

纳秒脉冲在普通单模光纤中产生超连续谱的实验研究

刘 楚^{1,2} Eric Rees³ Toni Laurila³ 简水生^{1,2} Clemens Kaminski^{3,4}

¹北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

²北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044

³Department of Chemical Engineering and Biotechnology, University of Cambridge, Pembroke Street, CB2 3RA, UK

⁴SAOT School of Advanced Optical Technologies, Friedrich Alexander University, D-91054 Erlangen, Germany

摘要 利用中心波长 1064 nm 的纳秒激光脉冲入射到普通单模光纤中, 获得了从 700 nm 到超过 1750 nm 的超连续谱输出。在正常色散区抽运下, 光谱首先出现多级拉曼斯托克斯线, 随着抽运功率或光纤长度的增加, 斯托克斯能量将进入光纤反常色散区, 形成光孤子, 随后与孤子相关的非线性效应将使光谱进一步展宽。实验结果表明, 当单模光纤长度为 28 m 时, 产生的光谱在 1260~1750 nm 范围内, 有较好的光谱平坦度(小于 3.8 dB)、较强的光谱光功率密度(平均约为 0.4 mW/nm)并且单模输出。

关键词 非线性光学; 纳秒脉冲; 普通单模光纤; 超连续谱

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0705003

Experimental Research on Supercontinuum Generation from Nanosecond Pulse and Conventional Single Mode Fiber

Liu Chu^{1,2} Eric Rees³ Toni Laurila³ Jian Shuisheng^{1,2} Clemens Kaminski^{3,4}

¹Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

²Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

³Department of Chemical Engineering and Biotechnology, University of Cambridge, Pembroke Street, CB2 3RA, UK

⁴SAOT School of Advanced Optical Technologies, Friedrich Alexander University, D-91054 Erlangen, Germany

Abstract 1064 nm nanosecond pump pulses and conventional single mode fibers are adopted to generate supercontinuum whose spectrum covers from 700 nm to above 1750 nm. In the fiber's normal dispersion regime, the spectrum initially shows multi Raman Stokes lines. As pump power or fiber length increases, Stokes energies enter into anomalous dispersion regime and form optical solitons, which make the following spectral broadening to be dominated by soliton-related nonlinear effects. We show experimentally that the supercontinuum generates with 28 m fiber length has flat spectral structure (in less than 3 dB flatness), high spectral density (0.4 mW/nm in average) and single mode output in 1260 nm to 1750 nm regime.

Key words nonlinear optics; nanosecond pulse; conventional single mode fiber; supercontinuum

OCIS codes 190.0190; 060.2430; 190.5650

1 引 言

光谱展宽和新频率的产生是非线性光学的本质

特征, 自从 1960 年第一台激光器发明以来已经受到了广泛的研究^[1]。1970 年, Alfano 等^[2]利用倍频钕

收稿日期: 2011-01-30; 收到修改稿日期: 2011-03-11

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2011YJS001)资助课题。

作者简介: 刘 楚(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事超连续谱与光纤激光器等方面的研究。

E-mail: 07111018@bjtu.edu.cn

导师简介: 简水生(1929—), 男, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信与光器件等方面的研究。

E-mail: ssjian@bjtu.edu.cn

玻璃激光和硼硅酸盐玻璃首次实现了从 400 ~ 700 nm 超连续谱(SC)的产生。SC 是指当一束强度极大的超短脉冲通过非线性材料后,出射光谱中产生许多新的频率成分,光谱宽度远远大于入射光频率的宽度,一般可以达到几百纳米甚至上千纳米。SC 作为光源,具有高的输出功率、平坦的宽带光谱、高度的空间相干(聚焦)等特性,能极大地提高信噪比、减小测量时间以及加宽光谱测量范围。SC 光源在许多领域有着重要的应用,如光谱学分析^[3]、显微镜成像^[4]、光通信^[5]和光相干摄影技术^[6]等。因此从 1970 年到 1990 年,人们对 SC 进行了广泛的研究,采用了不同的非线性材料,如固体、有机或无机液体、气体、各种波导结构来产生 SC^[7]。2000 年,贝尔实验室的 Ranka 等^[8]利用锁模钛宝石飞秒激光器和光子晶体光纤(PCF)实现了 SC 的产生,再次引起了人们极大的关注^[9~13]。

