

拉锥光纤产生超连续谱的研究进展

陈海寰 陈子伦* 周旋风 侯静

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 随着拉锥理论的发展和拉锥工艺的提高,拉锥光纤中超连续谱的产生成为近年来的研究热点。通过拉锥,可以灵活调整光纤的色散和非线性效应,对超连续谱的产生具有重要意义。首先简要介绍了拉锥技术,然后分别介绍了拉锥普通光纤和拉锥光子晶体光纤中超连续谱产生的研究进展,最后对拉锥光纤产生超连续谱的发展和应应用作了展望。

关键词 非线性光学;拉锥光纤;超连续谱;光子晶体光纤

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.070004

Research Progress on Supercontinuum Generation in Fiber Tapers

Chen Haihuan Chen Zilun Zhou Xuanfeng Hou Jing

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract With the development of tapering theory and technology, supercontinuum (SC) generation in conventional fiber tapers or tapered photonic crystal fibers continues to attract significant interests. Tapers are efficient in SC generation at both short and long wavelength due to their special dispersion properties and nonlinearities. This paper introduces the tapering technology first, and then the research progresses of SC generation in both conventional fiber tapers and tapered photonic crystal fibers are reviewed. Finally the prospects and applications SC generated in tapered fiber are presented.

Key words nonlinear optics; tapered fiber; supercontinuum; photonic crystal fiber

OCIS codes 060.4370; 060.5295; 320.6629

1 引言

超连续谱(SC)的产生是指光脉冲在光纤中传输时,各种非线性效应在脉冲频谱内产生新的频率,使频谱得到极大展宽^[1]。这主要是受到包括自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)和受激拉曼散射(SRS)等多种非线性效应和光纤色散特性的影响。

光纤拉锥是一种重要的光纤后处理技术,通过拉锥可以改变普通光纤的直径、光子晶体光纤(PCF)^[2]的纤芯大小以及空气孔直径等参数,调节光纤的群速度色散、色散斜率和非线性系数等参数的同时增大光纤中的光强密度,从而达到增强非线性效应和提高超连续谱转化效率的目的,在产生较宽超连续谱的同时,大大缩短了所需的光纤长度,对超连续谱的产生具有重要意义^[3]。近年来,随着拉锥理论的发展和拉锥工艺的进一步提高,拉锥光纤作为一种非线性介质,对于研究孤子演化和频率转化过程(例如喇曼效应、超连续谱的产

收稿日期: 2012-01-13; **收到修改稿日期**: 2012-02-20; **网络出版日期**: 2012-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(11004247,61007037,61077076)资助课题。

作者简介: 陈海寰(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤激光及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: chenhaihuan2010@sina.com

导师简介: 侯静(1975—),女,研究员,博士生导师,主要从事光纤激光及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: houjing25@sina.com

* **通信联系人**。E-mail: zilun1978@yahoo.com.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

生等)都在理论和实验上取得了巨大进展。

基于拉锥光纤在产生超连续谱的众多优势,本文首先对光纤熔融拉锥技术进行简要介绍,接着对拉锥普通光纤和拉锥光子晶体光纤中超连续谱的产生进行综述,最后对其应用进行展望。

2 熔融拉锥

通常,拉锥光纤是通过熔融拉锥技术加热拉细制备而成,按照拉锥光纤长度可分为较短的拉锥光纤(厘米量级)和长拉锥光纤(米量级甚至可达百米量级)。

2.1 较短拉锥光纤和长拉锥光纤

较短的拉锥光纤一般由拉锥机制作而成,光纤材料被移动火苗加热,在高温下呈现熔融状态,同时光纤受到两个相反方向的拉力,如图 1 所示。

通过这种方法制备的拉锥光纤具有一个直径变小的锥腰,锥腰和未拉锥光纤相连的区域为过渡区域。通过控制拉锥参数,如火焰复扫速度、温度和每次复扫长度的增量可以严格控制拉锥光纤的形状、圆锥区域的长度和直径,当锥形过渡区满足均匀过渡时,损耗可以达到很小^[4,5]。同时这种方法拉制的拉锥光纤两端带有一段直径为 $125\ \mu\text{m}$ 的普通光纤(未拉锥区),可以通过熔接和空间耦合的方法将光耦合进拉锥光纤,相较于小芯径的高非线性光纤而言,耦合更方便。

与较短拉锥光纤不同,长拉锥光纤通常是通过拉丝塔技术制备而成,如图 2 所示。光纤的一端不断得到进给并受热,另一端进行拉伸,调整进给速率和拉伸速率,可获得不同的拉锥比。通常,这种长拉锥光纤的插入损耗小于 $0.2\ \text{dB}$ ^[6]。

2.2 拉锥光子晶体光纤

光子晶体光纤较普通光纤最大的优势在于其结构设计的灵活性,可以很方便地通过改变其结构来实现普通光纤难以实现的光学特性。拉锥光子晶体光纤可在保持 d/Δ 不变的情况下改变纤芯的大小,也可以通过膨胀后拉锥技术改变纤芯大小的同时改变空气孔的填充比例(即改变 d/Δ ^[7~9])。与常规光纤的拉锥不同,为防止空气孔塌缩,光子晶体光纤拉锥时采用低温快速法,低温是保证空气孔最小的变形,快速是保证最少的加热处理时间。

