

利用 10 GHz 主动锁模光纤激光器 在 DSF 中产生超连续谱*

娄采云 李玉华 伍 剑 高以智 崔瑞祯

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 报道利用色散位移光纤(DSF)中的复合非线性效应得到重复频率 10 GHz, 谱宽大于 50 nm 的超连续(SC)光谱, 研究了抽运光功率、波长与生成的 SC 光谱宽度和平坦度、光脉冲质量的关系。

关键词 光通信, 色散位移光纤, 非线性光学

1 引 言

高速、大容量光纤通信是当前国际上光通信研究的主要方向。光波分复用(OWDM)和光时分复用(OTDM)的结合可支撑未来超高速光通信网的实现。这种光通信方式的一个关键技术是获得高重复率、多波长的超短光脉冲源。光纤中的光谱超连续(supercontinuum, 简称 SC)展宽技术^[1-3]是一种有效的方法, 它能在很宽的光谱范围内同时产生多路波长超短光脉冲。S. Kawanish 等利用这种光源构成了传输容量为 3 Tb/s 的 OWDM/OTDM 实验通信系统^[2]。

根据国际上单信道传输速率已由 2.5 Gbit/s 上升到 10 Gbit/s 的发展动向, 本文采用 10 GHz 波长可调谐主动锁模光纤激光器作抽运光脉冲源, 利用在适当长度的色散位移光纤(DSF)中的 SC 展宽, 得到 10 GHz, 宽度大于 50 nm 的超连续谱光源, 经可调谐滤波器滤波后得到不同波长、脉宽与抽运光相似的近变换极限超短光脉冲, 利用阵列波导光栅(AWG)则可同时滤出 8 路多波长的光脉冲。研究了在光纤的反常色散区抽运光脉冲的特性(光脉冲功率、脉宽、中心波长)对 SC 光谱展宽的影响。

2 光纤中产生 SC 光谱的机理

光谱超连续展宽是指当一束强度极大的超短光脉冲通过光纤后, 透射光谱中产生许多新的频率成分, 光谱的宽度已远远大于入射光脉冲的谱宽。与块状固体非线性材料一样, 光纤中的自相位调制(SPM)、四波混频(FWM)、交叉相位调制(XPM)等非线性效应均可导致光谱展宽。由于光纤纤芯细, 截面上的功率密度很高; 同时, 采用具有适当色散特性的光纤实现相位匹配的方式也较为简单, 较固体材料更利于 SC 的产生。

* 国家高技术和自然科学基金(69738010)资助课题。

收稿日期: 1999-04-13; 收到修改稿日期: 1999-06-06

2.1 SPM 导致谱展宽^[4]

超短光脉冲在光纤中传输时, 由于光纤的折射率 n 与光脉冲的强度 I 有关

$$n(\omega, I) = n_0(\omega) + n_2 I$$

光脉冲的不同部位强度不同, 对应的折射率也就不同, 在传输过程中产生不同的相移, 形成 SPM, 结果造成光脉冲的光谱展宽。为了获得较大的 SPM 展宽谱, 光脉冲的宽度应尽量窄而峰值功率应尽量高^[3]。

2.2 XPM 导致谱展宽^[4]

XPM 的产生是因为光波的有效折射率不仅与此波的强度有关, 而且与另一些同时传播波的强度有关。显然, 在发生 XPM 效应时总伴随有 SPM 效应。XPM 引起相同波长不同偏振状态光波之间、相同偏振状态不同波长光波的耦合, 造成光谱展宽。

2.3 FWM 导致频谱展宽^[4]

光纤中的四波混频是产生 SC 现象的另一个重要因素。四波混频实际上是一个参量过程, 它起源于光纤的三阶电极化率。光纤中的 FWM 过程包括由于 SPM 及 XPM 效应产生的新频率成分与抽运光间及四波混频光与抽运光间的四波混频。FWM 要求参加混频的光波满足相位匹配条件, 根据文献[4], 若要实现相位匹配, 抽运光必须处于光纤的反常色散区。

总之, 光纤中的 SC 的产生是以上几种非线性效应综合作用的结果, 而且当 SPM 使光谱展宽到一定的程度后, 其他非线性效应才显现出来, 比较起来, SPM 效应对谱展宽起先导作用。

