

基于双波长相干超短脉冲光源的超连续谱产生

李 旻 霍 力 王 东 王 强 姜 向 宇 娄 采 云

清华大学电子工程系, 北京 100084

摘要 提出在 1550 nm 波段采用双波长相干超短脉冲光源抽运高非线性光纤获得超连续谱。双波长脉冲抽运能够加强光纤中的四波混频和交叉相位调制过程, 从而在相同抽运光功率下, 可获得宽度远大于单波长脉冲抽运的超连续谱。利用基于脉冲切割器和 Mamyshev 再生器的 25 GHz 双波长相干超短脉冲光源, 在入纤功率为 24.1 dBm 时, 获得了 130 nm 宽度的超连续谱, 并进一步证实了所获超连续谱谱线之间的相干性。

关键词 光纤光学; 超连续谱; 双波长抽运; 高非线性

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0406001

Supercontinuum Generation Based on Dual-Wavelength Coherent Ultrashort Pulses

Li Min Huo Li Wang Dong Wang Qiang Jiang Xiangyu Lou Caiyun

Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Supercontinuum around 1550 nm using a dual-wavelength coherent ultrashort pulse source is demonstrated. Dual-wavelength pulse pumping can strengthen the processes of four-wave-mixing and cross-phase-modulation, thus, it generates a much broader supercontinuum than regular single-wavelength pumping at the same pump power. Based on pulse carver and Mamyshev regenerator 25 GHz dual-wavelength coherent ultrashort pulse source, 130 nm supercontinuum is experimentally obtained with a pump power of 24.1 dBm. Coherence between the spectral lines is also verified.

Key words fiber optics; supercontinuum; dual-wavelength pumping; high nonlinearity

OCIS codes 060.2330; 060.4370; 320.6629

1 引 言

超连续光谱(SC)在光谱分析、多波长光通信、光模数转换(A/D)、高速光采样、任意波形发生等方面具有重要的应用价值。文献[1-3]已经报导了在低色散量的色散位移光纤(DSF)及高非线性光纤(HNLF)中产生SC并获得了应用^[1-3]。为了提高SC的宽度,人们进行了大量的分析并研制了各类光纤:1)色散平坦-渐减光纤,不会像DSF一样,其色散渐减使自相位调制展宽效应不随着在光纤中传输距离的增大而渐减,在后段小色散的情况下,四波混频(FWM)效应更容易产生,并且产生的SC光谱平坦性也比较好^[4];2)拉锥光纤,只要把它的芯区直径减小到一般DSF光纤的1/4~1/5^[5],芯区面积就可以近似达到一般光纤的1/20,且非线性系数可以近似达到普通DSF光纤的20倍;3)光子晶体光纤(PCF),它可以控制光波的模式、偏振方向和频率,通过设计,光子晶体光纤的非线性系数可以大大增加,可达到一般光纤的几千倍^[6-10]。硫化物玻璃的非线性系数高于石英材料光纤纤维的数百倍,基于此文献[11]报导了利用硫化物玻璃纤维获得了1.5 μm宽的中红外宽谱光源。双波长抽运是获得宽SC的另外一条途径,利用1064 nm基频与倍频光或1064 nm与波长差为数百纳米的双波长光脉冲,抽运PCF,在高功率抽运下基于光纤中的自相位调制(SPM)、级联的交叉相位调

收稿日期: 2014-10-13; 收到修改稿日期: 2014-11-18

基金项目: 国家973计划(2011CB301703)、国家自然科学基金(61275032)、清华大学自主科研计划(20131089359)

作者简介: 李 旻(1985—),男,硕士研究生,主要从事信息光电子学与高速光通信方面的研究。

E-mail: lim12@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 霍 力(1976—),男,副教授,主要从事信息光电子学与高速光通信方面的研究。E-mail: lhao@tsinghua.edu.cn

制(XPM)和受激拉曼散射(SRS)、四波混频(FWM)、调制不稳定及孤子自频移等多种非线性效应获得 1 μm 或更宽的 SC^[12-14]。然而在以上多种非线性效应的共同作用下获得的 SC 光谱中谱线的精细结构复杂,甚至无序。而在多波长光通信、光模数转换、高速光采样、任意波形发生等应用中要求 SC 谱尽量平坦、信噪比高、谱线间隔分布均匀并且彼此之间相位稳定^[3-4]。

