

# 利用超连续谱光源产生超短光脉冲\*

伍 剑 李玉华 娄彩云 高以智

(清华大学电子工程系激光组, 北京 100084)

**摘 要** 利用光纤中的各种非线性效应, 获得了重复频率为 2.5 GHz、光谱宽度达 60 nm 的超连续谱超短光脉冲源。利用两个带宽分别为 0.4 nm 及 1.2 nm 的可调谐滤波器, 从超连续光谱的不同波长处获得了脉宽为 5.7 ps 及 3.6 ps 的超短光脉冲。由实验规律发现, 在多种非线性效应中, 四波混频效应对超连续光谱的形成有重要作用。

**关键词** 超连续谱, 锁模光纤激光器, 光时分复用。

## 1 引 言

波分复用(WDM)技术及光时分复用(OTDM)技术是构建未来高速、大容量光纤通信网的两种不同的技术途径, 且两者各有所长。目前, 分别利用这两种技术所能达到的通信容量大致为数百 Gbit/s。然而, 单独应用这两种技术中的任何一种技术进一步扩大容量, 都遇到了很大的困难。为了获得更大的通信容量, 现在的一种趋势是将波分复用技术与光时分复用技术结合起来, 即用光时分复用技术来提高波分复用系统的单信道的容量。在这样一种系统中, 需要多波长的超短光脉冲源作系统的发射光源。超连续谱超短光脉冲源能在很宽的光谱范围内同时产生多波长的超短光脉冲, 所以它将在未来的波分复用/光时分复用光网中扮演重要角色。利用超连续谱超短光脉冲源, Morioka 等人已实现了 1 Tbit/s 的传输容量<sup>[1]</sup>。此外, 超连续谱光源还可用于波长变换及测量光纤的色散<sup>[2]</sup>等领域。

超连续谱超短光脉冲的产生是基于光纤中各种非线性效应的共同作用。光纤中的自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、受激拉曼散射(SRS)及四波混频(FWM)等非线性效应均能导致脉冲光谱展宽。当峰值功率很高(2~ 5 W)的超短光脉冲注入一段色散位移光纤(此光纤的零色散波长与光脉冲的中心波长接近)中后, 在光纤中各种非线性效应的共同作用下, 出射脉冲的光谱极大地展宽。利用多个中心波长不同的滤波器可同时在此光谱的不同波长处滤取宽度大致相同的超短光脉冲。目前, 虽已有超连续谱光源的实验及应用报道, 但尚未对其规律进行充分研究。Nowak 等人从超连续谱对称及振荡的特点出发, 认为自相位调制效应在超连续谱的产生中起主要作用<sup>[3]</sup>。

本文报道了在超连续谱超短光脉冲源方面进行的实验研究。我们研制的超连续谱超短光

\* 国家自然科学基金(69738010)及国家科委 863 高技术资助项目。

收稿日期: 1998-07-03; 收到修改稿日期: 1998-12-29

脉冲源的重复频率为 2.5 GHz, 谱宽最大可达 60 nm, 用滤波器在超连续谱光源的不同波长处滤出脉宽为数皮秒的超短光脉冲。同时, 从实验中还发现四波混频效应对超连续谱的产生有重要影响。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。其中抽运激光器为可调谐主动锁模光纤激光器<sup>[4]</sup>。其重复频率为 2.5 GHz, 出射光脉冲的平均功率约为 1 mW, 光脉冲宽度约为 20 ps, 中心波长可调范围为 1529~1564 nm。此光脉冲经过一段长为 2 km 的常规单模光纤(SMF)传输后注入掺铒光纤放大器 1, 常规单模光纤的作用是补偿此光脉冲中的正啁啾并压缩光脉冲, 压缩后的光脉冲宽度为 16 ps。此掺铒光纤放大器的饱和输出功率为 16 dBm, 其后用一带宽为 1 nm 的滤波器滤除其放大的自发辐射成分。光脉冲经此掺铒光纤放大器放大后注入 5.5 km 长的色散位移光纤(DSF), 利用此色散位移光纤中的高阶孤子效应进一步压缩光脉冲。此光纤在 1551.5 nm 波长处的色散参量为 2.24 ps/(nm·km), 调节入射光脉冲的功率以获得最佳压缩, 压缩后脉冲宽度为 3 ps。压缩后的光脉冲再经另一掺铒光纤放大器 2 放大, 进一步提高功率水平后注入一段长为 2.2 km 的色散位移光纤, 此光纤的零色散波长为 1550.8 nm, 掺铒光纤放大器 2 的饱和输出功率为 18 dBm。超连续谱即在这一段光纤中产生。用光谱仪测量从此光纤出射光的超连续光谱。并用不同带宽的可调谐滤波器在超连续光谱的不同波长处滤取光脉冲。所提取出的光脉冲的宽度用二次谐波自相关仪测量。

