

双锥双光纤超连续谱的实验研究

方振超, 孙年春, 冯国英, 周国瑞, 张 一
(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘 要:超连续谱(SC)是当今光通信领域中的研究热点问题之一,应用非常广泛。本文主要利用掺钛蓝宝石飞秒激光器产生的超短脉冲对双锥双光纤进行超连续谱的实验研究。双锥双光纤是由两根普通单模光纤以一定的方式沿光纤轴向均匀拉制而成。实验结果显示:超连续光谱随着输入功率和拉锥长度增加而展宽,拉锥直径大小对双锥双光纤超连续谱展宽有很大影响,同时实验证明在输入功率相同的情况下,双锥双光纤与普通光纤相比可以产生更宽、更平坦的超连续谱。

关键词:双锥双光纤;超连续谱;平坦;带宽

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A

Research on supercontinuum generation in biconical double fiber

FANG Zhen-chao, SUN Nian-chun, FENG Guo-ying, ZHOU Guo-rui, ZHANG Yi
(College of Electronics & Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: As one of the hotspot, supercontinuum is researched in optical communication field nowadays. This paper mainly investigates supercontinuum generation in biconical double fiber by using Ti-sapphire laser with ultrashort pulses. Biconical double fiber is made of two single mode optical fibers drawn from the axial in a certain way. The results show that the supercontinuum broaden increases with the increasing of input power and tapered length. Diameters of the tapered fiber have a great influence on supercontinuum broadening. Compared with the ordinary optical fiber, biconical double fiber can generate wider and more flat supercontinuum at same incident power.

Key words: biconical double fiber; supercontinuum generation; flat; bandwidth

1 引言

近年来,超连续谱(SC)是光通信领域一个研究的热点,受到极大的关注。早在1970年Alfano等人使用倍频锁模皮秒激光抽运BK47玻璃,首次得到400~700 nm的SC^[1];1994年Morioka等人首次在光纤中获得约200 nm宽的超连续谱^[2];Ranka在1999年就报道光子晶体光纤超连续谱实验用1 J的飞秒脉冲输入到微结构中可以产生两个光学倍频(390~1600 nm)的超连续谱^[3],实验是在反常色散区输入800 nm中心波长测得的;Fedotov等报道了利用脉宽70 fs中心波长是800 nm的掺钛蓝宝石激光脉冲通过多孔微结构光纤产生超连续谱的现

象^[4];Wadsworth等报道通过微结构光纤产生超连续谱^[5];1993年,Dumais第一次通过利用飞秒脉冲与拉锥光纤耦合后输出了连续光谱^[6];2000年,Birks和他的同事一起利用钛蓝宝石激光器输出的纳焦量级飞秒脉冲与拉锥光纤耦合输出了超连续谱^[7];2001年,Akinok利用掺铬的镁橄榄石飞秒脉冲激光器与拉锥光纤耦合输出了中心波长在1.25 μm的超连续谱^[8]。超连续光谱在光谱检测、生物医