本文提出采用波长较小间隔(约 10 nm)的双波长光脉冲抽运,该方法较单波长光脉冲抽运拓宽了 SC 谱宽度,同时解决了 SC 光谱结构无序的问题。研究了这种双波长抽运产生 SC 的机理及 FWM 效应的作用,采用光谱切割方法获得相干的双波长、25 GHz 重复频率的超短光脉冲,在较低抽运功率下获得了宽度为 130 nm、间隔为 25 GHz 谱线有序排列的 SC,验证了产生 SC 的相干性。

2 双波长超短脉冲抽运有效展宽超连续谱的分析

光纤中 SC 的产生是由光纤中 SPM、FWM、XPM 和 SRS 效应综合作用的结果^[15],因为在窄脉冲作用下 SRS 的阈值很高,实际的抽运功率达不到这个水平,所以这里不考虑 SRS 效应。SPM 随着脉冲在传输过程中非线性效应的累积而缓慢地使频谱展宽,当展宽频谱越过光纤零色散点后,在 FWM 和 XPM 效应共同作用下,光谱能够被更有效地展宽,最终形成 SC。

双脉冲在光纤中传输过程中,若两束光波的传播方向和偏振方向都相同,那么非线性相移分别为^[15]

$$\varphi_1^{Nl} = n_2 k_0 z (|E_1|^2 + 2|E_2|^2), \quad (1)$$

$$\varphi_2^{Nl} = n_2 k_0 z (|E_2|^2 + 2|E_1|^2), \quad (2)$$

式中 n_2 为折射率系数, k_0 为波矢大小, z 为传播距离, E_1 、 E_2 分别为双脉冲振幅。其中(1)、(2)式右侧第一项为 SPM 引起的非线性相移,第二项为 XPM 带来的相移。由此可见,对相同的光强, XPM 作用是 SPM 作用的两倍。此外,在光谱展宽过程中,当双脉冲在时域上相对位置较近,且频域上靠近光纤零色散点处时,可有效产生 FWM 效应,使光谱展宽更加迅速。

对比双脉冲抽运产生 SC 与单脉冲抽运产生 SC,利用非线性薛定谔方程^[15]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha A}{2} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right], \quad (3)$$

式中 A 为脉冲慢变包络振幅, z 为脉冲在光纤中传输的距离, T 为以中心波长群速度移动的参考系的时间参量, α 为光纤传输过程中的损耗, γ 为非线性系数, β_2 、 β_3 分别为二阶和三阶色散系数, ω_0 为角频率, T_R 为拉曼系数。

对上述方程进行数值模拟,可计算出在保持总抽运功率不变的条件下,双波长抽运比单波长抽运在频谱展宽上更具优势。计算中,抽运光的中心波长分别设定为 1544 nm 和 1554 nm;抽运脉冲为高斯形状,半峰全宽为 2 ps; HNLF2 长度为 500 m,非线性系数为 11 (km·W)⁻¹,光纤零色散点在 1550 nm 处,色散斜率为 0.006 ps/(nm²·km)。图 1 给出了产生的 SC 的 20 dB 谱带宽随抽运总功率的变化情况。值得注意的是,图中横坐标为输入到 HNLF2 的总抽运功率,以输入总功率为 17 dBm 为例,单波长抽运情况下,1544 nm 和 1554 nm 波长输入 HNLF2 的功率均为 17 dBm,双波长抽运条件下,每个波长输入到 HNLF2 中的功率为 14 dBm。从图 1 可以

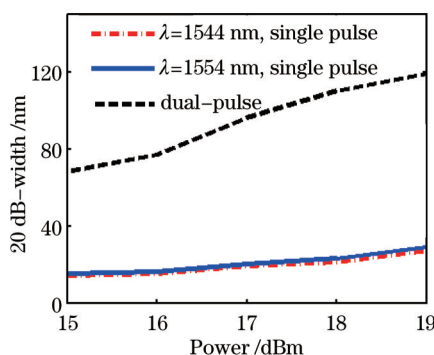


图 1 SC 的谱带宽随抽运总功率变化趋势图

Fig.1 Bandwidths of SC versus the total pump power

看出,双波长的功率之和与单波长抽运功率相同情况下,尽管每个波长上功率较单波长抽运时降低了一半,然而由于XPM和FWM的有效激发,双脉冲抽运产生SC的20 dB谱带宽较单脉冲抽运的SC的谱带宽还是成倍地增加。