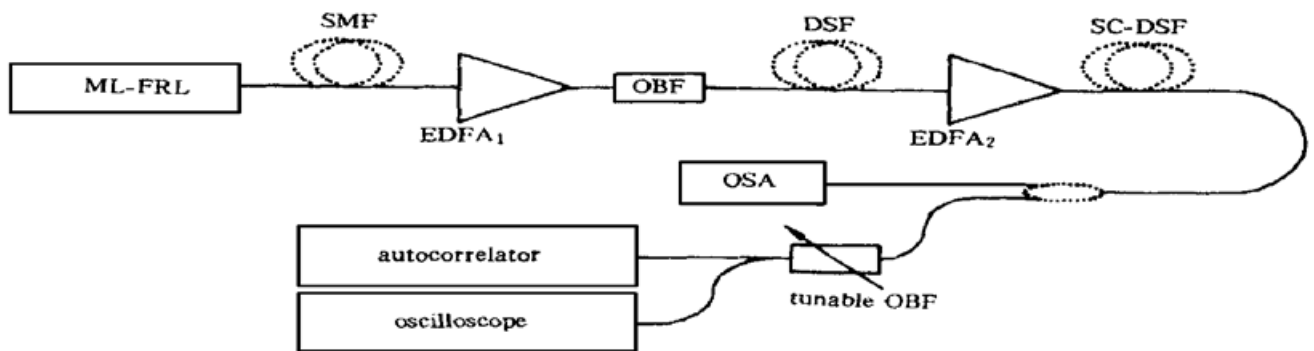


Fig. 1 Experimental setup. OSA: Optical spectrum analyzer, OBF: Optical bandpass filter

## 3 实验结果及分析

图 2 为 2.2 km 的色散位移光纤前后脉冲的光谱图, 其中抽运光脉冲的中心波长为 1551.5 nm。对比图 2(a) 及(b)可见, 由此色散位移光纤出射光的光谱较入射光的光谱有极大展宽, 展宽后的超连续谱的宽度为 40 nm(-20 dB 宽度)。从实验中还发现, 抽运光脉冲功率对超连续谱的宽度有很大影响。抽运光脉冲功率愈高, 超连续光谱的宽度愈宽。这是由于光纤中的非线性效应的强弱与抽运光脉冲的功率有关, 抽运光脉冲功率高, 非线性效应强, 则超连续光谱就会获得更大展宽。

调节可调谐滤波器的中心波长, 可在超连续光谱的不同波长处滤出宽度大致相同的超短光脉冲。图 3 是滤波器带宽为 0.4 nm 时, 从超连续光谱中滤出的光脉冲的光谱及相应的自相关曲线, 按双曲正割脉冲计算, 滤出脉冲的宽度大约为 5.7 ps, 脉冲的时间带宽积在 0.28~0.31 的范围内。