3 实验装置

图 1 为产生 SC 的实验装置示意图, 虚线框内为抽运源, 它由超短光脉冲激光器及光脉冲压缩装置组成。为了对 SC 的产生进行研究, 超短光脉冲源采用波长可调谐的主动锁模光纤激光器(AML-EDFL), 该激光器重复频率为 10 GHz, 输出波长调谐范围在 1525~ 1564 nm, 输出光脉冲的平均功率为 1.7 mW^[5]。主动锁模光纤放大器(EDFA1)和色散位移光纤 DSF1 构成光脉冲压缩装置, 激光器输出的光脉冲经该装置进行高阶光孤子压缩, 以保证有足够大的峰值功率产生 SC。图 1 中的 DSF2 是用于产生 SC 的色散位移光纤, 长度为 2.2 km, 其零色散波长 λ_0 为 1550.8 nm, 并且在 1500~ 1600 nm 范围内光纤的色散参数 D 与波长近似呈线性关系, 色散斜率~ 0.068 ps/nm²/km。EDFA2 是功率放大器, 它的最大输出可达 20 dBm。用可调光纤滤波器 OBF2 可由产生的 SC 光谱中滤取所需波长的光脉冲, 也可采用波导光栅阵列滤波, 同时得到多个波长的光脉冲。用高速光电探测器/通信信号分析仪、二次谐波自相关仪、分辨率为 0.05 nm 的光谱仪分别测量抽运光脉冲, SC 及滤波后的光脉冲的波形、脉宽和谱宽。

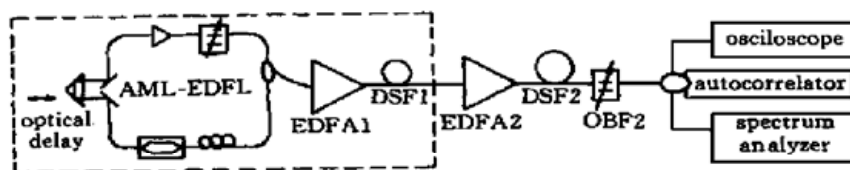


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

4 实验结果及讨论

利用图 1 所示的实验装置进行了产生 SC 的研究。主动锁模光纤激光器运转在重复频率 10 GHz 时输出光脉冲的脉宽为 10 ps, 适当调节输入到 DSF1 中的光功率使得压缩后的光脉冲宽度在 10~ 2 ps 范围内变化。此光脉冲经 EDFA2 放大后射入 DSF2 中, 随着射入 DSF2 中光功率的逐渐增加, 在光纤的出射端观察到了超连续谱展宽现象。图 2 (a), (b) 分别是波长为 1555 nm 光脉冲经高阶压缩后的光谱及抽运光脉冲峰值功率为 4 W 时得到的 SC 谱。图 2 (b) 中 SC 光谱宽度(20 dB 的宽度)为 50 nm, 与图 2 (a) 相比可以明显地看出 SC 谱展宽效应。在图 2 (a) 中, 光谱的分裂是高阶压缩的结果, 从光谱图可以明显地看到表明锁模特征的分立谱精细结构, 其间隔为 0.08 nm, 说明入射的光脉冲重复频率为 10 GHz。