3 实验装置及结果分析

实验装置如图2所示,左边点划线框内为抽运光产生器,基于色散补偿的脉冲切割器和 Mamyshev 再生器得到双波长超短脉冲^[16],可以有效地避免两个独立超短脉冲光源相位彼此独立等的弊端。连续光(CW)在相位调制(PM)中被 25 GHz 正弦微波(RF)信号调制,产生了一系列间隔为 25 GHz 的边带;经过单模光纤(SMF)后,产生一个初始光脉冲;该脉冲经光掺铒光纤放大器(EDFA1)放大后,注入到一段 HNLF1 中,由于 SPM 效应,初始脉冲的光谱会进一步扩展出更多的频率间隔为 25 GHz 的谱线,并且这些谱线之间具有确定的相位关系;当 SPM 导致的频谱扩展至一定程度时,采用光带通滤波器 OBPF1 和 OBPF2 分别滤出位于 CW 光中心波长短波长方向和长波长方向的两个边带,形成两个同步的、波长不同的光脉冲。由于这两个光脉冲的频谱的谱线间隔为 25 GHz 的整数倍数,并且彼此相位关系确定,故而形成了相干的双波长脉冲。实验产生了中心波长在 1553.22 nm、半峰全宽为 2.1 ps、谱宽为 1.5 nm 的光脉冲和中心波长在 1564.62 nm、半峰全宽为 2.0 ps、谱宽为 2 nm 的光脉冲。

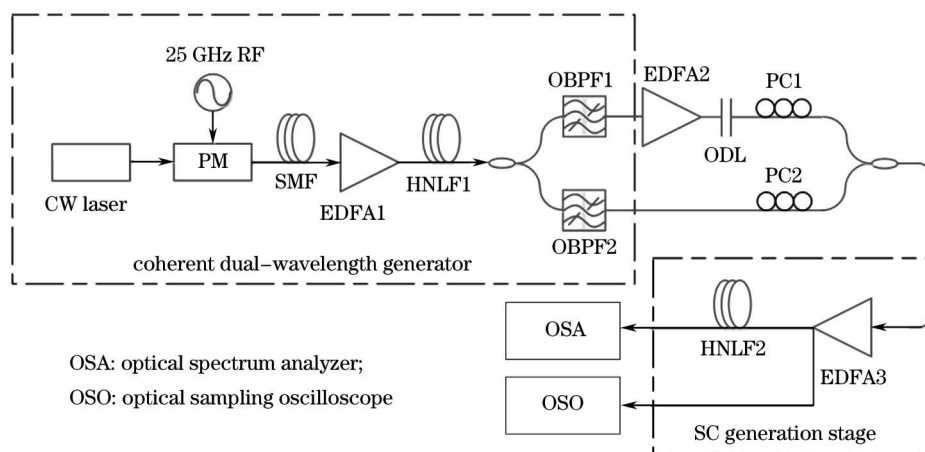


图2 实验装置图

Fig.2 Schematic of the proposed coherent SC generation

产生 SC 的 HNLF2 长度选取为 0.5 km、色散斜率为 0.006 ps/(nm²·km)、零色散点在 1550 nm 的色散平坦光纤,非线性系数为 10.7 (km·W)⁻¹,偏振模色散(PMD)为 0.11 ps。获得的 SC 如图 3 所示,图 3(a)和(b)分别为中心波长 1553.22 nm 和 1564.62 nm 的单波长光脉冲放大到功率为 24.1 dBm 时得到的 SC,宽度分别为 35 nm 和 30 nm。双脉冲经合波器合波注入到 EDFA3 中,总功率仍为 24.1 dBm。为了产生有效、宽平坦的 SC,要求两路超短脉冲光源严格同步,调节延迟线(ODL)、偏振控制器(PC1 和 PC2),得到 SC 如图 3(c),可见宽度急剧