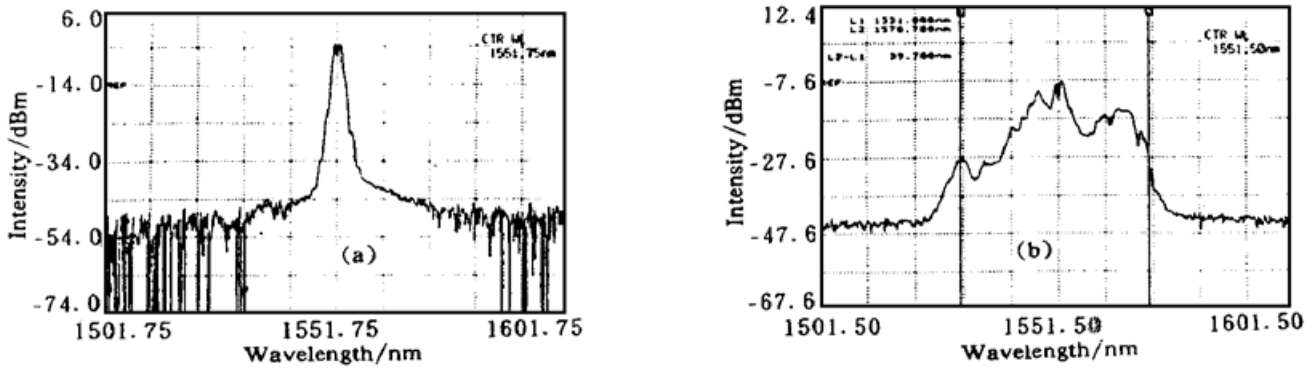


Fig. 2 Spectrum of pulses. (a) Before SC-DSF, (b) After SC-DSF ( $\lambda_{\text{pump}} = 1551.5 \text{ nm}$ )

图 4 对应于滤波器带宽为  $1.2 \text{ nm}$  的情况, 脉冲宽度为  $3.6 \text{ ps}$ , 时间带宽积在  $0.39 \sim 0.48$  的范围内。因此, 对于超连续光源来说, 取不同的滤波器带宽, 则可以得到不同宽度的光脉冲。滤波器带宽较窄时, 滤出的只是抽运光脉冲光谱的一部分(经波长变换), 因而滤出光脉冲的质量较好, 但脉宽较宽; 滤波器带宽较宽时, 虽然滤出光脉冲较窄, 但有可能此时其带宽已超过抽运脉冲谱宽, 所以脉冲的质量较差。

