

基于 100 m 色散位移光纤的超连续谱实验研究*

李智勇 王肇颖 王永强 贾东方 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要 利用被动锁模掺铒光纤激光器输出的重复频率 13.9 MHz、中心波长 1557.28 nm 的光脉冲作泵浦源, 在 100 m 的色散位移光纤中产生总宽度达 488 nm 的超连续谱, 不平坦度小于 ± 3.0 dB, 利用法布里-珀罗滤波器获得 163 路多波长脉冲, 利用可调谐滤波器得到 C 波段内脉宽为 1.2 ~ 2.0 ps 的近变换限超短光脉冲. 分析了泵浦脉冲的功率、光纤长度等因素对 SC 光谱展宽的作用, 并与色散平坦光纤和较长的色散位移光纤作了比较.

关键词 超连续谱; 色散位移光纤; 被动锁模; 法布里-珀罗滤波器

中图分类号 TN25 **文献标识码** A

0 引言

光纤超连续谱 (supercontinuum, 即 SC) 技术能在广阔的光谱范围内同时产生高重复率的多波长短光脉冲, 和其它短脉冲光源相比具有带宽大、稳定性好等优点; 因此基于 SC 的超短脉冲光源是 WDM 和 OTDM 及其混合系统中极具潜力的光源^[1-3], 这种 SC 光脉冲源已相继应用于光纤群速度测量、超短光脉冲产生和自频率转换、Tbit/s OTDM/WDM 组合复用通信光源等一系列实验, 并取得了出色的成果. 此外, SC 由于具有宽带相干性, 在光学相干时域反射计^[4]、光学相干层析^[5]、光学计量、激光光谱学等方面也有重要应用. 国内在 SC 方面进行了部分理论分析和实验研究^[6-9].

本文采用很稳定的被动锁模光纤激光器 (PMLFL) 输出的脉冲泵浦长度仅 100 m 的 DSF, 得到谱宽为 488 nm 的超连续谱, 利用法布里-珀罗 (F-P) 滤波器产生约 163 路多波长光脉冲, 经可调谐滤波器滤波得到波长在 1530 ~ 1560 nm 范围内连续可调、脉宽小于 2 ps 的近变换限短光脉冲.

1 实验装置

产生 SC 的实验装置如图 1 所示. 泵浦光源为自研制的非线性偏振旋转被动锁模光纤激光器, 中心波长为 1557.28 nm, 重复频率为 13.9 MHz, 出射光脉冲的平均功率约为 0.313 mW. 脉冲宽度约 1.5 ps, 谱宽为 3.1 nm, 时间带宽积 (TBP) 为 0.575, 说明输出脉冲带有啁啾. 输出脉冲经过 EDFA 放大、提高峰值功率后注入作为 SC 产生介质的一段长为 100 m 的 DSF,

此光纤的零色散波长为 1543.0 nm, 色散斜率为 $0.0651 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 在 1550 nm 处的损耗为 0.2 dB/km . 实验中用 Ando AQ-6315A 光谱分析仪 (分辨率为 0.05 nm) 对产生的 SC 进行观测. 同时, SC 经过光学带通滤波器 (OBF) 得到梳状光谱或窄脉冲. 在本实验中, 首先采用 F-P 干涉滤波片对 SC 进行滤波以获得波长等间隔的多波长短光脉冲, 其自由光谱范围 (FSR) 为 2.52 nm , 透射峰的半极大全宽度 (FWHM) 为 0.186 nm ; 再采用 Santec 的可调谐滤波器 (TOF) 取代 F-P 滤波器, 提取出不同波长处的光脉冲谱切片, 使用 FR-103MN 自相关仪和 HP 54615B 示波器 (500 MHz) 测量出切片脉冲的宽度, TOF 的中心波长调谐范围为 $1530 \sim 1560 \text{ nm}$, 3 dB 带宽为 $1.95 \pm 1 \text{ nm}$.

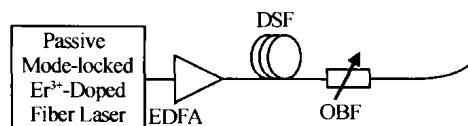


图 1 基于被动锁模掺铒光纤激光器的超连续谱实验装置图
Fig. 1 Experimental setup of supercontinuum based on PML EDFL