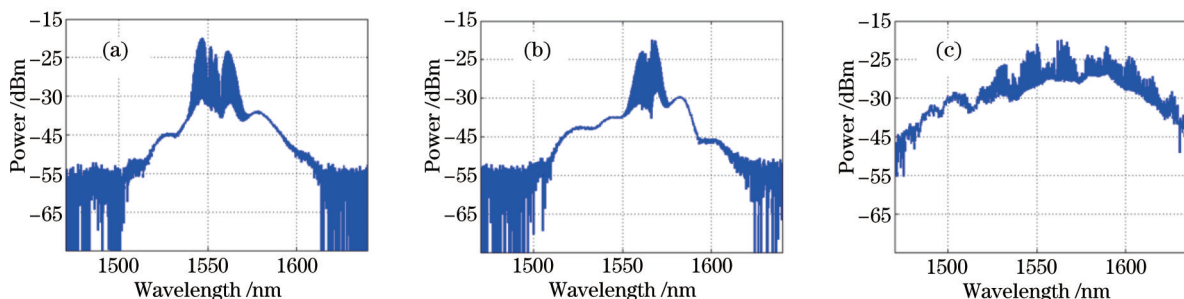


图3 实验测量得到的SC。(a)波长为 1553.22 nm 单脉冲抽运;(b)波长为 1564.62 nm 单脉冲抽运;(c)双脉冲抽运

Fig.3 Experimentally measured SC from the individual pulse pump. (a) A pulse pump at 1553.22 nm;

(b) a pulse pump at 1564.62 nm; (c) dual pulses pump

地增加,达到 130 nm (20 dB 带宽)。实验获得谱宽的结果与前面理论计算的结果相吻合。

通过调节图 2 中实验平台中的 ODL,研究了双脉冲相对时间延时对产生 SC 的影响。保持两抽运光脉冲的波长、脉宽不变,ODL 对 1553.22 nm 短波长的脉冲进行延时。图 4 为双脉冲在不同延时情况下产生的 SC。左侧波形图取自 HNL2 输入端(参见图 2 装置图),图中数字 1 表示 1553.22 nm 波长上的抽运脉冲,数字 2 表示 1564.62 nm 波长上的抽运脉冲。当两脉冲与如图 4(a)所示的波形完全不重合时,由于 FWM 和 XPM 效应很弱,所以产生如图 4(b)所示的很窄 SC,与图 3(a)、(b)的单个光脉冲抽运所获得的 SC 相像。调节 ODL,使得短波长脉冲与长波长脉冲有如图 4(c)所示的部分重合(短波长的后沿与长波长的前沿有部分重合,此时波形图显现出两个尖峰),由于 FWM 和 XPM 效应的作用,故得到如图 4(d)所示宽度增加的 SC。当两脉冲较明显重合时[如图 4(e)所示],两个光脉冲在高非线性光纤中相互作用距离最长,在 FWM 和 XPM 效应作用下 SC 如图 4(f)所示极大地增宽。调节 ODL 使短波长脉冲超过长波长脉冲并且之间有如图 4(g)所示的部分重合,得到如图 4(h)所示的 SC,从图中可知,当短波长脉冲超过长波长脉冲后,频谱明显变窄。该实验结果证明了双波长抽运中,产生 SC 的主要机理为 XPM 和 FWM。