2.3 拉锥光纤的色散和非线性特性

一般普通光纤(SMF-28)的零色散点在 $1.31\ \mu\text{m}$ 附近,如图 3 所示,通过拉锥可以将普通光纤的零色散点向短波方向移动^[10]。

拉锥光子晶体光纤在保持 d/Δ 不变而改变纤芯的大小的情况下,可使其零色散点向短波方向移动,甚至可能出现多个零色散点或者全正色散,如图 4 所示。

拉锥光纤由于其有效模场面积的减小,使得非线性参量 γ 大大增加,即通过有意减小有效模场面积的值来增强非线性效应^[7~9]。

3 拉锥普通光纤中超连续谱的产生

长期以来,普通光纤的拉锥得到广泛关注,理论研究、实际应用都取得了较大进展,包括控制拉锥形状、降低拉锥损耗等方面,同时拉锥光纤也为超连续谱的产生提供了新途径。

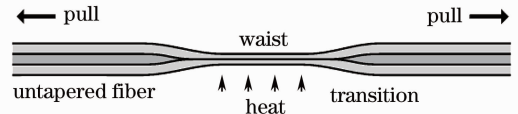


图 1 较短拉锥光纤示意图

Fig. 1 Short fiber tapers

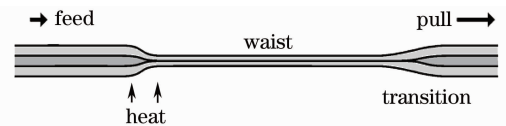


图 2 长拉锥光纤示意图

Fig. 2 Long fiber tapers

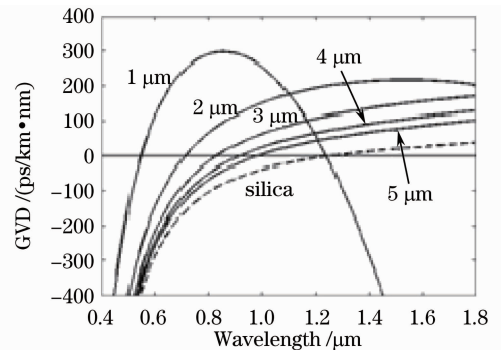
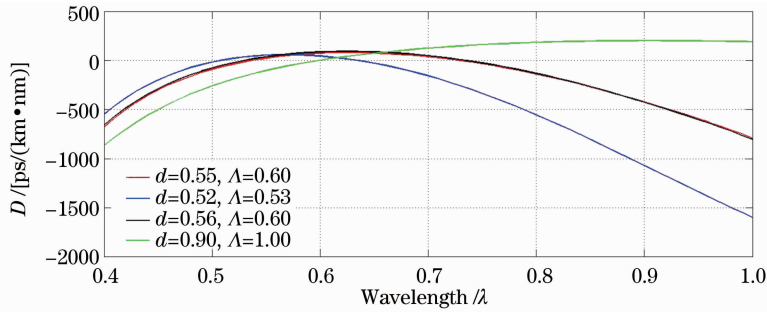


图 3 普通拉锥光纤色散曲线

Fig. 3 Dispersion of tapered conventional fiber

图4 相同 d/Λ , 不同 Λ 的拉锥 PCF 色散曲线Fig. 4 Dispersion of tapered PCF versus d/Λ for different Λ

3.1 拉锥石英光纤中超连续谱的产生

2000年, Birks等^[11]首次在拉锥光纤中发现了超连续谱的产生, 他们将掺钛蓝宝石激光器输出中心波长850 nm, 脉宽500 fs的超短脉冲导入拉锥直径2 μm , 拉锥长度35 mm的光纤, 输出光谱的范围从400 nm展宽到1600 nm, 由此拉开了在拉锥光纤中产生超连续谱的序幕。随后, Man等^[12]建成了类似于拉丝塔的拉锥装置, 可以用来制造任意锥腰长度的拉锥光纤, 并利用这套装置成功将常规通信光纤(康宁公司SMF28)制成了锥腰直径1.8 μm , 锥腰长度9 cm和锥腰直径3.8 μm , 锥腰长度25 cm的拉锥光纤, 将掺钛蓝宝石激光器输出中心波长850 nm, 脉宽200~500 fs的超短脉冲分别注入其中, 都得到了超过1100 nm以上的光谱展宽, 并且较长的拉锥光纤得到的光谱更宽, 更平坦。

3.2 拉锥非石英光纤中超连续谱的产生

ZBLAN光纤是一种重金属氟化物光纤, 目前已商业化, 并用于产生可见光到中红外的超连续谱^[13]。2009年, 为得到高相干度的中红外超连续谱, Chen等^[14]拉锥ZBLAN光纤第二个零色散波长附近孤子的演化过程, 如图5(a)所示, 入射脉冲首先分裂成孤子, 并在脉冲内拉曼散射作用下发生红移, 孤子频移至第二个零色散波长附近时在长波方向产生色散波, 之后相位匹配的色散波随着第二个零色散波长向短波方向移动, 逐渐将孤子能量完全转化为色散波。他们也针对不同纤芯直径ZBLAN光纤和不同抽运脉冲能量分别进行数值模拟, 得到了高相干度的中红外SC输出, 如图5(b)所示。