2 实验结果

当 EDFA 的泵浦功率逐渐增大到 50 mW 时, 在频谱分析仪上可以观察到最大宽度的超连续谱, 如图 2 所示, 反常色散区的 SC 宽度 (20 dB) 为 237 nm, 不平坦度为 $\pm 3 \text{ dB}$, 正常色散区的 SC 宽度 (10dB) 为 241 nm, 不平坦度为 $\pm 3.0 \text{ dB}$, 对应的 20 dB 宽度总和达到 488 nm, 且零色散点两侧的 SC 在 20 dB 范围内连续. 由于该光谱仪的测量范围到 1780 nm 处截止, 实验中获得的 SC 已经显著地超出了本光谱仪的响应极限, 因此 SC 的真实宽度实际上显著大于 488 nm. 图中 1557.28 nm 波长处存在有一个频谱尖峰, 这是由于光纤长度较短、泵浦脉冲的能量未被耗尽, 同时这一因素还使得脉冲频谱的不平坦

*国家自然科学基金 (69877012) 和天津市科委资助项目 (003101511)

Tel: 022-27402420

收稿日期: 2003-09-01

性增大. 在较高的峰值功率条件下, 伴随的 FWM 和 SRS 效应也随之增强, 新的频率分量不断产生并引起能量的转移, 使得泵浦残余逐渐减弱, SC 的平坦性增强.

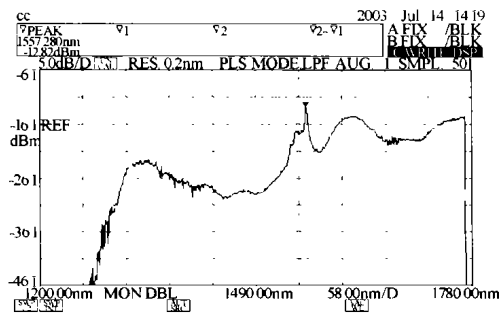


图 2 在 100 m DSF 中产生的超连续谱
Fig. 2 Supercontinuum in a 100 m DSF

采用的 F-P 滤波片对 SC 谱进行滤波得到等间隔的多波长梳状光谱, 如图 3 所示. 梳状光谱的波长间隔为 2.52 nm (约 315 GHz), 消光比最大为 18 dB, 最小为 8 dB, 消光比较小是由于所用的 F-P 滤波器的镀膜反射率和透射功率都较低造成的. 在反常色散区, 如图 3(b) 所示, 得到 97 个波长透射输出, 梳状光谱继承了 SC 的不平坦性, 各透射峰对应波长处的峰值存在相应的起伏, 其包络曲线与 SC 完全一致, 透射峰的起伏小于 ± 2.5 dB. 在正常色散区, 如图 3(a) 所示, 得到 66 个波长透射输出, 梳状光谱的平坦性较好, 不平坦度小于 ± 1 dB, 但是由于 F-P 的镀膜带宽的限制, F-P 的透射特性在 1300 nm 附近发生变化, 靠近 1300 nm 一侧的 SC 滤波后频谱消光比不足 10 dB.

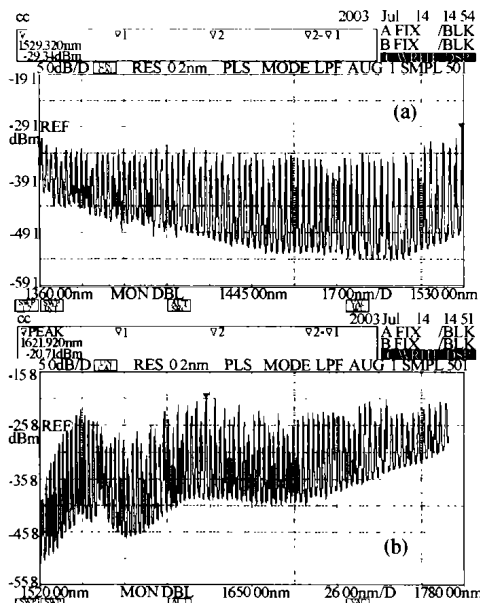


图 3 SC 经 FP 滤波得到的多波长脉冲频谱
Fig. 3 Spectra of multiwavelength pulses by a FP filter from SC
实验中使用 TOF 提取出不同波长处的光脉冲谱切片, 中心波长 1550.56 nm 处的脉宽最小, 其光谱如图 4(a) 所示, 各波长处的脉宽和 TBP 如图

4(b) 所示. 在测量脉宽的过程中, 由于光纤和滤波器的损耗等原因, 出射光的功率较小, 需经过 EDFA 放大后再接入自相关仪. 由于 TOF 自身透射特性的缘故, 靠近 1530 nm 和 1560 nm 的谱切片对称较差且输出谱宽较大, 而自相关仪测得脉宽和相应的 TBP 呈现中间小两边大的变化趋势, 这说明透射脉冲接近变换极限, 但仍包含有少量啁啾, 而且中心波长 1550 nm 附近的啁啾最小.