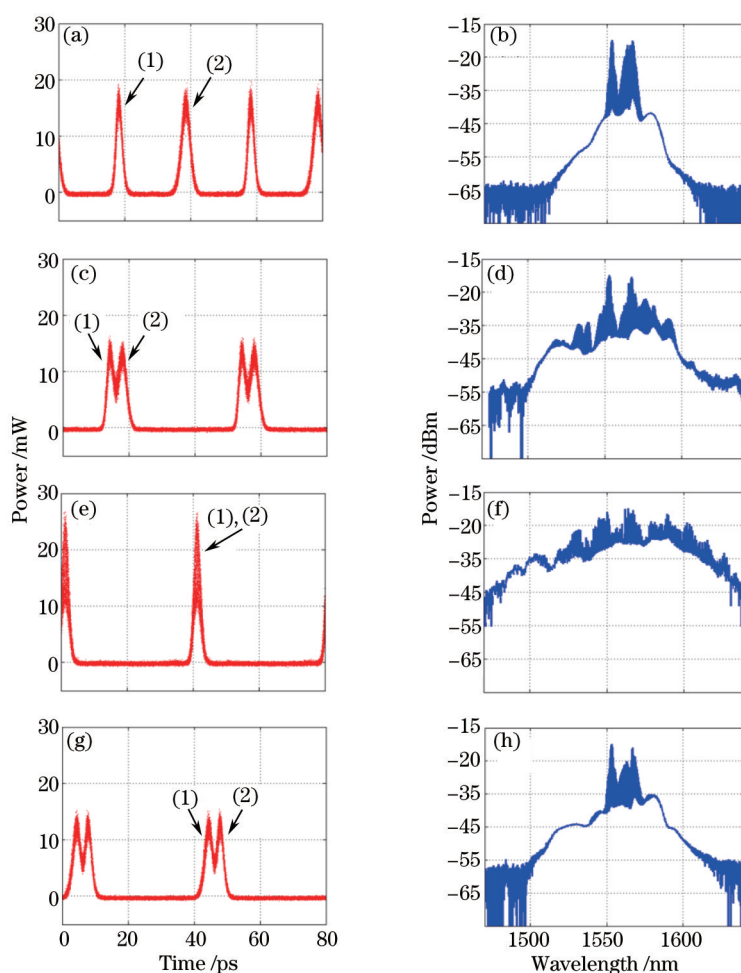


图 4 双脉冲抽运在不同时间延时波形图(a) (c) (e) (g)下产生的 SC (b) (d) (f) (h)

Fig.4 Combined waveforms of the dual pulses pump with different relative time delays (a) (c) (e) (g)and the generated SC (b) (d) (f) (h)

实验研究了双脉冲中心波长与产生的 SC 之间的关系,改变图 2 中 CW 激光器中心波长和 OBP1、OBPF2 的位置,得到了抽运波长为 1537 nm 和 1544 nm、1553 nm 和 1564 nm、1544 nm 和 1554 nm 的三组相干双脉冲源,分别代表双抽运脉冲中心波长同时位于光纤的正常色散区、反常色散区,以及分别位于正常色散和反常色散区的情形。EDFA3 仍将抽运放大至 24.1 dBm,产生的 SC 如图 5 所示。可以看出,在相同的抽运功率下,中心波长不同的双脉冲抽运产生的 SC 谱宽度不同。当双脉冲中心波长小于光纤的零色散点时,即在光纤的正常色散区,此时双脉冲抽运产生的 SC 谱宽度较窄,如图 5(a)所示。当双脉冲中心波长大于光纤的零色散

点,即在光纤的反常色散区时,产生的SC谱宽度最宽,如图5(b)所示。当双脉冲中心波长在光纤零色散点两侧时,产生的SC谱宽度较平坦,如图5(c)所示,宽度介于图5(a)和图5(b)之间。

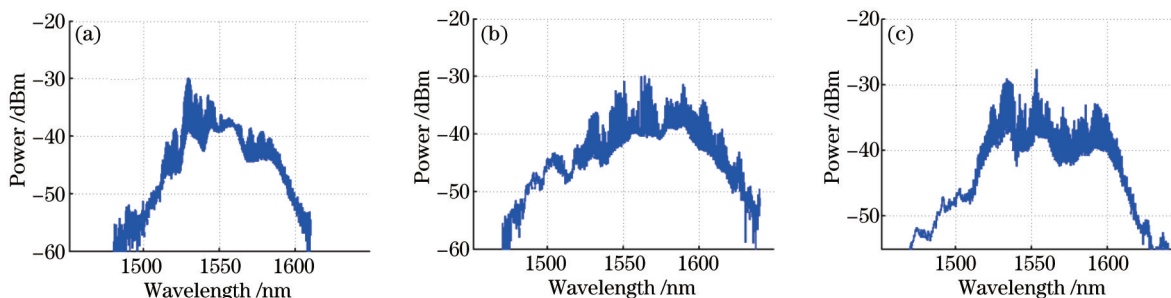


图5 不同频率的双脉冲抽运产生的SC。(a)波长在1537 nm和1544 nm; (b)波长在1553 nm和1564 nm; (c)波长在1544 nm和1554 nm

Fig.5 Output SC of dual-pulse pump located at (a) 1537 nm and 1544 nm; (b) 1553 nm and 1564 nm; (c) 1544 nm and 1554 nm

图5(a)为处于正常色散区1537 nm和1544 nm的两个光脉冲抽运,这时由于群速度色散(GVD)效应引起的脉冲展宽会削弱SPM效应,产生的SC展宽较小,不易满足相位匹配,因而FWM效应较低。图5(b)所示的1553 nm和1564 nm的两个抽运光脉冲均处于反常色散区,获得的SC谱宽度显著变大,是由于在反常色散区,GVD效应会增强SPM效应,使得两路抽运脉冲产生的SC很快跨越零色散点,FWM效应较强,FWM及XPM效应能够在较大波长范围内转移能量,因此产生的SC较宽,但多峰振荡结构使得光谱不够平坦。当双脉冲分别位于正常和反常色散区时,所得SC谱宽度[图5(c)]较图5(b)窄但平坦,较图5(a)宽。其原因为:长波长脉冲工作于反常色散区,谱宽展宽较宽;短波长脉冲位于正常色散区,展宽较窄;短波长较小的光谱导致FWM不能有效发生,这一点可以从图5(c)中短波长区域频谱强度明显低于图5(b)中相应区域得以验证。但由于FWM造成的谱周期性高低起伏效应也得到了抑制,所以产生的谱较为平坦。

