

利用光纤的非线性效应产生多波长 超短光脉冲*

余建军¹ 管克俭¹ 杨伯君² 陈树强¹

(北京邮电大学¹ 电信工程学院;² 基础科学部 北京 100876)

提要 采用光纤环激光器为光源,色散位移光纤为非线性介质,利用光纤的非线性效应产生超连续(supercontinuum)光谱信号,光谱宽度超过 40 nm,采用 F-P 腔和可调谐滤波器滤波后成功地得到了 12 个不同波长的超短光脉冲,每个波长的光脉冲重复频率为 2.5 GHz,相邻波长间距为 3.5 nm。

关键词 光纤环激光器,超短光脉冲,超连续光谱,非线性效应,自相关曲线

1 引 言

最近归零(RZ)码的波分复用(WDM)引起了人们的很大兴趣^[1],我们通过数值模拟发现采用 RZ 码比采用非归零(NRZ)码在单模光纤中传输有许多优点^[2]。对于 RZ 的 WDM 系统,产生不同波长的超短光脉冲是一个很关键的技术^[1,3-5],对于这一技术人们进行了广泛的研究^[3-6],其中利用色散位移光纤的非线性效应产生超连续频谱(SC)信号是一种非常有效的方法^[4],但是采用这种方式需要使用作泵浦光的超短光脉冲和色散位移光纤满足一定的条件,而且一般是固定激光器的光脉冲的中心波长,然后挑选适当的色散位移光纤以达到产生强非线性效应的目的^[4-6]。如果泵浦光的波长连续可调,那么对于任意零色散点的色散位移光纤均能通过采用调节泵浦光的中心波长来达到产生 SC 光信号的目的。光纤环激光器的研制成功为我们进行这一方面的实验提供了较好的条件。本文报道采用这一技术产生 12 个波长,波长间距为 3.5 nm,重复频率为 2.5 GHz 的多波长归零码激光器。

2 实验原理

光纤中的非线性效应主要包括自相位调制(SPM)效应和四波混频效应(FWM)、不同波长光脉冲的交叉相位调制(XPM)效应,以及受激拉曼散射(SRS)效应等等。其中 FWM 包括由于 SPM 效应产生新频谱成份和泵浦光本身的 FWM、掺铒光纤放大器(EDFA)的自发辐射噪声(ASE)与泵浦光的 FWM 及新产生的四波混频光与泵浦光的 FWM。当信号光波长处于色散位移光纤的零色散点附近时,SPM 和 FWM 为主要非线性效应,在光脉冲传输的初始阶段,色散基本为零,但入纤超短光脉冲的峰值功率到达 1 W 左右时,会产生很强的自相位调制效应,导致信号光频谱展宽,

* 国家 863 高科技重点资助项目,原邮电部重点资助项目,霍英东青年科技资金资助项目。

收稿日期: 1998-01-07; 收到修改稿日期: 1998-04-30

这些展宽的频谱与泵浦信号及 ASE 噪声信号共同作用产生很强的四波混频效应, 导致频谱连续展宽。经过这些非线性效应后, 使得信号光的频谱展宽很多, 这种光信号称为 SC 信号, 对这些 SC 光脉冲进行合理的滤波后便能得到中心波长不同的超短光脉冲。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示。实验所使用的仪器如下: 取样示波器带宽为 20 GHz。SHG 自相关测量仪为相关课题组自制^[7]。光谱仪为日本 ANDO 公司 MS9001B1 型, 最小分辨率为 0.1 nm。高速光电变换器为美国泰克公司的 SA-42 型, 响应波长范围为 1000~1600 nm, 响应时间 < 40 ps。掺铒光纤放大器 EDFA1 的特性如下: 饱和输出平均功率为 16 dBm, 小信号增益为 30 dB, 放大器噪声为 6.4 dB。EDFA2 特性如下: 饱和输出平均功率为 18 dBm, 小信号增益为 30 dB, 放大器噪声为 6.2 dB 左右。EDFA3 特性如下: 饱和输出平均功率为 8 dBm, 小信号增益为 30 dB, 放大器噪声为 6.7 dB 左右。F-P 腔光滤波器的自由谱域为 3.5 nm, 3 dB 的带宽为 0.08 nm, F-P 腔可以通过改变压电陶瓷电压从而选择中心波长。两个可调谐滤波器的性能完全相同, 可调谐滤波器中心波长为 1550 nm, 可调范围为 40 nm 左右, 3 dB 带宽为 1.8 nm, 插入损耗小于 2 dB。色散位移光纤(DSF)的损耗为 0.25 dB/km, 光纤长度为 5.112 km, 光纤有效面积为 $51 \mu\text{m}^2$, 在不同的波长处光纤的色散如表 1 所示。