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 10876022)资助。

作者简介:方振超(1985-),男,硕士研究生,主要从事新型波导及光子晶体光纤方面的研究。E-mail:chao17951@163.com

收稿日期:2010-11-05;修订日期:2011-01-04

学、高精密光学频率测量以及波分复用光通信系统等方面有着重要的应用。

拉锥技术经过了 20 多年的不断发展,已经成为一门熔融型全光纤技术。

光纤在高温熔融状态下的流变行为是服从牛顿流体规律的。工艺参数如拉伸速度、时间、温度等将影响双锥双光纤的制作。在锥腰处,通常温度越高,其直径越小;在相同拉锥温度下,拉伸长度越长,锥束腰就越小;在相同拉伸速度和时间下,温度越高,锥束腰就越小^[9-10]。双锥双光纤的优点有:①双锥双光纤的制作方便,参数便于控制;②材料是普通的单模光纤,很经济;③可以通过改变双锥双光纤的锥长度和直径改变色散曲线^[11]。实验所用到的双锥双光纤其拉制过程如图 1 所示,把两根普通单模光纤(PROD; SMF-28e Fiber; Coat: CPC6) 中间除去涂覆层,以一定的方式靠拢,放在氢氧焰上沿着光纤轴向向两侧均匀拉制而成。当两根光纤的一段纤芯相互靠近(一般是微米)时,可以实现双光纤耦合。本实验利用 35 fs 超短脉冲激光输入双锥双光纤的一端,同时确保输出端两根光纤都有光出现,以观察其产生的超连续谱。实验研究在相同输出功率下,不同锥长度和不同锥直径对双锥双光纤超连续谱的影响;同时在不同输入功率下,对双锥双光纤与普通单模光纤产生的连续谱进行比较,得到双锥双光纤可以产生更宽且平坦的超连续谱,对高精密光学频率测量以及脉冲压缩都有重要意义。

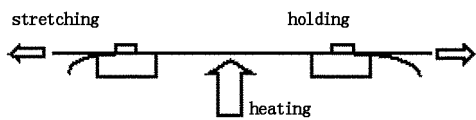


图 1 拉锥示意图

Fig. 1 technique for fiber tapering

2 实验装置

掺钛蓝宝石飞秒激光脉冲在双锥双光纤中产生超连续谱的实验装置如图 2 所示。掺钛蓝宝石激光器输出的光束经过 40 倍耦合透镜聚焦,利用光纤耦合器使聚焦后的光束输入双锥双光纤一个端面,这个过程要注意端面不能接触(或太接近)透镜耦合焦点,防止耦合能量超过光纤端面损伤阈值而损坏光纤,此时光纤的耦合效率很低,一般在 1% ~ 5%,同时确保输出端两根光纤都有光输出,最后用光谱仪观察超连续光谱的图形。

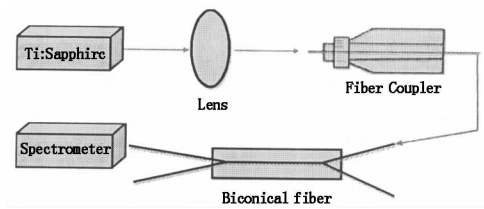


图 2 双锥双光纤超连续谱产生的实验装置图

Fig. 2 experimental setup of biconical double fiber supercontinuum generation

实验中使用的掺钛蓝宝石飞秒激光器是美国相干公司生产的被动锁模固体激光器,其最大输出功率可达 3.5 W,实验中激光器输出功率为 140 mW,脉冲重复频率 1 kHz,中心波长为 800 nm,光谱宽 35 nm,脉宽 35 fs。光谱测量是采用 Ocean Optics (America) 公司生产的 USB4000-VIS-NIR 型光谱仪,光谱仪测量范围是 350 ~ 1000 nm,测量精度 0.3 nm。

3 实验结果与分析

图 3 所示为不同输入功率下双锥双光纤产生的超连续谱。在不同输入功率下,光谱会随着功率的增加而展宽,并趋于更加平坦。在功率增加的过程中,影响光谱展宽的因素有孤子自频移、自相位调制(SPM)、高阶孤子的形成、高阶孤子分裂成几个基孤子的现象以及四波混频(FWM)效应^[12]。

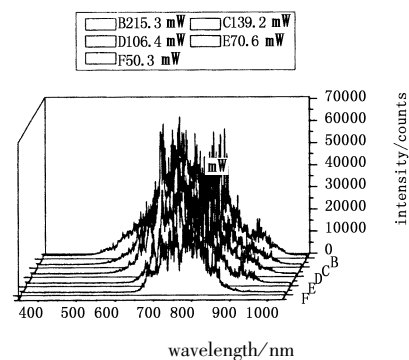


图 3 双锥双光纤在不同输入功率下的超连续谱

Fig. 3 supercontinuum generation in biconical double fiber at different input power