PCF 是由 Russell 等在 1996 年研制成功的,它在结构上与传统的光纤有着本质的不同,是由沿光纤轴向周期性排列的空气孔和单一石英材料组成的,而空气孔的排列、大小和形状有着很大的控制余地。PCF 中这些微结构的变化从根本上改变了传统光纤的许多传输特性,使它具有高非线性和特殊的色散特性^[14,15]。通过理论和实验研究,人们发现 PCF 中光场能被高度局域集中,从而可以极大地提高非线性光学相互作用的效率。另外,PCF 能够在很宽的频带范围内支持单模传输(甚至无截止单模传输),并且可以将光纤零色散波长点移至可见光波段。这些特性都决定了 PCF 是产生 SC 的理想非线性波导结构。但是 PCF 也有其局限性:首先,由于 PCF 较小的纤芯尺寸(通常直径为 2~4 μm),在石英材料的损伤阈值下,限制了纳秒(或皮秒)输入脉冲的脉冲能量需要小于数十微焦(或纳焦),从而限制了输出 SC 的光谱光功率密度。其次,PCF 难于维护。比如,未封装的 PCF 尾端将由于细小空气孔的毛细管效应吸取空气中的水蒸气,增大光纤损耗;PCF 的熔接仍是一项具有挑战性的难题^[16]。另外,相比普通光纤,PCF 高昂的价格也限制了它进一步的实用化。

因此,色散位移光纤^[17~21]或普通单模光纤(SMF)^[22~24]也被用来作为产生 SC 的波导介质。同时,相比之前被广泛用作 SC 抽运源的锁模钛宝石飞秒激光器,Nd:YAG 微晶片激光器(纳秒光源)由于其可靠的稳定性、低廉的价格和小巧的体积将更有可能成为商用化 SC 的抽运光源^[25]。本文利用

SMF(Corning SMF-28)和 Nd:YAG 微晶片激光器的纳秒激光脉冲来产生 SC,其光谱可以覆盖从 700 nm 到超过 1750 nm(长波长端受到光谱仪探测范围的限制)。同时,在超过 SMF 1260 nm 截止波长的光谱部分,将以单模形式输出。与文献^[18]中使用 532 nm 纳秒抽运源不同,本文采用 1064 nm Nd:YAG 微晶片激光器作为抽运源,大大减小了抽运波长与光纤零色散波长(1310 nm)的波长差,增强了从抽运源到光纤反常色散区的能量转换效率,使得输出 SC 的近红外光谱更加平坦。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运光源为 Innolight 公司的被动调 Q Nd:YAG 微晶片激光器($\mu\text{FLARE PQ IR 50K-10}$),脉宽 1 ns,中心波长 1064 nm,重复频率 50 kHz,输出激光平均功率为 630 mW,输出光束发散角为 5 mrad。为了提高光纤的耦合效率,先使用焦距为 175 mm 的准直透镜对激光束进行准直,再利用 11 mm 焦距的聚焦透镜将准直后的激光束耦合到 SMF 中。两个反射镜用来调整激光束使之完全垂直于聚焦透镜输入。抽运光源的光功率大小可以用衰减器进行调节。抽运激光脉冲经过 SMF 后产生的 SC 用光谱仪(Tektronix TDS6804B)进行探测。实验装置中,所有透镜或反射镜均已镀上对抽运激光中心波长高透或者高反的介质膜。抽运激光束在自由光学空间中的损耗约为 30 mW。

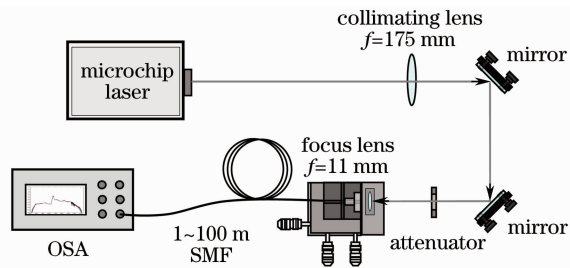


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup

3 实验结果与分析

图 2 为纳秒激光脉冲在 SMF 中产生 SC 的实验结果。图 2(a)为 100 m SMF 输出的 SC 光谱随抽运功率增加的变化情况。从图中可以观察到在 SMF 正常色散区的拉曼级联效应。当抽运功率增加到 20 mW 时,输出光谱在 1114 nm 处出现一阶斯托克斯线。随着抽运功率的增加,将出现二阶、三