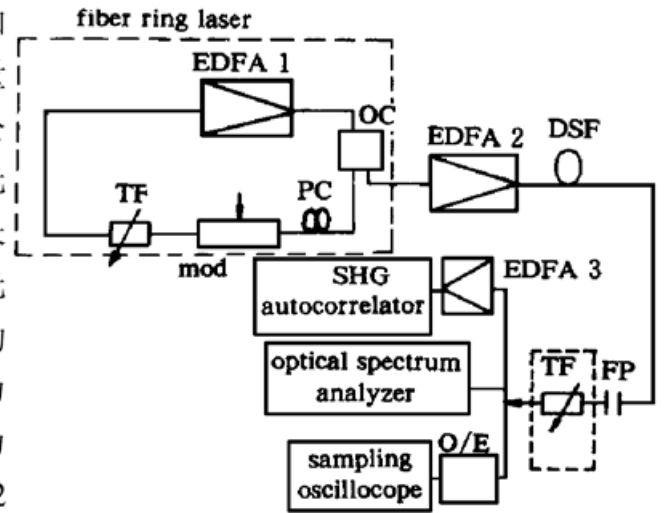


图 1 实验装置

DSF: 色散位移光纤; O/E: 光电变换器; EDFA: 掺铒光纤放大器; TF: 可调谐滤波器; PC: 偏振控制器; F-P: 法布里-珀罗滤波器; Mod: 铌酸锂调制器; OC: 光耦合器

Fig. 1 The experimental setup

DSF: dispersion shifted fiber; O/E: optical/electrical signal converter; EDFA: erbium doped fiber amplifier; TF: tunable filter; PC: polarization controller; FP: Fabry-Perot filter; Mod: LiNbO₃ modulator; OC: optical coupler

表 1 光纤参数

Table 1 The fiber parameters

wavelength/nm	1530	1534	1538	1542	1546	1548	1550	1554	1557	1560
GVD/ps/nm/km	-1.30	-1.00	-0.71	-0.42	-0.14	0	0.14	0.42	0.63	0.84

4 实验结果及分析

实验所用光纤环激光器波长可调范围为 40 nm (1530~1570 nm)^[8], 重复频率为 2.5 GHz, 产生的超短光脉冲的特性如图 2 所示, 光脉冲的最大半宽度为 40 ps, 频谱 3 dB 带宽为 0.08 nm, 时间带宽积为 0.399。光纤环激光器产生光脉冲平均功率为 2.4 dBm。在以下将光纤环激光器产生的光脉冲称为泵浦光。

我们通过下式求得经过 EDFA2 放大后的超短光脉冲的峰值功率 $P_{\text{peak}} = \frac{P_{\text{av}} \times \sqrt{2}}{f \times T_{\text{FWHM}}} =$