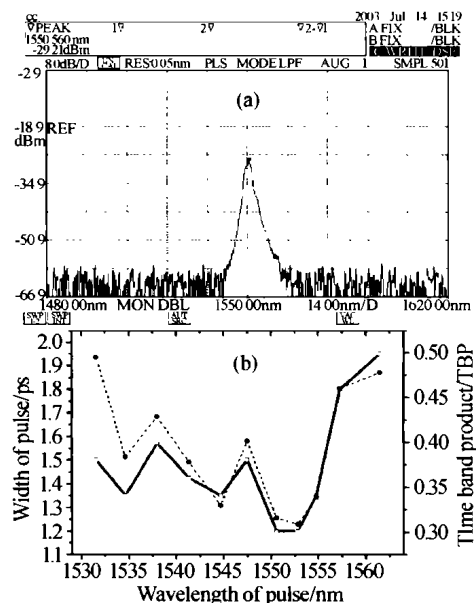


图 4 利用可调谐滤波器得到的 SC 切片
Fig. 4 Slices of supercontinuum by Tunable optical filter (TOF)

由本实验中 100 m DSF 产生的 SC 与较长 DSF 和 DFF 产生 SC 的比较如图 5 所示. 当 DSF 的长度较大 (4.57 km) 时, 如图 5(a) 所示, 反常色散区中 SC 的平坦性更好, 但泵浦脉冲波长处则存在多个不同波长的振荡, 正常色散区中 SC 的起伏比 100 m DSF 更大, 且在零色散波长左侧的正常色散区内的凹陷^[10] 深度更大, 使得零色散波长两侧的 SC 在 20 dB 范围内不连续. 而采用 4.28 km 色散平坦光纤 (DFF) 时, 如图 5(b) 所示, 反常色散区中 SC 的平坦性最好, 但凹陷部分也更宽更深, 正常色散区的 SC 平坦性最差. 上述两种情况下, 凹陷的深度和宽度都较 100 m DSF 时大, 分析认为这是由于 SRS 和 FWM 的共同作用使脉冲能量向长波长方向转移, 对此将另文详述. 以上比较分析说明光纤过长不利于提高 SC 的总宽度和平坦性, 当通过提高泵浦功率以增大频谱展宽效果时, 较短的光纤就足以获得宽阔的 SC, 其平坦性比长光纤时略差, 为了获得更佳的 SC 必须利用数值分析的方法对不同条件下的光纤长度进行优化. 而光纤类型的选择已经由 Toshiaki Okuno 证明, 色散平坦且渐减光纤 (DFDF) 的谱展宽效果最佳^[11], DFDF 在宽阔的范围内具有微小的色散, 有利于 SPM 的谱展宽效应发挥作用,

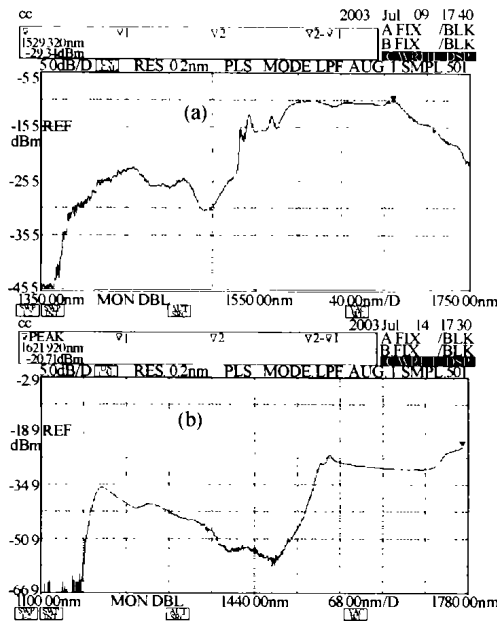


图5 100 m DSF 超连续谱与其它光纤的比较

Fig. 5 Comparison of supercontinuum from 100 m DSF with 4.57 km DSF (a) and 4.28 km DFF (b)

而且负三阶色散(TOD)比正TOD有利于SC的产生.

3 结论

实验结果表明,由于泵浦光源的中心波长 1557.28 nm 位于光纤的反常色散区内,SC 的宽度较大,但平坦性略差.采用被动锁模光纤激光器作泵浦源,经过 EDFA 放大后其峰值功率可达数百瓦以上,有利于 SC 的产生和获得更大的 SC 宽度.尽管本实验中使用的 DSF 仅有 100 m,但展宽效果显著,获得了 488 nm 宽的 SC,不平坦性小于 ± 3 dB;相对于 4.57 km DSF 而言,本实验获得的 SC 宽度更大,连续性更好.因此,采用提高脉冲功率、缩短光纤长度的设计方案是适用且可行的,对于缩小 SC 光源系统的体积、节约资源和成本而言,本实验简单有效.为了获得更好的 SC,即更大的 SC 宽度和更佳的平坦性,应根据实验方案选择优化的 DSF 光纤长度.