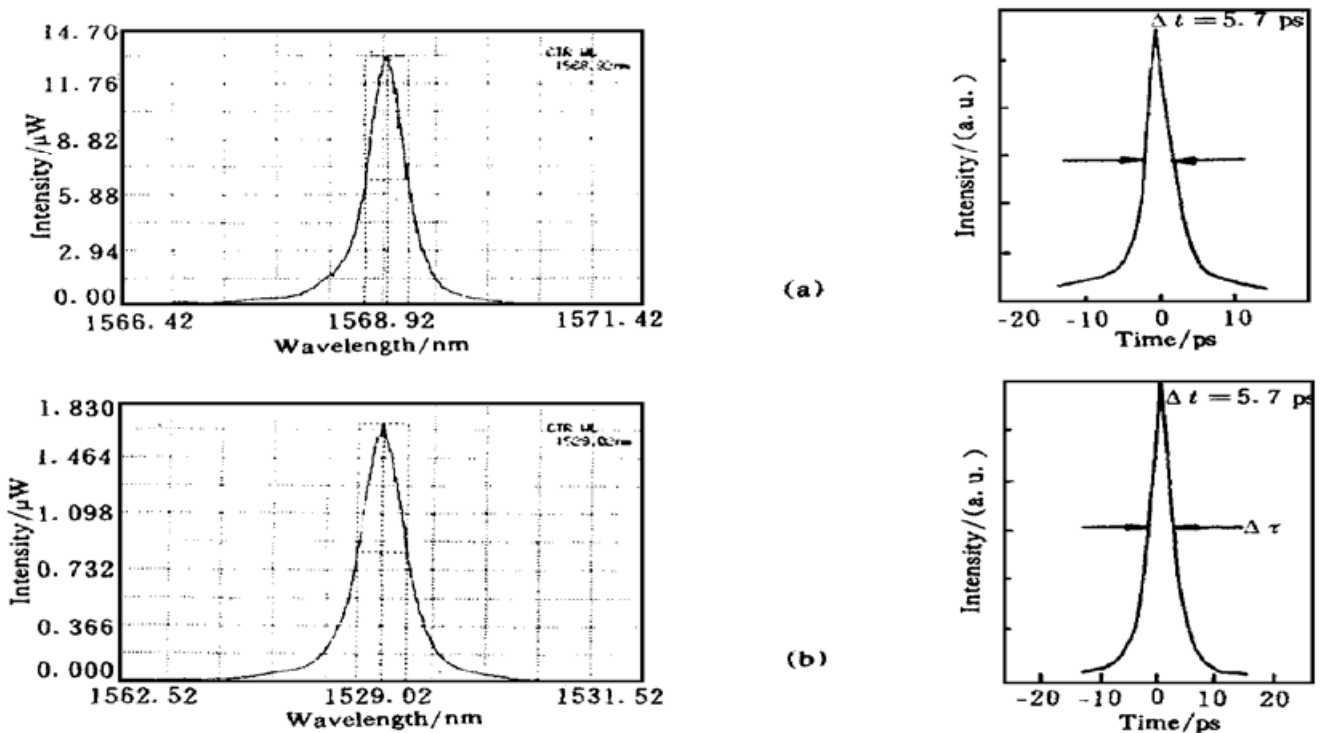


Fig. 3 Spectrum (left) and autocorrelation trace (right) of filtered pulses ( $\Delta\lambda_{\text{filter}} = 0.4 \text{ nm}$ ). (a)  $\lambda_0 = 1568.9 \text{ nm}$ , (b)  $\lambda_0 = 1529 \text{ nm}$

从实验中还发现, 抽运光脉冲的中心波长对超连续谱的产生有重要影响。改变锁模光纤激光器的波长, 抽运功率保持不变。当抽运光脉冲中心波长逼近色散位移光纤的零色散波长  $1550.7 \text{ nm}$  时, 超连续光谱的宽度逐渐变窄。在抽运光脉冲中心波长调至  $1548 \text{ nm}$  时, 超连续谱现象消失。而当抽运光脉冲中心波长处于此光纤的反常色散区时, 始终存在超连续谱展宽。图 5 为实验中获得的最宽超连续光谱的情况, 宽度达  $60 \text{ nm}$ , 相应抽运光脉冲的中心波长为  $1557 \text{ nm}$ 。从这一特点可见, 在超连续谱的产生过程中, 除自相位调制、交叉相位调制、受激拉曼效应外, 四波混频效应起了重要作用。因为在考虑光纤其它非线性效应的情况下,