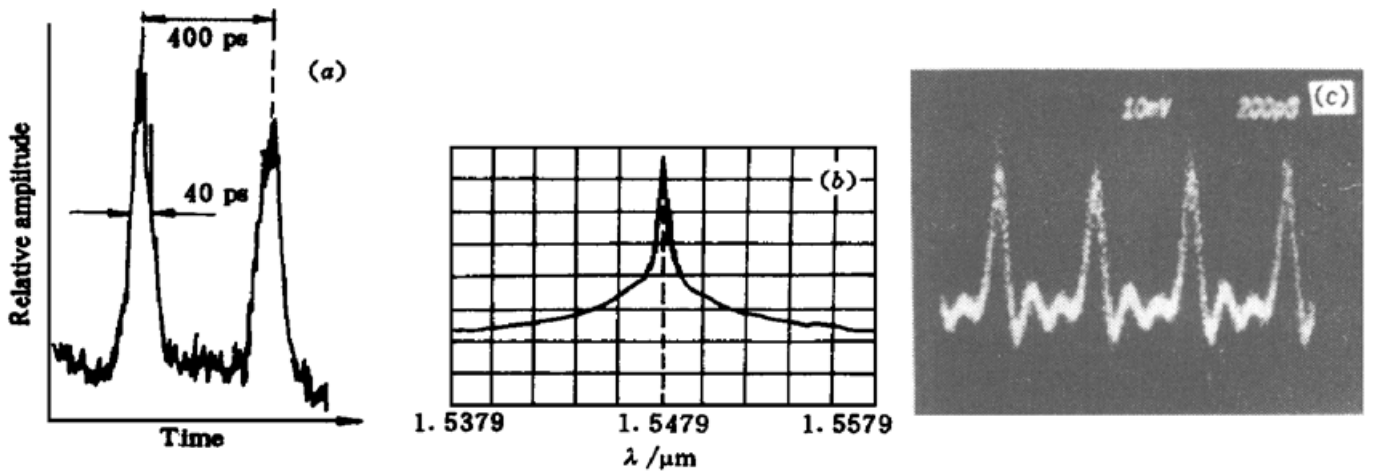


图 2 光纤环激光器产生的超短光脉冲的自相关曲线 (a), 光谱图(b) 和用取样示波器测量到的波形(c)

Fig. 2 SHG auto-correlation trace and spectrum from the optical fiber ring laser

(a) auto-correlation trace; (b) optical spectrum; (c) optical pulses measured by a sampling oscilloscope

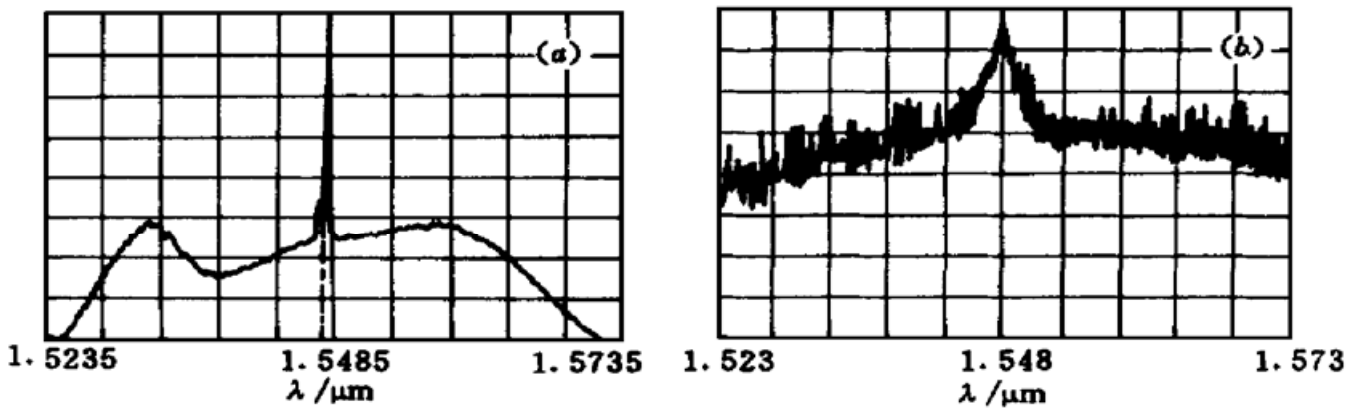


图 3 经过 5.112 km 的色散位移光纤传输传输前 (a) 和传输后(b) 的光谱图

Fig. 3 Optical spectrum with the pulse transmission over a 5.112 km dispersion shifted fiber

(a) before transmission; (b) after transmission

890 mW。其中 P_{av} 为光脉冲平均功率, f 为重复频率, T_{FWHM} 为脉冲的最大半宽度。由于光脉冲有 890 mW 的峰值功率, 且波长可调, 这为我们的实验创造了很好的条件。实验发现当信号光中心波长在 $1546 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1554 \text{ nm}$ 时均能经过 5.112 km 的色散位移光纤传输后产生很强的 SC 光信号。在以下的实验中将信号光中心波长固定在 1547.6 nm 左右。图 3 (a) 给出了从光纤环激光器输出的光信号经过 EDFA2 放大后的光谱图, 图 3 (b) 给出了经过色散位移光纤传输后的光谱图, 比较这两图可以清楚地看到经过色散位移光纤的非线性效应后, 信号光已经被调制到别的光谱上, 产生的信号与文献[9]模拟光脉冲在零色散附近传输的光谱特性一致。