阶斯托克斯线,因为这时的斯托克斯功率大到足以抽运下一级斯托克斯线^[26]。进一步增加抽运功率,当斯托克斯频谱功率越过 SMF 在 1310 nm 附近的零色散波长点时,抽运能量将进入 SMF 的反常色散区,形成光孤子,随后与光孤子相关的非线性效应将是 SC 光谱进一步扩展的主要原因。图 2(b)为抽运功率在 600 mW(考虑到抽运激光在自由空间中

的 30 mW 损耗)时,输出的 SC 光谱随 SMF 光纤长度增加的变化。可以看到,当光纤长度为 28 m 时,SC 光谱可以从 700 nm 扩展到 1750 nm。但随着光纤长度的进一步增加,在光谱仪可观察到的范围内(光谱仪长波长端上限为 1750 nm),SC 光谱不再有太大的变化。

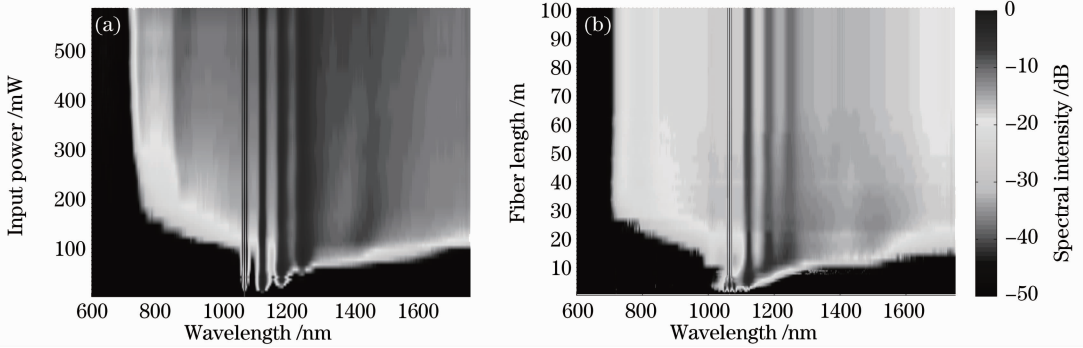


图 2 (a)在 100 m SMF 长度下,SC 光谱随抽运功率增加的变化情况;(b)在 600 mW 抽运功率下,SC 光谱在 1~100 m SMF 长度下的变化情况。光谱的长波长端受到光谱仪 1750 nm 探测范围的限制。图中所示为归一化光谱强度

Fig.2 (a) SC spectra generated in 100 m SMF with different average input powers; (b) SC spectra evolve from 1 to 100 m SMF under 600 mW average input power. The long wavelength edge is limited by the spectral range of optical spectral analyzer at 1750 nm. The spectral intensity has been normalized in the figures

图 3(a)为 600 mW 抽运功率下 100 m SMF 所产生的 SC 光谱。位于 1064 nm 抽运波长(图中所示 P)两边的精细旁瓣结构是由于光纤正常色散区的偏振调制非稳定性所致,在改变抽运源的偏振态后可以将其完全消除^[27]。从图中可以看到三个级联拉曼斯托克斯线(S_1, S_2 和 S_3),并且后一级的斯托克斯线都比前一级斯托克斯线要宽。当抽运能量进入光纤反常色散区后(图中点虚线所示为 SMF 1310 nm 零色散波长),脉冲由于调制非稳定性效应

将被分裂为多个基态光孤子^[17]。随后的孤子碰撞和拉曼孤子自频移等非线性过程将进一步扩展 SC 的长波长端光谱。在 SC 光谱的短波长端,处于正常色散区的色散波由于四波混频效应被反常色散区的孤子势阱所束缚,随着减速的孤子一起运动,并不断发生蓝移^[28]。图 3(a)中右边的点划线为 SMF 在 1260 nm 附近的截止波长($\lambda_{c_LP_{11}}$),SC 在此截止波长以上的光谱部分将以单模形式 LP_{01} 模输出。