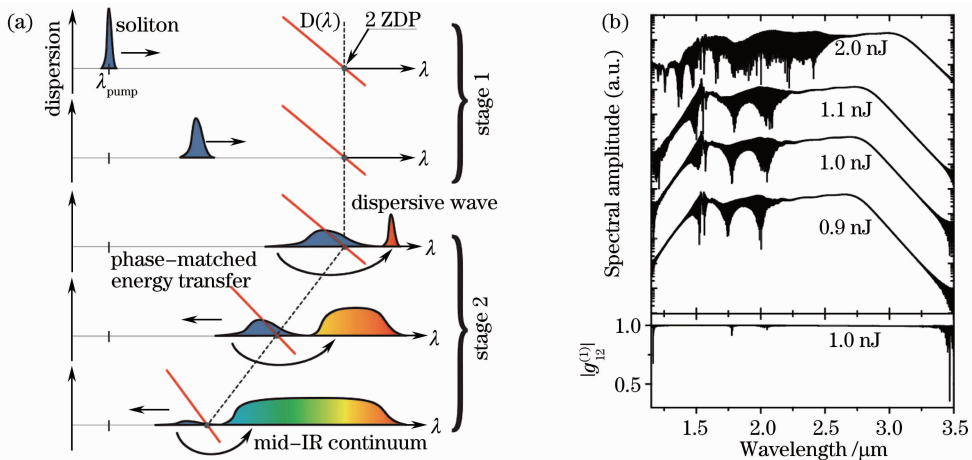


图5 拉锥ZBLAN光纤中SC输出。(a)中红外SC产生示意图;(b)数值模拟不同抽运脉冲能量的SC输出及抽运脉冲能量为1.0 nJ时的相干度

Fig. 5 SC generation in ZBLAN fiber taper. (a) Conceptual illustration of the SC generation in the mid-infrared; (b) output spectra for several input pulse energies and the degree of coherence for spectrum generated by a 1.0 nJ input pulse

硫化物光纤在中红外波段是透明的, 并且非线性折射率比石英玻璃至少高一个数量级^[15]。2011年, Hudson等^[16]制备了 As_2S_3 拉锥光纤, 拉锥区域的模场面积仅为0.8 μm^2 , 1550 nm处的非线性系数 γ 达到了 $12400 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 在拉锥光纤两端熔接了单模光纤以补偿 As_2S_3 光纤未拉锥区域的正常色散, 实验方案如图6所示。随着抽运功率的增加, SC输出的光谱逐渐展宽。当峰值功率超过25 W时, 可以明显地看到

短波方向色散波的产生,而长波方向的展宽主要得益于喇曼频移孤子。当峰值功率达到 150 W(脉冲能量仅为 77 pJ)时,产生了 970~1990 nm 的超连续谱,超过倍频程的光谱展宽可以用于频率梳的产生。

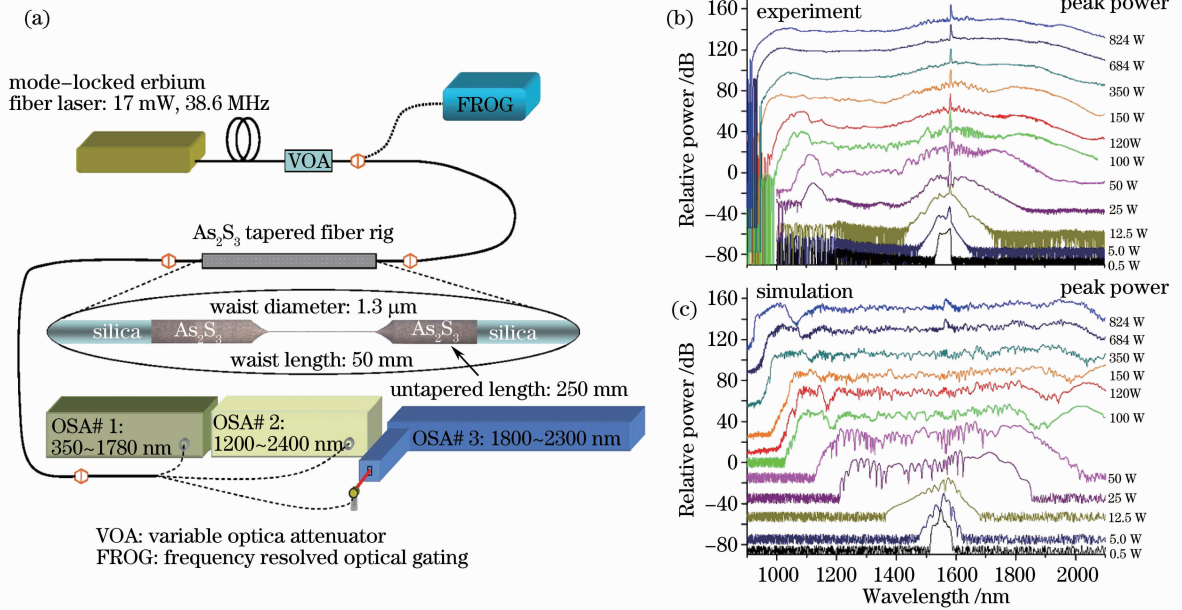


图 6 As_2S_3 拉锥光纤中 SC 的产生。(a)实验装置图;(b)实验 SC 输出及(c)数值模拟结果

Fig. 6 Supercontinuum generation in an As_2S_3 fiber taper. (a) Experimental layout; (b) output spectra from the As_2S_3 taper and (c) numerical simulation