采用 F-P 腔滤波器对产生的 SC 信号进行滤波, 得到的光谱如图 4 所示。图 4 (a) 为对整个 SC 范围滤波得到的光谱图, 图 4 (b) 为整个光谱图中的一部分。从图 4 (a) 可以看到有 15 个波长的光谱, 其中最大波长为 1578 nm 左右, 最小波长为 1533 nm 左右。在 F-P 腔后面再加一个可调谐滤波器滤波, 便能将这 15 个波长的信号分别过滤出来。但是由于可调谐滤波器调谐范围有限, 最多只能过滤出 12 个波长的光脉冲, 如果 F-P 腔滤波器的自由谱域更小, 将能得到更多波长的光脉冲。在本实验里的最大波长和最小波长是由可调谐滤波器的调谐范围决定的, 本工作的可调谐滤波器的调谐范围是 1530~ 1575 nm。通过可调谐滤波器滤波后可以得到的

最大波长为 1572.7 nm, 最小波长为 1533.6 nm, 其中相邻波长间距为 3.5 nm, 共 12 个波长。图 5 给出了中心波长为 1564.1 nm 的光信号, 频谱如图 5 (a) 所示, 频谱半宽度为 0.09 nm。将此信号用示波器测量得到的波形如图 5 (c) 所示。经过 EDFA3 放大后光脉冲自相关曲线如图 5 (b) 所示, 最大半宽度为 42 ps, 此脉冲时间带宽积为 0.47, 接近变换极限脉冲。