值得注意的是,本文所使用的是纳秒脉冲抽运

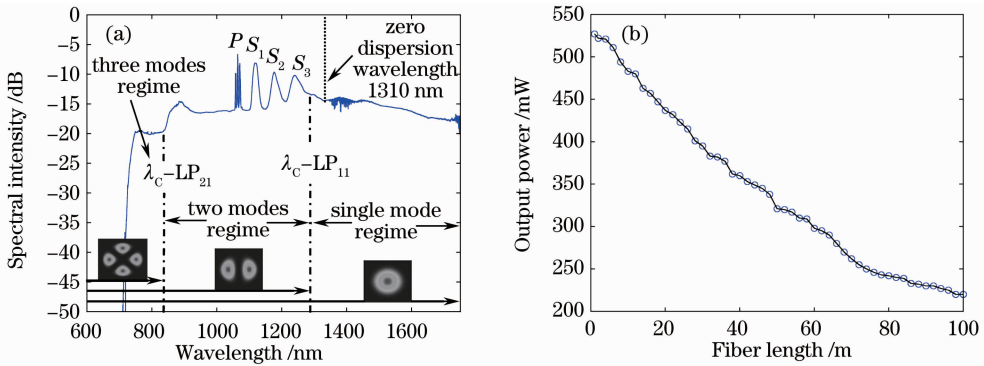


图 3 (a) 100 m SMF 在 600 mW 抽运功率下产生的 SC 光谱,图中点虚线为 SMF 的零色散波长,点划线 $\lambda_{c_LP_{11}}$ 和 $\lambda_{c_LP_{21}}$ 分别为 LP_{11} 模和 LP_{21} 模的截止波长;(b)600 mW 抽运功率下,输出 SC 光功率随 SMF 长度的变化情况

Fig.3 (a) SC spectrum generated from 100 m SMF and 600 mW average input power, the dot line shows the zero dispersion wavelength of SMF around 1310 nm, the two dot-dash lines indicate the cut-off wavelength of modes LP_{11} and LP_{21} , respectively; (b) SC output power varies from 1 to 100 m SMF under 600 mW average input power

(长脉冲抽运或者准连续抽运),与飞秒脉冲抽运(超短脉冲抽运)有所不同,当抽运能量进入反常色散区后,前者首先受到的是以调制非稳定性等参量过程为主导的非线性效应。它将脉冲分裂成大量基态孤子,而每个孤子都有随机的脉宽、波长和能量,并且产生随机的碰撞和相互作用。此外,它们最初由噪声所产生,所以它们之间互不相干。因此在反常色散区的 SC 光谱,可以近似看作是各个不同孤子频率成分的简单叠加平均后的结果。从而使得在此区域内的光谱没有单个孤子的相关信息,而呈现出平滑的光谱结构。正是因此,从图 3(a)中可以看出,SC 在光纤反常色散区有着较为平坦的光谱结构(平坦度小于 3.8 dB)。

图 3(b)为在 600 mW 的抽运功率下,SMF 输出的 SC 光功率随光纤长度增加的变化情况。由于 SMF 在可见光部分有较强的瑞利散射损耗和大于 $1.8 \mu\text{m}$ 近红外光谱的 SiO_2 红外吸收损耗,使得输出的 SC 光功率由 527 mW(1 m 光纤长度,输出效率为 87.8%)急剧下降到 220 mW(100 m 光纤长度,输出效率为 36.7%)。当 SMF 的长度为 28 m 时,输出的 SC 光功率为 402 mW(输出效率为 67%)。结合图 2(b)可以得出,在 28 m 光纤长度下所输出的 SC 光谱,在 1260~1750 nm 的近红外光谱拥有较好的光谱平坦度(小于 3.8 dB)、较高的光谱光功率密度(平均约为 0.4 mW/nm)并且单模输出。