4 拉锥光子晶体光纤超连续谱的产生

随着对光子晶体光纤研究的不断深入,光子晶体光纤的后处理技术也成为研究热点。拉锥技术作为重要的后处理技术,对探索光子晶体光纤中超连续谱产生具有重要作用。

4.1 拉锥石英光子晶体光纤中超连续谱的产生

2004 年,Saval 等^[17]利用普通光纤的拉锥技术实现了对 PCF 的拉锥,其截面如图 7 所示,并且利用 Nd:YAG 激光器倍频后首次在纤芯直径小于 1 μm 的拉锥 PCF 中产生超连续谱,频谱扩展到紫外 350 nm,如图 8 所示。

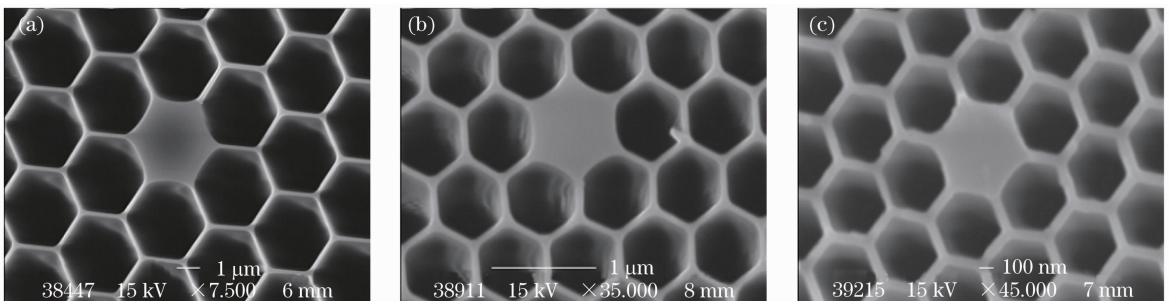


图 7 PCF 截面图,纤芯直径分别为(a) 3.1 μm (未拉锥);(b) 0.7 μm 和(c) 0.5 μm

Fig. 7 SEM images of tapered PCF cores with diameters (a) 3.1 μm (untapered); (b) 0.7 μm and (c) 0.5 μm

2006 年,Kudlinski 等^[18]报道了纳秒和皮秒脉冲抽运不同长度的锥形 PCF,产生了扩展到紫外的超连续谱,如图 9 所示,当采用脉宽 3 ps、重复频率 51 MHz、中心波长 1064 nm 的脉冲抽运时,光谱范围为 372~1750 nm。

2007 年,Cascante-Vindas 等^[19]利用充气技术制作了大占空比的拉锥光子晶体光纤,其截面图如图 10 所示,不同的充气气压可获得不同的拉锥光纤占空比,当气压为 6.5 bar 时,可以维持 PCF 的占空比,并数值模拟了纤芯直径分别为 0.92 μm 和 0.7 μm 的 taper I、II 的色散曲线。实验中利用调 Q Nd:YAG 激光器倍频后产生中心波长为 532 nm,脉宽为 7 ns,重复频率为 10 Hz 的抽运光,注入 taper I、II 中(分别对应正常

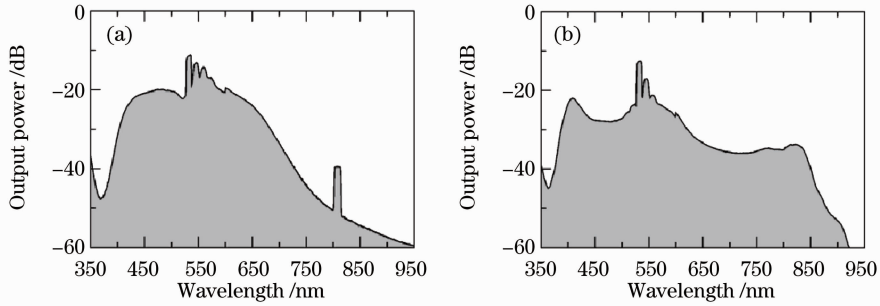


图 8 拉锥光纤长度为 9 cm, 纤芯直径分别为(a) 700 nm 和(b) 500 nm 的 SC 输出

Fig. 8 Supercontinuum spectra from 9 cm of PCF cores with diameters (a) 700 nm and (b) 500 nm

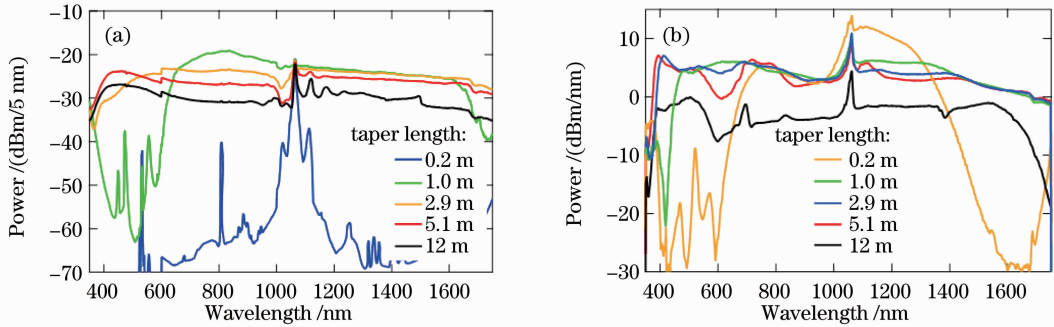


图 9 锥形 PCF 中的 SC 输出。(a) 纳秒脉冲抽运; (b) 皮秒脉冲抽运

Fig. 9 SC spectra from tapered PCF. (a) Output spectra for various lengths of fiber pumped with nanosecond pulses; (b) spectra at various lengths of fiber with picosecond pumping