实验观察到,在输入功率相同时,双锥双光纤不同输出端的超连续谱基本没有改变,即光谱的峰值和展宽范围没有变化,如图 4 所示;不同输入端输入相同功率时,输出端的光谱也没有变化,如图 5 所示。图中可以看到某些波段光谱有起伏,这种变化是受到飞秒脉冲振荡以及噪声引起的。以上情况表明,在理想的情况下,双锥双光纤不同输出端产生的 SC 是没有变化的,输出端两根普通光纤所辐射的能量也是相等的。

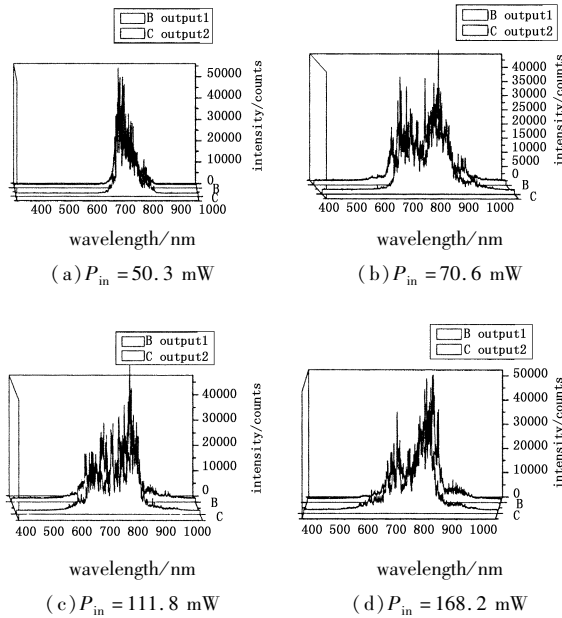


图4 双锥双光纤的两输出端的超连续谱比较图
Fig. 4 biconical double fiber supercontinuum generation at different output

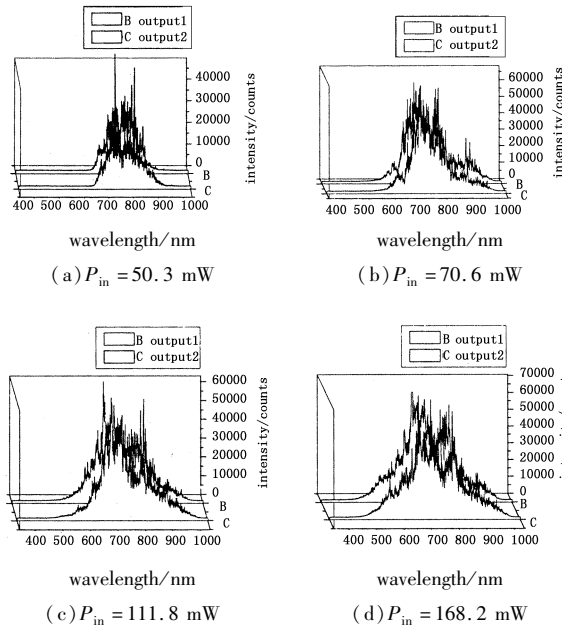


图5 双锥双光纤的两输入端的超连续谱比较图
Fig. 5 biconical double fiber supercontinuum generation at different input

光谱展宽不仅与输入脉冲参数(包括脉冲宽度、重复频率及脉冲能量)有关,而且同双锥双光纤参数(包括光纤双锥长度及直径的大小)也有很大的关系^[13],在测量锥长度时定义:

$$\Delta = \frac{D-d}{D} \times 100\% = 50\% \quad (1)$$

式中, Δ 是变化率; D 是测量处锥的直径; d 是锥的最小直径,锥的长度就是两个 D 之间的距离。不同

的双锥双光纤长度对光谱的影响很大,如图6所示,随着双锥双光纤长度的增加,光谱的范围也在展宽,展宽机理是双锥双光纤长度越长,其非线性效应共同作用的距离就长。自相位调制(SPM)与光传输距离有关,随着脉冲传输距离的变化,SPM 将产生与脉冲强度、传输距离及非线性长度相关联的非线性相移,对其时间求一次偏导得到由于 SPM 作用在不同距离、不同脉宽处产生的新频移分量。在光纤传输方程中,只考虑 SPM 的非线性相移得到^[14]:

