光纤中产生超连续谱的实验研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(2): 917–922.
- [17] CHEN H, WEI H, LIU T, et al. All-fiber-integrated high-power supercontinuum sources based on multi-core photonic crystal fibers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 64–71.
- [18] SU N, LI P, XIAO K, et al. Supercontinuum generation in seven-core photonic crystal fiber pumped by a broadband picosecond pulsed fiber amplifier[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(7): 074210.
- [19] CHEN Lanjian, SONG Rui, HOU Jing. Visible to near-infrared supercontinuum generated by random fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1136001.
陈兰剑, 宋锐, 侯静. 随机光纤激光器输出可见光至近红外波段超连续谱[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1136001.
- [20] XU H, WU J, XU K, et al. Ultra-flattened chromatic dispersion control for circular photonic crystal fibers[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(5): 055405.
- [21] KUBAT I, AGGER C, MØLLER U, et al. Mid-infrared supercontinuum generation to 12.5 μm in large NA chalcogenide step-index fibres pumped at 4.5 μm [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19169–19182.
- [22] YANG P, DAI S, YI C, et al. Design and performance of mid-IR dispersion in photonic crystal fiber prepared from a flattened chalcogenide glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(1): 014210.
- [23] HILLIGSØE K, ANDERSEN T, PAULSEN H, et al. Supercontinuum generation in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths[J]. *Optics Express*, 2004, 12(6): 1045–1054.
- [24] LEONG J, PETROPOULOS P, PRICE J, et al. High-nonlinearity dispersion-shifted lead-silicate holey fibers for efficient 1- μm pumped supercontinuum generation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 183–190.
- [25] GUO C, RUAN S, YAN P, et al. Flat supercontinuum generation in cascaded fibers pumped by a continuous wave laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11046–11051.
- [26] ZHAO Wei, HU Xiaohong, WANG Yishan, et al. Advances in high-power all-fiber supercontinuum laser technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(11): 219–219.
赵卫, 胡晓鸿, 王屹山, 等. 高功率全光纤超连续谱激光技术进展[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 219–219.
- [27] 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.
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.
- [28] SUN Chang, GE Tingwu, LI Siyuan, et al. 67.9 W high power all-fiber white-light supercontinuum laser source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(12): 1–2.
孙畅, 葛廷武, 李思源, 等. 67.9 W 高功率全光纤白光超连续谱激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(12): 1–2.
- [29] ZHAO Lei, LI Chao, LI Yue, et al. Hundred-watt-level supercontinuum spectrum generation based on photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 189–193.
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.
- [30] DONG Kegong, ZHANG Haoyu, LI Yue, et al. Generation of 563 W all-fiber white-light supercontinuum source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(10): 7–8.
董克攻, 张昊宇, 黎玥, 等. 全光纤白光超连续谱实现 563 W 输出[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(10): 7–8.

Generation of Visible to Near-infrared Supercontinuum in Highly-nonlinear Photonic Crystal Fiber

YU Haihu, WU Jianwen, MA Yue, YANG Xiaotao, ZHENG Yu

(National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technology and Networks, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Supercontinuum refers to the phenomenon that the spectrum of a high power pulse transmitted in

a nonlinear medium is broadened by a variety of nonlinear effects. The generation of supercontinuum can greatly broaden the spectrum of optical signals, usually to the range of tens to hundreds of nanometers. In addition, supercontinuum light has the advantages of super brightness, wide band, high stability and high spatial coherence. Therefore, it has great application value in many fields, such as optical frequency calculation, optical communication, optical coherence tomography and biomedical science. In 1976, the supercontinuum in fiber was observed for the first time in nanosecond pulses generated by dye lasers, but the band coverage of the supercontinuum is narrow and the pump power required is high. The photonic crystal fiber made up for these deficiencies. Photonic crystal fiber, also known as microstructured fiber, is a special fiber whose cross section has two-dimensional periodic refractive index variation and extends indefinitely along the fiber axis. Photonic crystal fibers exhibit many special optical properties due to the variation of refractive index contrast between core and cladding. Photonic crystal fiber plays an important role in optical fiber communication, optical fiber sensing, meteorology, medical imaging and supercontinuum generation due to its flexible structure and special optical properties. Photonic crystal fiber can obtain the position of zero dispersion point at the desired wavelength by adjusting the structure, thus generating supercontinuum spectrum based on various nonlinear effects. For the generation of supercontinuum in photonic crystal fibers, the excitation conditions and the optimization and adjustment of its flatness and spectrum width have always been the focus of research. Especially in engineering applications, supercontinuum has many specific requirements. Although some progress has been made in the study of visible to near-infrared supercontinuum in photonic crystal fibers, the reported spectrum broadening is still limited and the required fiber length is relatively long. In order to improve the spectral width and make it have higher application value, in this work, based on the simulation calculation to explore the influence of optical fiber air hole structure size on dispersion, the optimized optical fiber structure geometric parameters are obtained. After independently designing the optical fiber, a kind of solid-core photonic crystal fiber with high nonlinearity is obtained by using the stack method. The full vector finite element method was used to simulate the photonic crystal fiber, and the zero dispersion point of the photonic crystal fiber was obtained at 880 nm. At the pump wavelength, the photonic crystal fiber has a nonlinear coefficient of $33.67 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ and an effective mode field area of $4.72 \mu\text{m}^2$. Through the establishment of a supercontinuum experimental device, a 1 030 nm, 150 fs linear polarization ultrafast fiber source is coupled into the photonic crystal fiber, and the coupling efficiency is 52.7% at low power. The generation process of supercontinuum from visible to near infrared region is studied under different pump power and different optical fiber length. It can be seen from the analysis that when the average pumping power increases in 0.5 m long photonic crystal fiber, the output spectrum broadening increases accordingly. At the maximum average pump power of 1 320 mW, a supercontinuum spectrum with a broadening range from 475 nm to 1 870 nm is obtained, and the flatness of the spectrum is improved compared with that at low pump power. By studying the effect of fiber length on the supercontinuum spectrum, it can be found that the supercontinuum is further broadened and flatness is improved with the increase of fiber length under the condition of constant average pumping power. Finally, the broadband supercontinuum output from 450 nm to 1 900 nm was achieved in the 1.5 m long photonic crystal fiber, and the spectrum has good flatness and coherence. Such broadband light sources have potential applications in optical coherence tomography, spectroscopy, communications, early cancer detection and food quality control.

Key words: Photonic crystal fiber; Supercontinuum; High nonlinearity; Dispersion; Femtosecond pulses

OCIS Codes: 060.5295; 320.6629; 060.2280; 060.3510