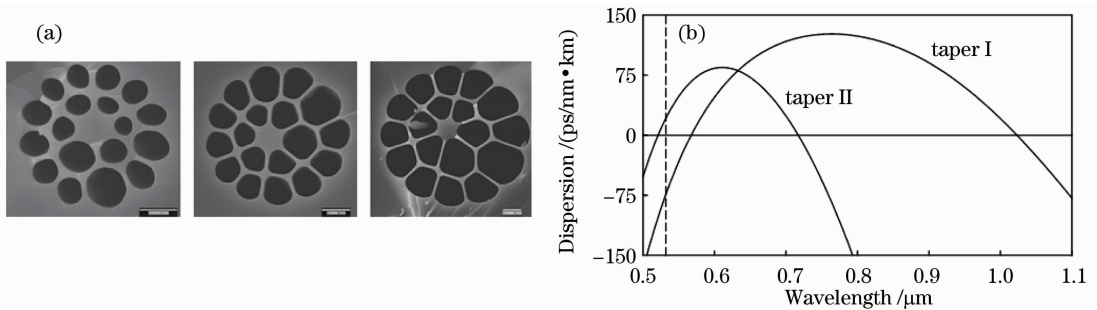


图 10 利用空气孔膨胀制备拉锥 PCF。(a) 充气气压分别为 0, 3, 6 bars 制备的拉锥光纤; (b) 色散曲线: taper I 芯径 0.92 μm , taper II 芯径 0.7 μm

Fig. 10 Tapered PCF fabricated with hole inflation. (a) SEM images of PCF tapers for the gas pressure of 0, 3, and 6 bars; (b) calculated dispersion as a function of wavelength for taper I and taper II

色散区和反常色散区抽运), 都产生了覆盖整个可见光波段的超连续谱, 如图 11 所示。

2011 年, Stark 等^[20]利用拉锥光子晶体光纤拓宽了高重复频率的激光频率梳的光谱。他们利用 Fabry-Pérot 腔将中心波长为 1030 nm 掺镱光纤激光的重复频率由 250 MHz 提高到 140 GHz, 倍频后获得平均功率 120 mW, 中心波长 520 nm, 脉宽 5 nm 的脉冲, 注入到纤芯直径为 507~565 nm 的拉锥 PCF[未拉锥 PCF 截面如图 12(a) 所示]中, 获得了覆盖可见光波段的超连续谱, 其色散曲线及 SC 输出如图 12(b) 所示。

4.2 拉锥掺杂光子晶体光纤中超连续谱的产生

在光子晶体光纤的纤芯中掺杂稀土离子或者化合物可以提高 PCF 的非线性, 将掺杂的光子晶体光纤进行拉锥, 可以进一步增大非线性系数 γ ^[21]。2010 年, Kudlinski 等^[22]基于纤芯掺 GeO₂ 的光子晶体光纤, 制作了零色散波长随光纤长度逐渐减小的长拉锥光纤, 并用中心波长为 1075 nm 的连续光进行抽运, 首次获得了光谱范围为 470~1750 nm, 平均功率为 9.3 W 的超连续谱, 如图 13 所示。

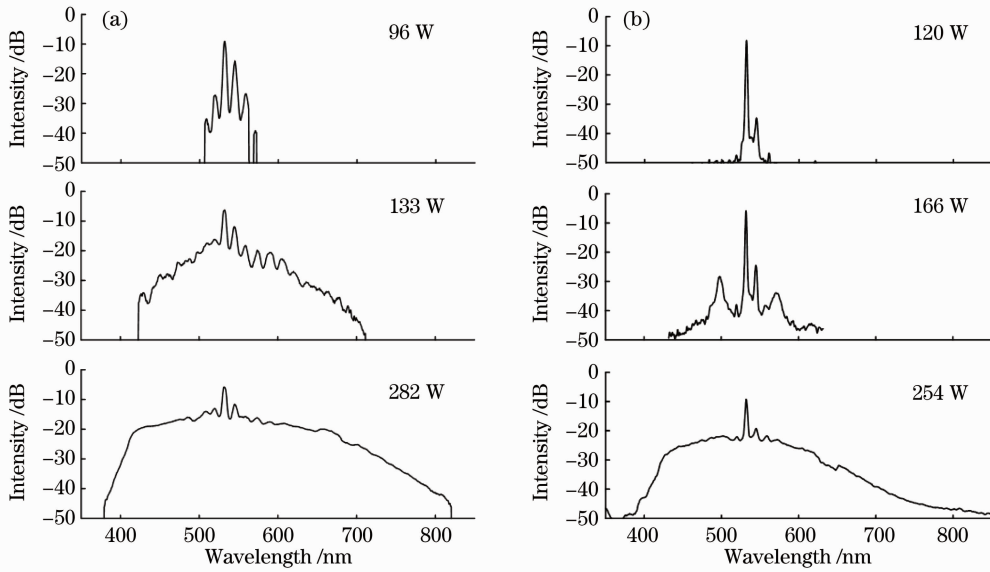


图 11 拉锥 PCF 的 SC 输出。(a) taper 1; (正常色散区抽运); (b) taper 2(反常色散区抽运)

Fig. 11 SC generation in PCF tapers. (a) SC spectra generated in taper 1 for different pump powers; (b) SC spectra generated in taper 2 for different pump powers