$$\phi_{NL} = |U(0, T)|^2 \left\{ \frac{Z_{eff}}{L_{NL}} \right\} \quad (2)$$

其中, $Z_{eff} = 1 - e^{-\alpha z} / \alpha$, α 为光纤损耗; Z_{eff} 为光纤的有效长度; $U(0, T)$ 为脉冲振幅峰值归一化后的信号脉冲形式; $L_{NL} = (\gamma P_0)^{-1}$ 为光纤的非线性特征长度,其中 P_0 是输入脉冲的峰值功率, γ 是非线性系数, L_{NL} 越小,非线性效应愈明显。相对产生的频率啁啾量为^[15]:

$$\delta_s(T) = -\frac{\partial \phi_{NL}}{\partial T} = -\left(\frac{Z_{eff}}{L_{NL}} \right) \frac{\partial}{\partial T} |U(0, T)|^2 \quad (3)$$

由上式可知,SPM 会使超短脉冲产生新的频率分量。频移分量会随着脉冲传输距离的变大而增加,最终导致传输过程中光谱发生展宽。因此,若想要获得较宽的光谱时,可以采用较长的双锥双光纤。

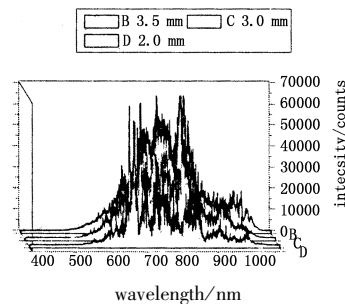


图6 不同锥长度的超连续谱图
Fig. 6 supercontinuum generation in tapered fiber with different lengths

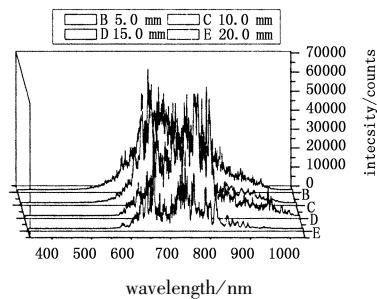


图7 不同锥直径的超连续谱
Fig. 7 supercontinuum generation in tapered fiber with different diameters

双锥双光纤直径大小对超连续谱展宽也有很大

影响,在相同输入功率下,不同直径的双锥双光纤产生的超连续谱如图 7 所示,直径越小光谱越宽。双锥双光纤直径的减小使得光纤有效面积变小,光纤内部会产生很高的峰值功率,从而引发孤子波频移甚至孤子分裂以及受激拉曼散射(SRS)等非线性效应。孤子频移效应使脉冲光谱发生展宽机理如下,利用连续谱测量方法有^[16]:

$$\partial_z A = ik(i\partial_t)A + i\gamma(1-\theta)|A|^2A + i\gamma\theta A \int_0^\infty dt'R(t')|A(t-t')|^2 \quad (4)$$

上式方程包括三部分:①右面第一项表示色散;②第二项是克尔效应引发的自相位调制;③第三项表示受激拉曼散射。

式中, Z 为传播距离; t 为群速度参考系的时间; $\theta = 0.18$ 为拉曼非线性效应的强度;至于 $R(t)$ 与拉曼函数有关; A 为振幅; $k(i\partial_t)$ 为色散控制因子。假定光纤群折射率在一定频率范围是线性变化的($\partial_s k \approx \delta$ 和 $k \approx \sigma^2$),在初始频率为零时,方程(4)的孤子近似解为:

$$A_s = \varphi(t - t_s) \exp[-i\delta_s t + i\phi(Z)] \quad (5)$$

$$\varphi(t) = \sqrt{2q/\gamma} \operatorname{sech}\left(\sqrt{\frac{2q}{|k''|}}t\right) \quad (6)$$

$$\phi(Z) = qz + \frac{1}{3}k''\delta_s^2 z, T = \int_0^\infty tR(t) dt \quad (7)$$

$$\delta_s = \frac{g_0 z}{k''}, k'' = \partial_s^2 k < 0, g_0 = \frac{32q^2}{15} \quad (8)$$