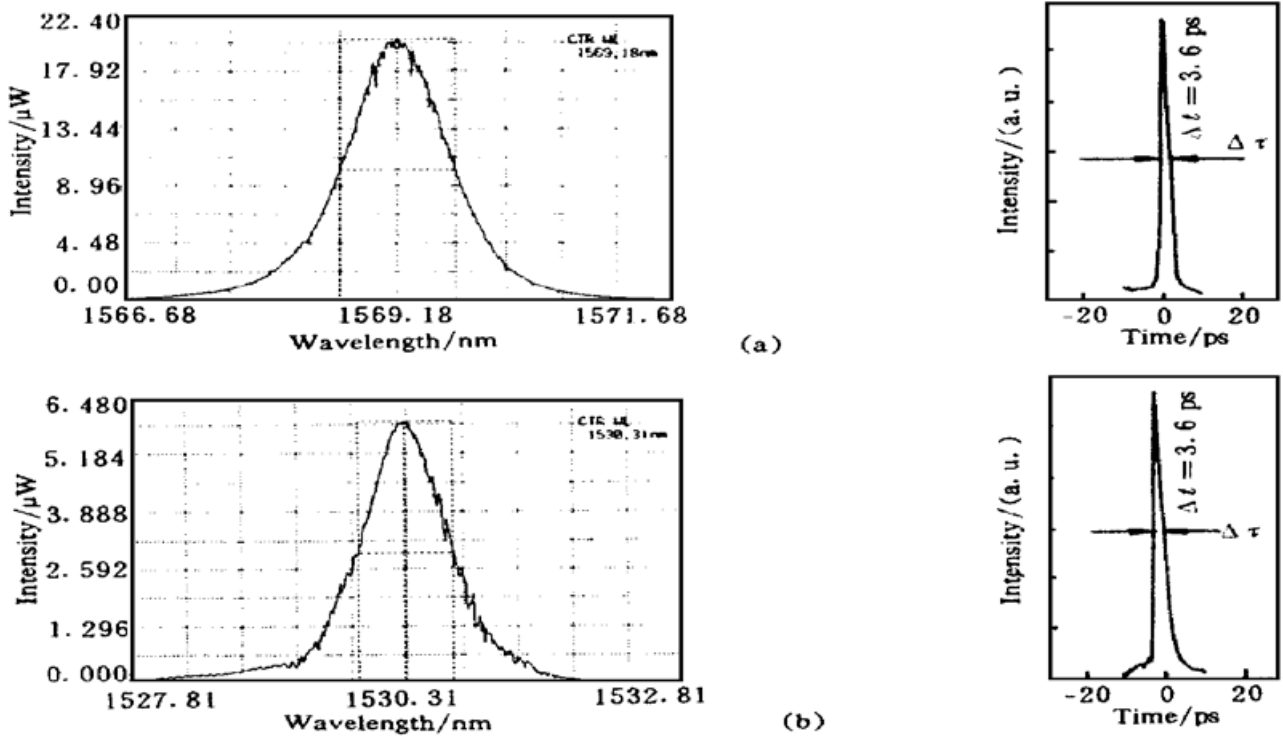


Fig. 4 Spectrum and autocorrelation trace of filtered pulses ( $\Delta\lambda_{\text{filter}} = 1.2 \text{ nm}$ ). (a)  $\lambda_0 = 1569.1 \text{ nm}$ , (b)  $\lambda_0 = 1530.3 \text{ nm}$

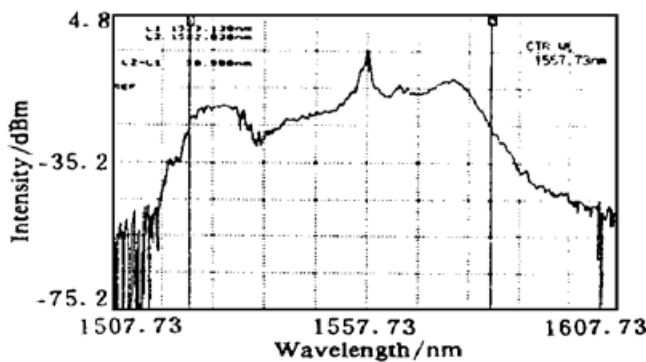


Fig. 5 Supercontinuum with bandwidth of 60 nm ( $\lambda_{\text{pump}} = 1557.7 \text{ nm}$ )

只有抽运光脉冲中心波长处于光纤的负色散区时,才能实现相位匹配,四波混频效应的效率才会高<sup>[5]</sup>。而在光纤的正色散区,无论如何都无法实现相位匹配,因而四波混频效应的效率极低。这个实验充分反映了这一点。

**结 论** 本文以 2.5 GHz 光纤锁模激光器为抽运光源,利用光纤中多种非线性效应的综合作用,产生谱宽为 40~ 80 nm 的超连续谱。利用不同带宽的可调谐滤波器,可从超连续谱的不同波长处提取 3~ 6 ps 的超短光脉冲。若利用多个滤波器,则可同时提取多个波长的光脉冲。从实验规律发现,抽运光脉冲中心波长对超连续谱的形成有重要影响。由此可以得出,在光纤的各种非线性效应中,四波混频起着重要作用。

衷心感谢邮电科学院计量中心孟宪云工程师、张颖艳工程师及北方交通大学光波所李堂军老师在实验设备上提供的帮助。

### 参 考 文 献

- [1] Morioka T, Takara H, Kawanishi S *et al.*. 1 Tbit/s (100 Gbit/s  $\times$  10 channel) OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(10): 906~ 907
- [2] Mori K, Morioka T, Saruwatari M. Group velocity dispersion measurement using supercontinuum picosecond pulses generated in an optical fibre. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(11): 987~ 989

- [3] Nowak G A, Shi C X, Andersen J X *et al.*. Multi-wavelength pulse source from continuum generated in dispersion-tailored fibers *Opt. Soc. Am. Technical Digest Series*, 1997, **11**: 178~ 179
- [4] 李玉华, 娄采云, 刘 军等. 抑制相位噪声实现主动锁模光纤激光器稳定工作. *光学学报*, 1998, **18** (7): 956~ 959
- [5] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. Boston: Academic, 1980. 315~ 339

## Ultrashort Pulse Generation from Supercontinuum Source

Wu Jian    Li Yuhua    Lou Caiyun    Gao Yizhi

(*Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 3 July 1998; revised 29 December 1998)

**Abstract** The ultrashort pulse source with supercontinuum up to 40~ 60 nm at a repetition rate of 2.5 GHz was obtained by a variety of nonlinear effects in the optical fiber. The ultrashort pulses with pulsewidth of 5.7 ps and 3.6 ps were filtered from supercontinuum source at different wavelength by applying two optical filters with bandwidth of 0.4 nm and 1.2 nm, respectively. It was demonstrated by experiments that the four-wave mixing influenced the generation of supercontinuum greatly.

**Key words** supercontinuum, mode-locked fiber ring laser, optical time division multiplexing (OTDM).