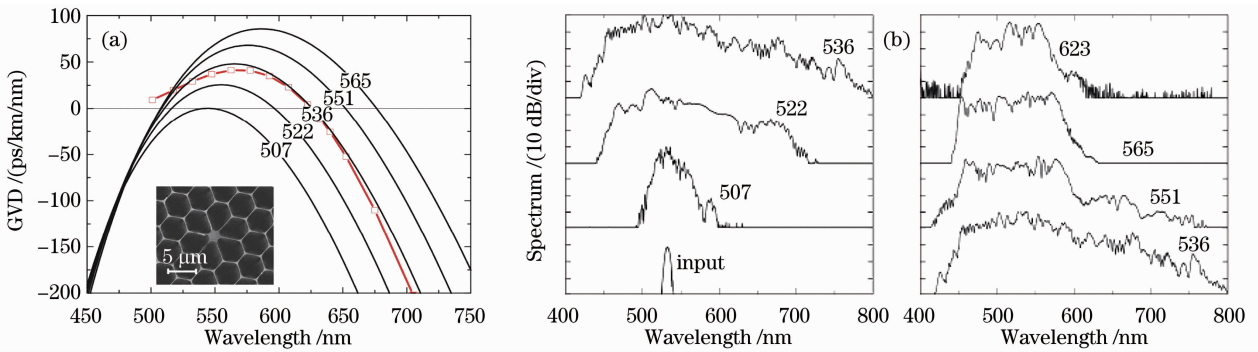


图 12 不同纤芯直径的拉锥 PCF 色散曲线及 SC 输出。(a)不同纤芯直径的拉锥 PCF 色散曲线(计算曲线,测量曲线);

(b) 4.3 pJ 脉冲经过长度为 30 cm,纤芯直径为 507~623 nm 的拉锥 PCF 后的 SC 输出

Fig. 12 Calculated GVD and SC generation of tapered PCFs for different core sizes. (a) The inset shows an SEM image of the untapered PCF; (b) spectral broadening (logarithmic plot) of 4.3 pJ pulses traversing 30 cm long pieces of the tapers

4.3 拉锥非石英光子晶体光纤中超连续谱的产生

软玻璃材料的 PCF 具有硅材料 PCF 无法比拟的高非线性。2007 年, Wolchover 等^[23]使用堆积和拉丝的方法制备成功软玻璃 PCF。并且对该种光纤进行了拉锥处理,制备了芯径为 400 nm 的拉锥光子晶体光纤,并且在 4 cm 长的拉锥 PCF(未拉锥区 $z_1=3.5$ cm,拉锥区 $z_2=0.5$ cm)中获得了超过倍频程的 SC 输出,如图 14 所示,其中(a)、(b)分别为以相同功率抽运的未拉锥与拉锥软玻璃材料 PCF 的 SC 输出。

2010 年, Chen 等^[24]数值模拟了拉锥硅酸铅(Lead silicate)光子晶体光纤中超连续谱的产生。模拟结果表明,通过拉锥将纤芯直径减小至 1 μm 以下时,将出现两个零色散波长,利用中心波长为 1.55 μm 的飞秒脉冲抽运长度为 4 cm 的拉锥光纤就可以获得 1000~6000 nm 的 SC 输出,并且通过合理设计拉锥光纤,可以使得色散波

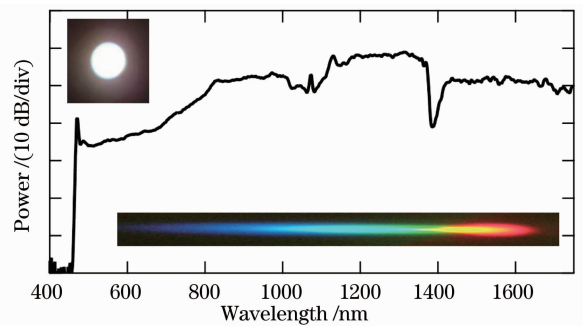


图 13 纤芯掺 GeO_2 的拉锥 PCF 中 SC 输出

(插图给出输出光斑及棱镜分光图)

Fig. 13 Experimental spectra measured in a long tapered GeO_2 -doped core PCF (inset: white-light output spot, and dispersion by a prism)

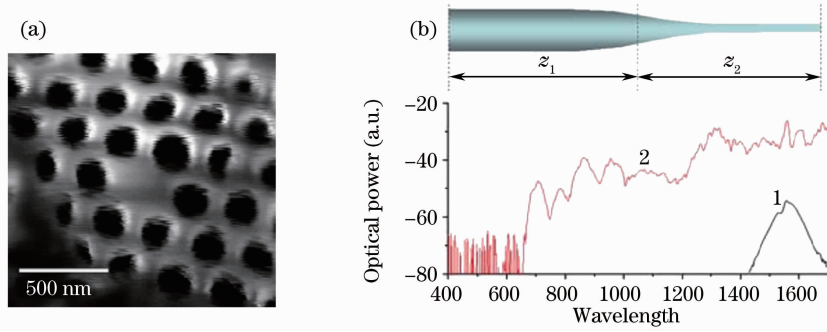


图 14 (a)拉锥软玻璃 PCF 截面图；(b) 4 cm 未拉锥软玻璃 PCF(曲线 1)和总长度为 4 cm(未拉锥区 $z_1=3.5$ cm, 拉锥区 $z_2=0.5$ cm)的拉锥软玻璃 PCF(曲线 2)的 SC 输出