谱线为有序排列才可以满足多波长的应用,观察图5的SC的精细结构。图6显示的是在图5(c)的SC中截取的1530~1535 nm以及1555~1560 nm两段光谱,精细结构显示得到的SC为间隔相等、信噪比较好的宽光谱。

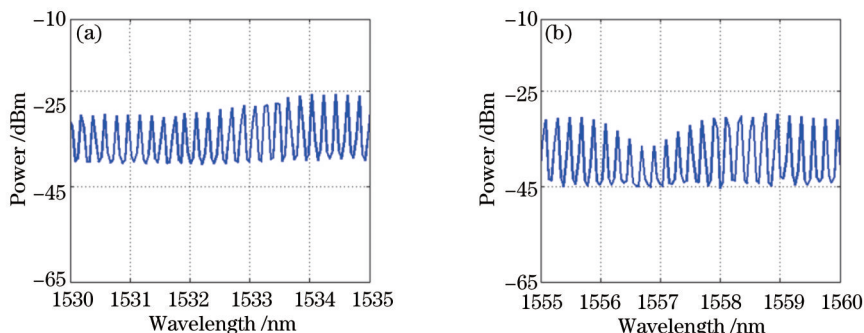


图6 不同位置的谱线图

Fig.6 Optical spectra in different locations

为证明产生的SC的谱相干性,根据

$$E(t) = \sum_{k=M}^N A_k \exp(j\omega_k t + \varphi_k), \quad (4)$$

式中 A_k 、 φ_k 和 ω_k 分别为每根谱线的振幅、相位和角频率,输出光脉冲 $E(t)$ 与 φ_k 有关,若每根谱线 φ_k 相关,则光场 $E(t)$ 固定不变,即得到稳定的输出波形。反之,如果SC不相干,谱线强度和相对相位随机变化,则不可能合成出稳定的周期性信号。实验中,采用2.2 nm的滤波器对产生的SC不同位置进行滤波。如图7所示,滤波器中心波长分别在1543、1550、1559 nm处对SC进行滤波(a)、(c)、(e),均能得到如图7(b)、(d)、(f)所示的稳定的波形,从而验证了产生SC的相干性。

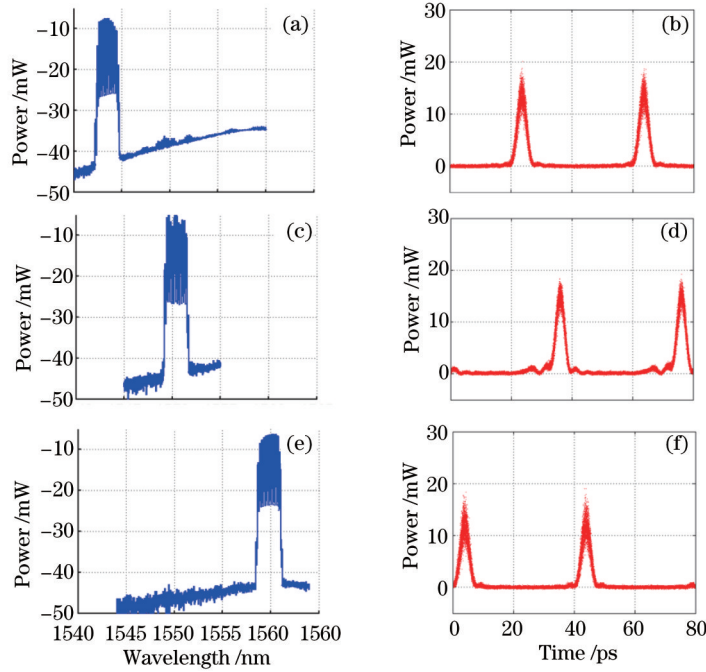


图7 滤波器在波长 1543, 1550, 1559 nm 处(a) (c) (e)滤出的光脉冲(b) (d) (f)
 Fig.7 Optical pulses (b) (d) (f) extracted from SC by filters at 1543, 1550, 1559 nm (a) (c) (e)