由于拉曼效应在 $t_s = g_0 z/2$,使孤子发生延迟, $q > 0$ 时孤子波数移动与对应的能量成比例,在 $t = t_s$ 时孤子的路径运动为抛物线,孤子频移 δ_s 随着 z 距离的增加在减小。孤子辐射与相位匹配有关,可以得到孤子光谱计算式如下:

$$\overline{A_s}(\delta) = \int_{-\infty}^\infty dt A_s e^{i\delta t} = e^{i\varphi(z) + i\varphi[\delta - \delta_s]} \cdot \overline{\psi}(\delta - \delta_s) \quad (9)$$

这里的 $\overline{\psi}(\delta) = \int_{-\infty}^\infty \psi(t) e^{i\delta t} dt$ 为实函数。孤子波光谱成分是:

$$k_s(\delta) = \partial_z[\phi(z) + (\delta - \delta_s)t_s] = q + \partial_s k_{\delta=\delta_s}[\delta - \delta_s] + k(\delta_s) \quad (10)$$

事实上,孤子与群速度(GVD)无关,因此 $\partial_s^2 k_s = 0$,可以得到在 $\delta = \delta_s$ 时孤子远离了初始的位置 q ,若孤子向短(长)波移动称为“蓝(红)移”现象^[17],因此孤子的频移效应也会使光谱展宽。此外,实验时峰值功率超过拉曼散射的阈值,会出现 SRS 效应以及孤子分裂,都会对拉锥光纤的光谱展宽有贡献。

在相同的输入功率下,双锥双光纤与普通光纤

相比,可以产生更宽、更平坦的超连续谱。双锥双光纤锥区比普通光纤具有更强的非线性效应(SPM, SRS 和 FWM 效应等)。孤子波在锥区内发生级联反射加速孤子的强度,导致辐射频率上(下)移形成“蓝(红)移”;当输入功率很大时,孤子会发生分裂,产生新的频移成分,也使光谱展宽;最终形成比普通光纤更宽的超连续谱。图 8(a)和图 8(b)分别是双锥双光纤与普通光纤光谱展宽对比图。

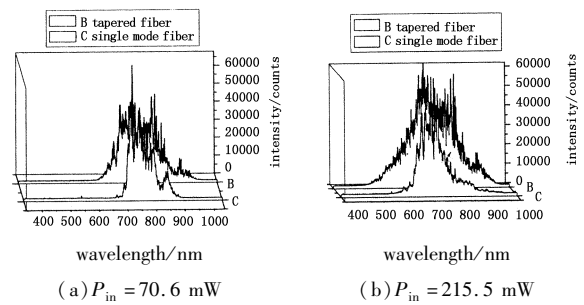


图 8 双锥双光纤与普通光纤超连续谱比较图
Fig. 8 biconical double fiber compared with the traditional fiber supercontinuum generation

4 结论

本文通过中心波长为 800 nm,脉宽 35 fs,频宽 30 nm 掺钛蓝宝石飞秒激光器,用其产生的超短脉冲对双锥双光纤进行超连续谱的实验研究。实验验证双锥双光纤在控制均匀、理想的情况下,不同输出端光谱是相同的,能量是均分的;在相同功率下,双锥双光纤比普通单模光纤产生更宽、更平坦的超连续谱。双锥双光纤的锥长度决定光纤内非线性效应及色散量共同作用的距离,长度越长光谱越展宽;锥直径大小可以改变光纤内脉冲强度,这两点对超连续谱的产生有很大的影响。通过改变输入功率、拉锥长度和拉锥直径的大小可以控制超连续谱的展宽范围,这一点对超连续谱的应用(如产生更短脉冲等)有很大的帮助。