Fig. 14 (a) SEM image of the cross section of the tapered SF_6 -PCF; SC generated in an untapered 4 cm segment of PCF (curve 1) and in an equally long piece of PCF with a tapered tip (curve 2) with the same pump power

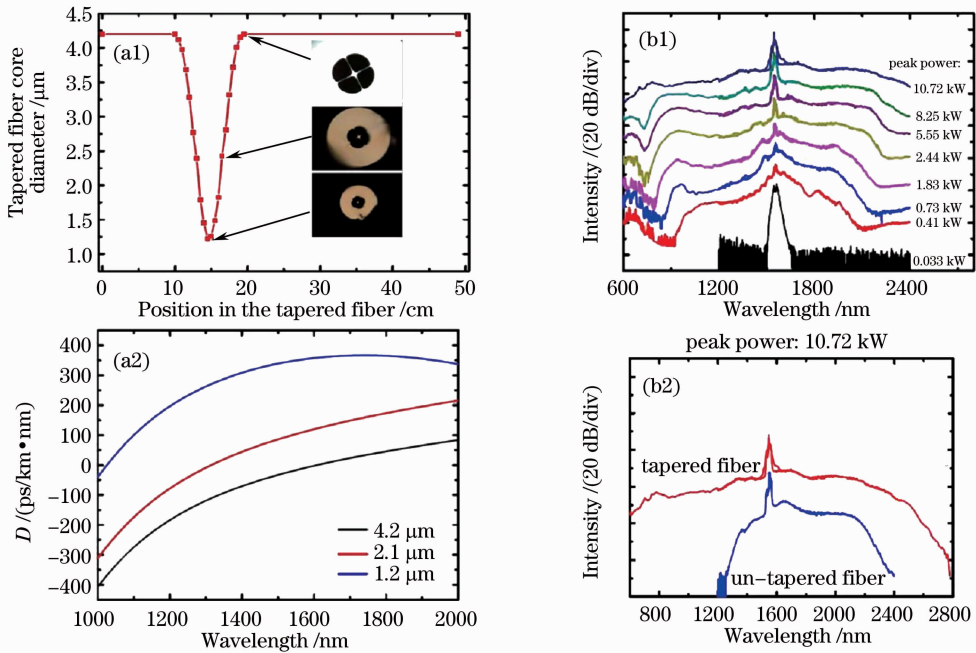


图 15 拉锥碲化物光纤结构图及超连续谱。(a1), (a2)拉锥碲化物光纤不同位置处横截面结构图及色散计算曲线；(b1)不同功率飞秒脉冲抽运产生 SC 输出光谱；(b2)当抽运功率 10.72 kW 时,相同长度(50 cm)拉锥与未拉锥碲化物 PCF 中的 SC 输出

Fig. 15 SC generation in dispersion varying tellurite microstructured fibers. (a1), (a2) Dependence of the tapered fiber core diameter on the position of the fiber and calculated dispersion data of the fundamental mode in dispersion varying tellurite microstructured fibers; (b1) dependence of the SC spectra output from the tapered fiber on the pumping peak power of the femtosecond fiber laser; (b2) comparison of SC spectra generated from the tapered or untapered tellurite microstructured fiber with the same fiber length (50 cm) when the pumping peak power was fixed at 10.72 kW

在传输过程中一直满足相位匹配条件,从而大大扩展超连续谱的光谱范围。

2010年, Qin等^[25]利用常规拉锥方法制备了零色散波长渐减的碲化物光子晶体光纤,将中心波长为1550 nm、脉宽为400 fs的脉冲注入该拉锥光纤中,获得了光谱范围为600~2800 nm的超连续谱。并与未拉锥光纤比较,在相同抽运条件和相同光纤长度下,拉锥光纤中获得的超连续谱更宽、更平坦,如图15所示。这是由于抽运脉冲在拉锥光纤中依次经历了正常色散、反常色散和正常色散,从而使得SPM、SRS、FWM以及孤子分裂等非线性效应综合作用,从而使得超连续谱更宽,更平坦。

5 总结与展望

超连续谱对于非线性光学中光谱分析、光通信^[26]、光计量学、光学频率梳^[27]和传感^[28]等许多方面有着重要意义。因此研究如何获得超连续谱及研究相应的产生机制是目前的研究热点之一。目前获得超连续谱有几种方法,用的比较多的是将超短脉冲输入微结构光纤中获得。但微结构光纤由于其自身的特点,在制造及使用中有其局限性。拉锥光纤较微结构光纤制造简单,参数容易控制。在拉锥光纤和拉锥 PCF 中,不仅可以灵活控制光纤的色散和非线性等性质,且光纤拉锥区域的纤芯直径非常小,当超短脉冲传输到拉锥区域时,脉冲可以达到非常高的功率密度,非线性效应的强弱与脉冲的功率直接相关,在光纤的拉锥区域内可以产生非常强的非线性效应,容易产生超连续谱,因此成为目前产生超连续谱的一种新方法。随着拉锥工艺的进一步发展,拉锥光纤和拉锥 PCF 中超连续谱产生机理的进一步认识,不但可以获得更宽光谱范围的超连续谱,而且可以进一步控制超连续谱的相干性、平坦性和噪声特性^[29]。