4 结 论

利用 Nd:YAG 微晶片激光器 1064 nm 纳秒脉冲和普通单模光纤产生激光超连续谱,其光谱范围可覆盖从 700 nm 到超过 1750 nm(长波长端受到光谱仪观测范围的限制)。实验观测到,纳秒脉冲在正常色散区抽运情况下,由于受激拉曼散射光谱将出现多级级联拉曼斯托克斯线。随着抽运功率或光纤长度的增加,斯托克斯功率将进入光纤反常色散区,形成光孤子。随后的孤子碰撞、拉曼孤子红移及孤子与色散波相互作用等非线性效应将使光谱进一步展宽。当光纤长度为 28 m 时,产生的 SC 光谱在 1260~1750 nm 近红外光谱范围内有较好的光谱平坦度(小于 3.8 dB)和较强的光谱光功率密度(平均约为 0.4 mW/nm)且单模输出。相信这个廉价、高可靠性、结构紧凑的超连续谱光源将在近红外光谱领域有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 R. W. Boyd. *Nonlinear Optics* (3rd ed.) [M]. San Diego: Academic, 2008
- 2 R. R. Alfano, S. L. Shapiro. Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **24**(11): 584~587
- 3 J. Hult, R. S. Watt, C. F. Kaminski. High bandwidth absorption spectroscopy with a dispersed supercontinuum source [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(18): 11385~11395
- 4 J. H. Frank, A. D. Elder, J. Swartling *et al.*. A white light confocal microscope for spectrally resolved multidimensional imaging[J]. *Journal of Microscopy*, 2007, **227**(3): 203~215
- 5 S. Smirnov, J. D. Castanon, T. J. Ellingham *et al.*. Optical spectral broadening and supercontinuum generation in telecom applications[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, **12**: 122~147
- 6 D. L. Marks, A. L. Oldenburg, J. J. Reynolds *et al.*. Study of an ultrahigh-numerical-aperture fiber continuum generation source for optical coherence tomography [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 2010~2012
- 7 R. R. Alfano. *The Supercontinuum Laser Source; Fundamentals with Updated References* (2nd ed.) [M]. New York: Springer-Verlag, 2006
- 8 J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 25~27
- 9 J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, **78**(4): 1135~1184
- 10 C. Liu, E. J. Rees, T. Laurila *et al.*. Predicting supercontinuum pulse collisions with simulations exhibiting temporal aliasing[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(24): 4145~4147
- 11 C. Liu, E. J. Rees, T. Laurila *et al.*. An adaptive filter for studying the life cycle of optical rogue waves[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26113~26122
- 12 Chen Shengping, Chen Hongwei, Hou Jing *et al.*. 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1943~1949
陈胜平, 谌鸿伟, 侯静等. 30 W 皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1943~1949
- 13 Zhang Shiqiang, Li Xiao, Xu Xiaojun *et al.*. Experimental study of supercontinuum generation by hundred nanosecond pulse in highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 75~78
张世强, 李霄, 许晓军等. 百纳秒激光脉冲在高非线性光子晶体光纤中产生超连续谱的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 75~78
- 14 P. Russell. Photonics crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 15 J. C. Knight. Photonic crystal fibres [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 847~851
- 16 J. H. Chong, M. Rao. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(12): 1365~1370
- 17 A. K. Abeeluck, C. Headley. Continuous-wave pumping in the anomalous- and-normal-dispersion regimes of nonlinear fibers for supercontinuum generation[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(1): 61~63
- 18 A. Mussot, T. Sylvestre, L. Provino *et al.*. Generation of a broadband single-mode supercontinuum in a conventional dispersion-shifted fiber by use of a subnanosecond microchip laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1820~1822
- 19 A. K. Abeeluck, C. Headley, C. G. Jorgensen. High-power supercontinuum generation in highly nonlinear, dispersion-shifted fibers by use of a continuous-wave Raman fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(18): 2163~2165

- 20 S. Moon, D. Y. Kim. Generation of octave-spanning supercontinuum with 1550-nm amplified diode-laser pulses and a dispersion-shifted fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(1): 270~278
- 21 Li Zhiyong, Wang Zhaoying, Wang Yongqiang *et al.*. Experiment study on supercontinuum in a 100 m dispersion-shift fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1064~1067
李智勇, 王肇颖, 王永强 等. 基于 100 m 色散位移光纤的超连续谱实验研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(9): 1064~1067
- 22 S. V. Chernikov, Y. Zhu, J. R. Taylor *et al.*. Supercontinuum self-Q-switched ytterbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(5): 298~300
- 23 J. W. Walewski, J. A. Filipa, C. L. Hagen *et al.*. Standard single-mode fibers as convenient means for the generation of ultrafast high-pulse-energy super-continua[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**(1): 75~79
- 24 R. S. Watt, C. F. Kaminski, J. Hult. Generation of supercontinuum radiation in conventional single-mode fibre and its application to broadband absorption spectroscopy [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **90**(1): 47~53
- 25 W. J. Wadsworth, N. Joly, J. C. Knight *et al.*. Supercontinuum and four-wave mixing with Q-switched pulses in endlessly single-mode photonic crystal fibres[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(2): 299~309
- 26 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* (4th ed.) [M]. San Diego: Academic, 2007
- 27 S. G. Murdoch, R. Leonhardt, J. D. Harvey. Polarization modulation instability in weakly birefringent fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 866~868
- 28 A. V. Gorbach, D. V. Skryabin. Light trapping in gravity-like potentials and expansion of supercontinuum spectra in photonic-crystal fibres[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(11): 653~657