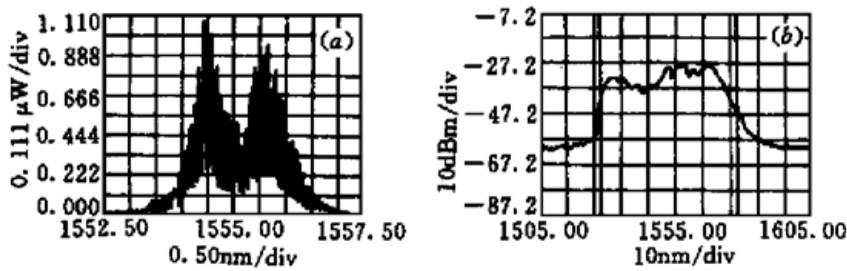


图 2 原始光脉冲及 SC 谱展宽后光脉冲的光谱

(a) 抽运脉冲; (b) DSF2 后的加宽光谱

Fig. 2 Spectrums of pump and SC pulses

(a) pump pulse; (b) broadened spectrum after DSF2

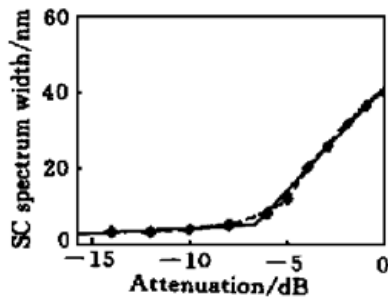


图 3 SC 宽度随抽运功率变化曲线

Fig. 3 Bandwidth of SC versus power of pump

在抽运波长为 1555 nm 时(此处光纤色散常数为 $D = 0.20 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$), 研究了抽运光功率对生成的 SC 谱的影响。图 3 为试验测得的 SC 光谱宽度随抽运功率变化的曲线。从图中看出最初产生的 SC 的宽度随抽运光功率的增加缓慢加宽; 但当抽运超过某一值时, SC 谱的宽度急剧增加, 这表明 SC 的产生存在着抽运光功率阈值。经计算抽运功率阈值与光脉冲在这段光纤中实现最佳压缩所需的功率对应。当抽运光脉冲的功率较低时, 主要是 SPM 效应使光谱展宽, 当达到最佳高阶孤子压缩光功率时, 光脉冲在时域上压缩到最窄, 其光谱充分展宽。此时由 SPM 展宽的光谱会越过光纤的零色散点, 而使 FWM 和 XPM 开始起作用。几种非线性效应的共同作用导致光谱进一步展宽, 并且随抽运功率的增长而迅速加宽。

当产生 SC 的光纤参数一定时, 抽运光中心波长的变化会导致 SC 谱宽度的变化。调谐抽运激光器的波长可以研究抽运波长对 SC 谱产生的影响。图 4 (a) ~ (d) 为抽运光功率相同、脉宽均为 2 ps 但抽运光波长不同时获得的 SC 谱, 图 4 (a) 的抽运波长为 1551 nm, (b) 的抽运波长为 1555 nm, (c) 为 1560 nm, 而 (d) 为 1565 nm, 得到的 SC 光谱的宽度分别为 40.2 nm, 49.6 nm, 55.9 nm 及 59.7 nm。对比这 4 张光谱图可看出, 图 4 (a) 和 (b) 的抽运波长处在光纤的零色散点附近得到的 SC 光谱平坦度较好, 随抽运波长远离光纤的零色散波长, SC 的

当产生 SC 的光纤参数一定时, 抽运光中心波长的变化会导致 SC 谱宽度的变化。调谐抽运激光器的波长可以研究抽运波长对 SC 谱产生的影响。图 4 (a) ~ (d) 为抽运光功率相同、脉宽均为 2 ps 但抽运光波长不同时获得的 SC 谱, 图 4 (a) 的抽运波长为 1551 nm, (b) 的抽运波长为 1555 nm, (c) 为 1560 nm, 而 (d) 为 1565 nm, 得到的 SC 光谱的宽度分别为 40.2 nm, 49.6 nm, 55.9 nm 及 59.7 nm。对比这 4 张光谱图可看出, 图 4 (a) 和 (b) 的抽运波长处在光纤的零色散点附近得到的 SC 光谱平坦度较好, 随抽运波长远离光纤的零色散波长, SC 的

宽度加大,但其平坦度变差。

对于获得的 SC 光脉冲,采用带宽为 1.2 nm 的可调光纤滤波器可滤出不同波长处的光脉冲,由于受滤波器宽度的限制,只能滤出波长在 1528~ 1574 nm 范围内的光脉冲。图 5 是对抽运波长为 1555 nm 时获得的 50 nm SC 光谱(光谱为图 4 (b)) 滤出的不同波长处光脉冲的光谱,由于光谱仪的分辨率为 0.05 nm,在光谱图中明显地看出间隔为 10 GHz(0.08 nm)的分立谱,在 SC 光谱的边缘处 1528 nm 和 1571 nm 滤出的光谱图中仍然能分辨出这种精细的结构,用二次谐波自相关仪测量上述三个波长,光脉冲的脉宽均为 2 ps。