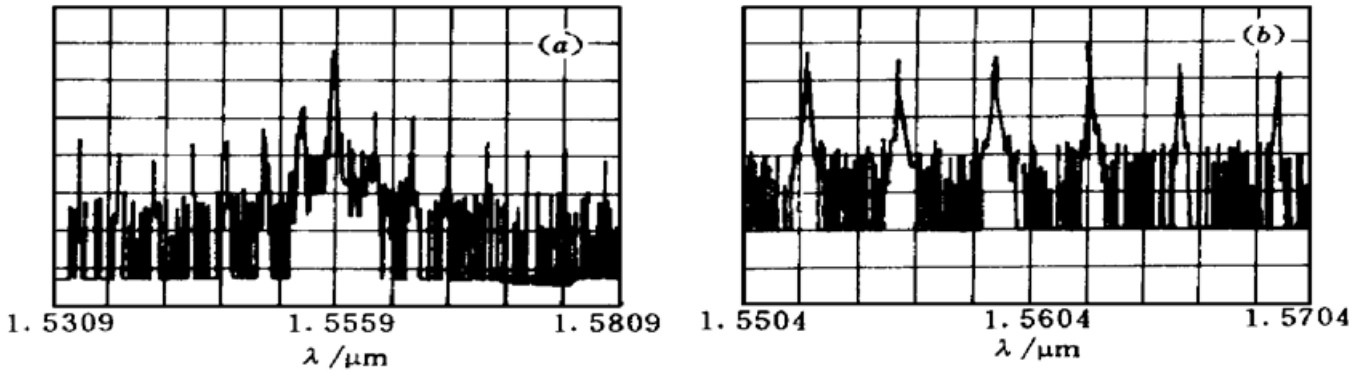


图 4 光谱图

(a) 整个范围内的光谱图; (b) 局部光谱图

Fig. 4 The optical spectrum after a F-P filter

(a) the whole optical spectrum; (b) the sectional optical spectrum

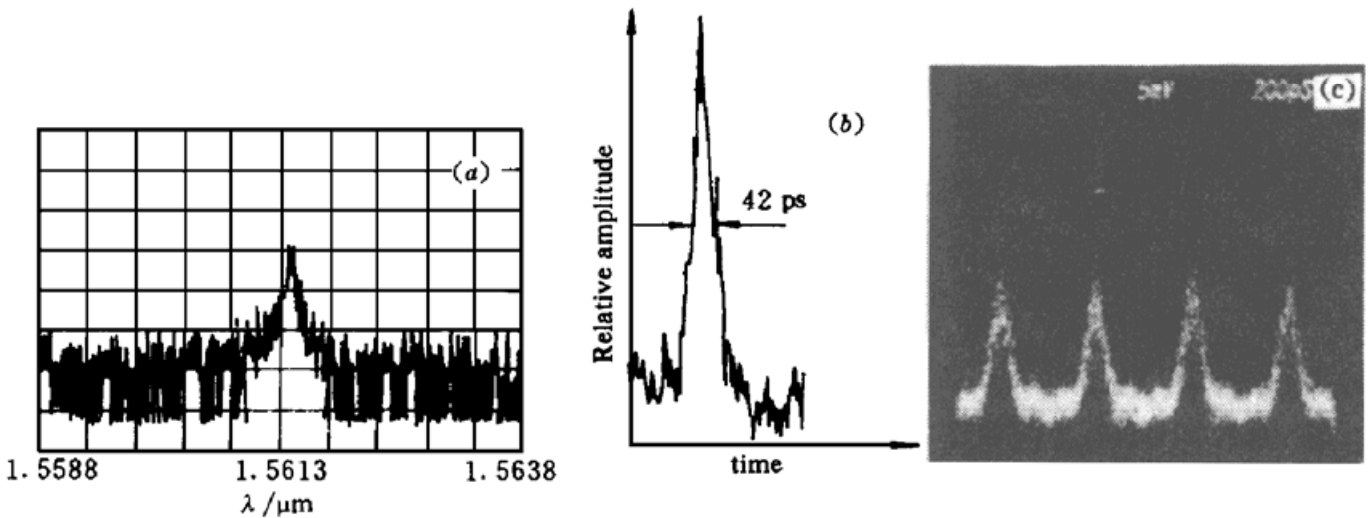


图 5 用可调谐滤波器过滤后中心波长为 1546.1 nm 的光脉冲的光谱图 (a), 自相关曲线 (b) 和用取样示波器测量得到的波形 (c)

Fig. 5 Optical spectrum, SHG auto-correlation trace, pulse shape after a tunable filter with the center wavelength of 1546.1 nm

(a) optical spectrum; (b) SHG auto-correlation trace; (c) pulse shape

参 考 文 献

- 1 O. Leclerc, E. Desurvire. Investigation into the robustness of 100 Gbit/s (5×20 Gbit/s) regenerated WDM soliton transoceanic transmission to line breaks and repairs. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(18): 1568~1578
- 2 Yu Jianjun, Guan Kejian, Xin Cai *et al.*. Comparison of the performance of NRZ and RZ WDM systems with long amplifier spacing and dispersion compensation. *J. Opt. Commun.*, 1999, **20**(1): 16~23
- 3 H. Takara, S. Kawanishi, M. Saruwatari *et al.*. Multiwavelength birefringent-cavity mode-locked fiber laser. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(25): 2274~2275
- 4 T. Morioka, K. Mori, M. Saruwatari. More than 100-wavelength-channel picosecond optical pulse gen-

- eration from single laser source using supercontinuum in optical fibres. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(10): 862 ~ 864
- 5 M. N. Islam, G. Sucha, I. Bar-Joseph *et al.*. Broad bandwidths from frequency-shifting solitons in fibers. *Opt. Lett.*, 1990, **14**(7): 370~ 372
- 6 K. Mori, T. Morioka, M. Saruwatari. Group velocity dispersion measurement using supercontinuum picosecond pulses generated in an optical fibre. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(11): 987~ 989
- 7 Yu Jianjun, Zhang Xiaoguang, Yang Bojun. The consideration for crystal by utilizing the second harmonic to detect soliton pulse. *Study on Opt. Commun.* (光通信研究), 1996, (1): 14~ 18 (in Chinese)
- 8 Yu Jianjun, Liu Yanxia, Yang Bojun *et al.*. Fiber ring laser of continuously tunable wavelength and repetitive frequency. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(12): 1061~ 1064 (in Chinese)
- 9 D. Marcuse. Single-channel operation in very long nonlinear fibers with optical amplifiers at zero dispersion. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(3): 356~ 361

The Generation of Multi-wavelength Ultra-short Optical Pulses by Utilizing a Fiber Ring Laser-pumped Supercontinuum in an Optical Fiber

Yu Jianjun¹ Guan Kejian¹ Yang Bojun² Chen Shuqiang¹

¹The School of Telecommunication Engineer, ²The Department of Basic Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

Abstract Utilizing an optical ring laser as the optical source, and a dispersion shifted fiber as the nonlinear material, a supercontinuum optical spectrum over 40 nm width was successfully generated. The WDM signals with a wavelength separation of 3.2 nm from the 12 wavelength channels each transmitting 30~ 40 ps pulses at a repetition rate of 2.5 GHz are generated.

Key words optical fiber ring laser, ultra-short optical pulse, nonlinear effects, SHG auto-correlator trace