参 考 文 献

- Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* (4th)[M]. Burlington: Academic Press, 2007. 439
- Knight J. C.. Photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 847~851
- T. A. Birks. Optical micro- and nano-structures using fibre tapers[C]. *CLEO*, 2005, **1**: 47~49
- W. K. Burns, M. Abebe, C. Villarrel *et al.*. Loss mechanisms in single-mode fiber tapers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **4**(6): 608~613
- J. D. Love. Spot size, adiabaticity and diffraction in tapered fibres[J]. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(19): 993~994
- T. A. Birks, T. P. M. Man, W. J. Wadsworth *et al.*. Fabrication of indefinitely long tapered fibres for supercontinuum generation[C]. *Nonlinear Guided Waves and Their Applications*, 2001 OSA Technical Digest Series, 2001, WB4
- Chen Zilun, Xi Xiaoming, Sun Guilin *et al.*. Studies on the hole inflation and tapering techniques of photonic crystal fibers [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, **33**(2): 1~4
陈子伦, 奚小明, 孙桂林 等. 光子晶体光纤的空气孔膨胀和拉锥技术研究[J]. *国防科技大学学报*, 2011, **33**(2): 1~4
- W. J. Wadsworth, A. Witkowska, S. Leon-Saval *et al.*. Hole inflation and tapering of stock photonic crystal fibres[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(17): 6541~6549
陈子伦, 侯 静, 姜宗福. 光子晶体光纤的后处理技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 020602
- Chen Zilun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Rost-processing techniques of photonics crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2010, **47**(2): 020602
陈子伦, 侯 静, 姜宗福. 光子晶体光纤的后处理技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 020602
- Xi Xiaoming. *Studies on Characters and Applications of Tapered Optical Fibers*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. 22
奚小明. 拉锥光纤的特性和应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010. 22
- T. A. Birks, W. J. Wadsworth, P. St. J. Russell. Supercontinuum generation in tapered fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1415~1417
- T. A. Birks, W. J. Wadsworth and P. St. Russell. Fabrication of Indefinitely Long Tapered Fibres for Supercontinuum Generation[Z]. 2001, OSA Technical Digest Series.
- Zhang Bin, Hou Jing, Jiang Zongfu. Research progress on mid-infrared supercontinuum generation in nonsilica glass fibers [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(6): 575~579
张 斌, 侯 静, 姜宗福. 非石英玻璃光纤中产生中红外超连续谱研究进展[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(6): 575~579
- Z. Chen, A. J. Taylor, A. Efimov. Coherent mid-infrared broadband continuum generation in non-uniform ZBLAN fiber taper[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5852~5860
- J. H. V. Price, T. M. Monro, H. Eberdorff-Heidepriem *et al.*. Mid-IR supercontinuum generation from nonsilica microstructured optical fibers[J]. *IEEE J. Sel. Topt. Quantics*, 2007, **13**(3): 738~749
- Darren D. Hudson, S. A. Dekkes, E. C. Mägi *et al.*. Octave spanning supercontinuum in an As₂S₃ taper using ultralow pump pulse energy[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(7): 1122~1124
- S. G. Leon-Saval, T. Birks, W. Wadsworth *et al.*. Supercontianuum generation in submicron fibre waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(13): 2864~2869
- A. Kudlinski, A. K. George, J. C. Knight *et al.*. Zero-dispersion wavelength decreasing photonic crystal fibers for ultraviolet-extended supercontinuum generation[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5715~5722
- J. Cascante-Vindas, A. Diez, J. L. Craz *et al.*. Tapering photonic crystal fibres for supercontinuum generation with

- nanosecond pulses at 532 nm[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(3): 433~438
- 20 S. P. Stark, T. Steinmetz, R. A. Probst *et al.*. 14 GHz visible supercontinuum generation: calibration sources for astronomical spectrographs[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(17): 15690~15695
- 21 J. Liu, L. Xue, Y. Liu *et al.*. Enhanced nonlinearity in a simultaneously tapered and Yb³⁺-doped photonic crystal fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(11): 2448~2453
- 22 A. Kudlinski, B. Barviau, A. Mussot. White-light continuous-wave supercontinuum source[C]. IEEE Photonics Society Summer Topic Meeting Serier, 2010. 1882~183
- 23 N. A. Wolchover, F. Luan, A. K. George *et al.*. High nonlinearity glass photonic crystal nanowires[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3): 829~833
- 24 Z. Chen, S. Ma, N. K. Dutta *et al.*. An efficient method for supercontinuum generation in dispersion tailored lead-silicate fiber taper[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**: 3076~3080
- 25 Guanshi Qin, Xin Yan, C. Kito *et al.*. Zero-dispersion-wavelength-decreasing tellurite microstructured fiber for wide and fattened supercontinuum generation[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(2): 136~138
- 26 H. Takara, T. Ohara, K. Mor *et al.*. More than 1000 channel optical frequency chain generation from single supercontinuum source with 12.5 GHz channel spacing[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(25): 2089~2090
- 27 Th. Udem, R. Holzwarth, T. W. Hänsch. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, **416**: 233~237
- 28 H. C. Nguyen, B. T. Kuhlimey, E. C. Maegt *et al.*. Tapered photonic crystal fibres properties, characterisation and applications[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(2-3): 377~387
- 29 B. Barviau, A. Mussot, A. Kudlinski *et al.*. Taper topography control of instabilities and rogue waves in supercontinuum fibers[C]. Specialty Optical Fibers, OSA Technical Digest, 2011, SoTuA3