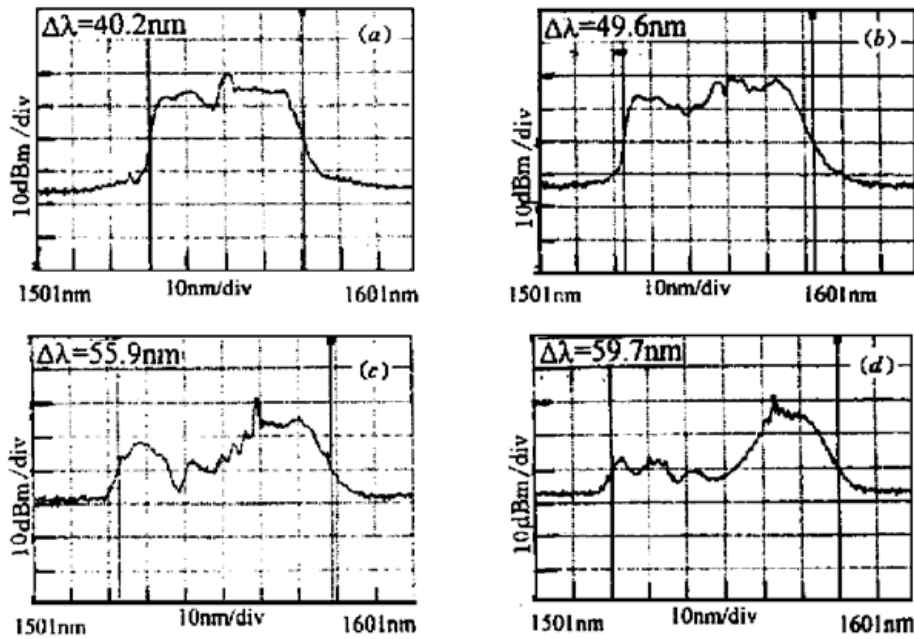


图 4 不同抽运波长时获得的 SC 谱

Fig. 4 SC spectrum at different pump wavelength

(a) $\lambda_p = 1551 \text{ nm}$; (b) $\lambda_p = 1555 \text{ nm}$; (c) $\lambda_p = 1560 \text{ nm}$; (d) $\lambda_p = 1565 \text{ nm}$

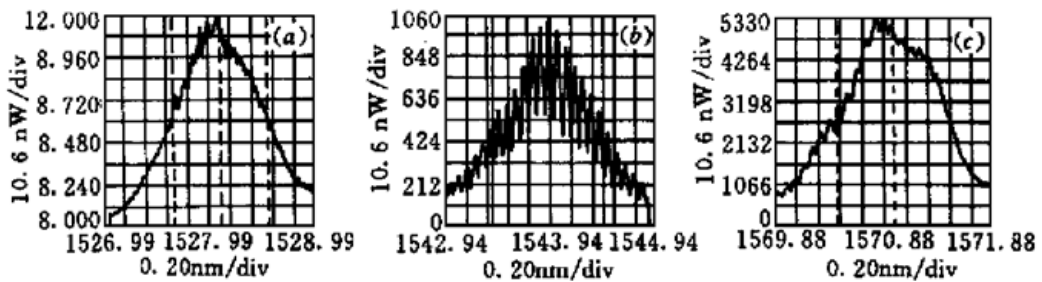


图 5 滤波脉冲光谱

Fig. 5 Spectrum of filtered pulses

(a) $\lambda = 1528 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 1544 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 1571 \text{ nm}$

5 结 论

以稳定的主动锁模光纤激光器作抽运源,利于光纤中 SC 光谱展宽技术,光脉冲的宽度由原始光脉冲的 0.4 nm 展宽至~ 50 nm。研究了抽运光功率、波长与生成的 SC 光谱宽度、形状、光脉冲性质的关系。SC 的平坦度是个重要参数,抽运光波长在光纤零色散点附近时得到的 SC

光谱的平坦度较好。此 SC 光源可以用作 OADM/OTDM 通信系统的发射光源,还可以实现频率转换等多种功能,此外,由于它可以在百 nm 范围内提供超短光脉冲,在光纤的参数测量、光模/数 (A/D) 转换、光学采样及光谱学等领域内将发挥重大作用。

参 考 文 献

- 1 T. Morioka, K. Mori, S. Kawanishi *et al.*. Multi-WDM-channel, Gbit/s pulse generation from a single laser source utilizing LD-pumped supercontinuum in optical fibers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(3): 365~ 368
- 2 S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama *et al.*. 3 Tb/s (200 Gb/s \times 19 channel), 50 km OTDM/WDM transmission experiment, OECC'97, Seoul, Korea, Oct 1997, PDP2-2: 14~ 17
- 3 H. Sotobayashi, K. Kitayama. 325 nm bandwidth supercontinuum generation at 10 Gbit/s using dispersion-flattened and non-decreasing normal dispersion fibre with pulse compression technique. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1336~ 1337
- 4 G. P. Agrawal. Translated by Hu Guojiang, Huang Tao. Nonlinear Fiber Optics. Tianjin: Tianjin University Press, 1992. 58~ 280 (in Chinese)
- 5 Li Yuhua, Lou Caiyun, Wu Jian *et al.*. 10 GHz, 9 ps pulses generation from an actively mode-locked fiber ring laser. *Chinese J. Lasers*, 1998, **B7**(4): 303~ 307 (in English)

Generation of Supercontinuum from Dispersion Shifted Fiber by Using 10 GHz Actively Mode-locked Fiber Laser

Lou Caiyun Li Yuhua Wu Jiang Gao Yizhi Cui Ruizheng
(*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract In this work, 10 GHz bandwidth over 50 nm supercontinuum (SC) spectrum was generated from a dispersion shifted fiber resulted from combined effects of self-phase modulation, cross-phase modulation and four waves mixing. The influences of several parameters, pump source power and wavelength, on bandwidth, flatness of SC and quality of pulses are investigated.

Key words optical communication, optical propagation in DSF, nonlinear optics