实验数据表明在获得 WDM 多波长光脉冲或 OTDM 短脉冲时,F-P 滤波器和 TOF 的透射特性对输出脉冲的影响极大,为了获得质量更好的脉冲,必须使用性能优良的滤波器.

参考文献

- 1 Agrawal G P 著,贾东方,余震虹,谈斌,等译.非线性光纤光学原理及应用.北京:电子工业出版社,2002.266~267
Agrawal G P, translated by Jia D F, Yu Z H, Tan B, et al. Principle and Application of Nonlinear Fiber Optics. Beijing: Electronics Industry Press, 2002. 266 ~ 267
- 2 陈国夫,王贤华,刘东峰.稳定的全光纤飞秒激光光源.光子学报,2001,30(2):148~151
Chen G F, Wang X H, Liu D F. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(2):148~151
- 3 樊亚仙,吕福云,谢春霞.窄线宽线形腔调Q双包层掺铒光纤激光器.光子学报,2003,32(3):280~282
Fan Y X, Lü F Y, Xie C X. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(3):280~282
- 4 Smith E D J, Wada N, Chujo W, et al. High resolution OADR using 1.55 μm supercontinuum source and quadrature spectral detection. *Electronics Letters*, 2001, 37(21):1305~1307
- 5 Hartl I, Li X D, Chudoba C, et al. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber. *Optics Letters*, 2001, 26(9):608~610
- 6 陈泳竹,徐文成,崔虎.光纤中超连续谱产生的频域分析.光子学报,2003,32(2):148~151
Chen Y Z, Xu W C, Cui H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(2):148~151
- 7 娄采云,李玉华,伍剑,等.利用 10 GHz 主动锁模光纤激光器在 DSF 中产生超连续谱.中国激光(A),2000,27(9):814~818
Lou C Y, Li Y H, Wu J, et al. *Chinese Journal of Lasers(A)*, 2000, 27(9):814~818
- 8 伍剑,李玉华,娄采云,等.利用超连续谱光源产生超短光脉冲.光学学报,2000,20(3):325~329
Wu J, Li Y H, Lou C Y, et al. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(3):325~329
- 9 余建军,管克俭,杨伯君,等.利用光纤的非线性效应产生多波长超短光脉冲.中国激光(A),1999,26(7):594~598
Yu J J, Guan K J, Yang B J, et al. *Chinese Journal of Lasers(A)*, 1999, 26(7):594~598
- 10 Nishizawa N, Goto T. *IEEE J Select Top Quant Electron*, 2001, 7(4):518~524
- 11 Oshiaki O, Masashi O. Generation of ultra-broad-band supercontinuum by dispersion-flattened and decreasing fiber. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, 10(1):72~73

Experiment Study on Supercontinuum in a 100 m Dispersion-shift Fiber

Li Zhiyong, Wang Zhaoying, Wang Yongqiang, Jia Dongfang, Li Shichen

*College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Laboratory of Opto-electronics
Information Science and Technology, EMC, Tianjin 300072*

Received date: 2003-09-01

Abstract The total 20 dB bandwidth of 488 nm of supercontinuum (SC) with unevenness less than ± 3.0 dB in a 100 m Dispersion-Shifted Fiber (DSF) with zero dispersion wavelength of 1543.0 nm was obtained in the experiment, which was based on the passive modelocked Erbium-doped fiber laser with the repetition rate of 13.9 MHz and the center wavelength of 1557.28 nm. Thus multi-wavelength pulses of 163 channels were picked up by a Fabry-Perot filter and short pulses with duration of 1.2 ~ 2.0 ps and a little frequency chirp by a tunable optical filter. The results of the experiment were compared with that of 4.57 km DSF and 4.28 km DFF and the data shows that the setup of 100 m DSF was a good idea.

Keywords Supercontinuum (SC); Dispersion-shifted fiber (DSF); Passive mode-locking; Fabry-Perot filter



Li Zhiyong was born in 1978 in Sichuan Province. He received his Bachelor's degree in 2001 from Tianjin University. Now he is a master graduate of College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin. His major research focuses on modelocked fiber lasers, compression of short pulses, SC pulse sources and OTDM.