4 结 论

提出使用光谱切割的双波长超短光脉冲源抽运产生超连续谱的方法,采用的双波长超短脉冲由于来源于同一台激光器,因此双脉冲抽运产生的SC仍能保持良好的全谱相干性。实验结果表明,在相同功率下,双波长脉冲抽运方式获得的SC的谱宽度远大于单波长脉冲抽运方式获得的。SC展宽与两抽运脉冲相互作用时间有关,两脉冲重合时FWM和XPM效应强,产生的SC的谱宽度极大地增加。实验中仅利用24.1 dBm的抽运光功率即获得130 nm超连续谱,证明了这是一种有效降低SC抽运功率的方法,并且产生的SC排列有序、相干性良好,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 F Coppinger, A S Bhushan, B Jalali. Time-stretched analog-to-digital conversion (TSADC) [C]. Lasers and Electro-Optics, 1999.
- 2 H Takara, S Kawanishi, T Morioka, *et al.*. 100 Gbit/s optical waveform measurement with 0.6 ps resolution optical sampling using subpicosecond supercontinuum pulses [J]. Electron Lett, 1994, 30: 1152-1153.
- 3 E Yamada, H Takara, T Ohara, *et al.*. 106 channel \times 10 Gbit/s, 640 km DWDM transmission with 25 GHz spacing with supercontinuum multi-carrier source [J]. Electron Lett, 2001, 37(25): 1534-1536.
- 4 T A Birks, W J Wadsworth, P J Russel. Supercontinuum generation in tapered fibers [J]. Opt Lett, 2000, 25(19): 1415-1417.
- 5 S Coen, A H L Chau, R Leonhardt, *et al.*. White-light supercontinuum generation with 602 ps pump pulses in a photonic crystal fiber [J]. Opt Lett, 2001, 26(17): 1356-1358.
- 6 Meng Jia, Hou Lantian, Zhou Guiyao, *et al.*. Fabrication and study on the small-core index-guiding photonic crystal fiber [J]. Chinese J 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.
- 7 M El-Amraoui, G Gadret, J C Jules, *et al.*. Microstructured chalcogenide optical fibers from As₂S₃ glass: Towards new IR broadband sources [J]. Opt Express, 2010, 18(25): 26655-26665.
- 8 Li Xuyou, Xu Zhenlong, Ling Weiwei, *et al.*. Numerical simulation and analysis of photonic crystal fibers with high nonlinearity and flattened chromatic dispersion [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505003.
 李绪友, 许振龙, 凌卫伟, 等. 高非线性色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505003.
- 9 Guo Chunyu, Ouyang Deqin, Ruan Shuangchen, *et al.*. Supercontinuum generation from a tapered photonic crystal fiber pumped

- with a high-power nanosecond fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0405003.
- 郭春雨, 欧阳德钦, 阮双琛, 等. 高功率纳秒光纤激光器抽运锥形光子晶体光纤产生超连续谱[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405003.
- 10 Hou Jing, Chen Shengping, Chen Zilun, *et al.*. Recent developments and key technology analysis of high power supercontinuum source [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080010.
- 侯 静, 胜 平, 陈子伦, 等. 高功率超连续谱光源研究进展与关键技术分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080010.
- 11 E Räikkönen, G Genty, O Kimmelma, *et al.*. Supercontinuum generation by nanosecond dual-wavelength pumping in microstructured optical fibers [J]. Opt Express, 2006, 14(17): 7914-7923.
- 12 C Xiong, Z Chen, W J Wadsworth. Dual-wavelength-pumped supercontinuum generation in an all-fiber device [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(11): 1638-1643.
- 13 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin, *et al.*. Dual-wavelength pumped supercontinuum generation in tapered photonic crystal fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0206001.
- 奚小明, 陈子伦, 孙桂林, 等. 双波长抽运拉锥光子晶体光纤产生超连续谱研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0206001.
- 14 X F Zhao, Y F Yang, H B Zhou, *et al.*. Influence of degenerate four-wave mixing on the performance of supercontinuum-based multiwavelength optical source [J]. Chinese Physics, 2007: 1672-1677.
- 15 G P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- 16 K Igarashi, K Kikuchi. Optical signal processing by phase modulation and subsequent spectral filtering aiming at applications to ultrafast optical communication systems [J]. J Sel Top Quantum Electron, 2008, 14(3): 551-565.

栏目编辑: 王晓琰