参考文献:

[1] R R Alfano, S L Shapiro. Emission in the region 4000 to 7000 avin four-photon coupling in class [J]. Phys. Rev Lett, 1970, 24(11): 584-587.
 [2] T Morioka, K Mori, M Saruwatari, et al. Transactions on instrumentation and measurement [J]. IEEE, 1995, 19(4): 712.
 [3] J K Ranka, R S Windeler, A J Stentz. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm [J]. Opt. Lett, 2000, 25(1): 25-27.
 [4] A B Fedotov, A N Naumov, A M Zheltikov. Frequency-

- tunable supercontinuum generation in PCFs by femtosecond pulses of an optical parametric amplifier [J]. *Opt. Physics*, 2002, 19(9): 2156 – 2164.
- [5] W J Wadsworth, A O Blanch, J C Knight, et al. Supercontinuum generation in photonic crystal fibers and optical fiber tapers: a novel lightsource [J]. *Opt. Physics*, 2002, 19(9): 2148 – 2155.
- [6] T Udem, R Holzwarth. Optical frequency metrology [J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233 – 234.
- [7] T A Birks, W J Wadsworth, St J Russell. Supercontinuum generation in tapered fibers [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(19): 1415 – 1417.
- [8] I S Kozak. Scattering of a gaussian beam by a homogeneous dielectric cylinder [J]. *Appl phys*, 1982, 53(11): 7195 – 7197.
- [9] Chen Zhihao. Modeling of optical biconical fiber [J]. *Acta Optica Sinica* November, 1999, 19(11): 1550 – 1554. (in Chinese)
陈智浩. 双锥双光纤模拟理论方法 [J]. *光学学报*, 1999, 19(11): 1550 – 1554.
- [10] Chen Zhihao, Gu Donghua, Zhou Bingkun, et al. Effects of fusion temperature on optical properties of biconical fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, 25(3): 257 – 260. (in Chinese)
陈智浩, 顾东华, 周炳琨, 等. 熔烧温度对双锥双光纤光学特性的影响 [J]. *中国激光*, 1998, 25(3): 257 – 260.
- [11] Xue Chunrong. Research of the tapered fiber [J]. *Laser and Infrared*, 2006, 36(9): 886 – 889. (in Chinese)
薛春荣. 熔锥光纤的特性研究 [J]. *激光与红外*, 2006, 36(9): 886 – 889.
- [12] Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng, et al. Experimental analysis of the dependence factor during supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Physics*, 2004, 53(12): 4243 – 4247. (in Chinese)
胡明列, 王清月, 栗岩峰, 等. 飞秒激光在光子晶体光纤中产生机制的实验研究 [J]. *物理学报*, 2004, 53(12): 4243 – 4247.
- [13] Liang Hong, Guo Kai. Characteristics of supercontinuum generation in tapered fibers [J]. *Journal of Northwest University*, 2007, 37(6): 983 – 985. (in Chinese)
梁红, 郭凯. 拉锥光纤与超连续谱的产生 [J]. *西北大学学报*, 2007, 37(6): 983 – 985.
- [14] Shi Shunxiang, Cheng Guofu, Zhao Wei, et al. Nonlinear optical [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003, 417 – 427. (in Chinese)
石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 等. 非线性光学 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003, 417 – 427.
- [15] J C Knight, G Cheung. Phase-matched excitation of whispering gallery mode resonances using a fiber taper [J]. *Opt. Lett*, 1997, 22(15): 1129 – 1131.
- [16] Dmitry V Skryabin, Andrey V Gorbach. Looking at a soliton through the prism of optical supercontinuum [J]. *Physics*, 2010, 82(2): 1287 – 1299.
- [17] J P Gordon. Theory of the soliton self-frequency shift [J]. *Opt. Lett*, 1986, 11(10): 662 – 664.