

文章编号: 0258-7025(2004)12-1429-04

飞秒激光在大空气比微结构光纤中 增强的非线性光谱展宽

胡明列, 王清月, 栗岩峰, 王 专, 柴 路, 邢歧荣

(天津大学精仪学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 报道了微结构光纤(MF)包层结构对超连续光谱产生影响的实验研究。在中心波长为 820 nm, 脉冲宽度为 35 fs 的激光脉冲作用下, 在纤芯都为 2 μm , 空气比分别为 60% 和 80% 的微结构光纤中获得不同的光谱展宽。由于空气比的增大, 使得微结构光纤的有效模面积变得更小, 其中传播的光场更可能被局域在光纤纤芯中, 非线性效应更加强烈, 因此在空气比更大的微结构光纤中获得了更宽的超连续光谱。实验中分别在两种光纤中获得了近 700 nm(520~1200 nm)和近 1000 nm(从 350~1320 nm)的超连续光谱, 大空气比的微结构光纤中获得的非线性光谱展宽增强了 1.25 倍。对实验结果作了对比分析, 并给出了相应的物理解释。

关键词 激光技术; 微结构光纤; 飞秒脉冲激光; 超连续光谱

中图分类号 TN 242 **文献标识码** A

Enhanced Spectral Broadening by Femtosecond Pulses in Large-Air-Filling Fraction Microstructure Fiber

HU Ming-lie, WANG Qing-yue, LI Yan-feng, WANG Zhuan, CHAI Lu, XING Qi-rong

(College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University,

Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract The influence of the structure of microstructure fiber on the spectral broadening of femtosecond laser pulses is experimentally studied. These experiments demonstrate that the spectral broadening of 35-fs pulses of 820-nm Ti:sapphire laser radiation transmitted through 2- μm core diameter microstructure fibers can be enhanced by a factor of about 1.25 by increasing the air-filling fraction of the fiber cladding from 60% up to 80%, and ultrabroad band continua which are almost 700 nm extending from 520 to 1200 nm and 1000 nm extending from 350 to 1320 nm are respectively generated from these two kinds of fibers. The comparison shows that the efficiency of the nonlinear spectral broadening process can be noticeably improved by increasing the air-filling fraction of the microstructure fiber cladding, due to a higher degree of light localization in the core of such a microstructure fiber.

Key words laser technique; microstructure fiber; femtosecond pulse laser; supercontinuum

1 引 言

一种由单一物质构成的在包层具有二维空气孔结构的特殊光纤, 正在吸引越来越多研究人员的注意。由于其结构特点, 这种光纤称为微结构光纤

(Microstructure fiber, MF), 又叫作光子晶体光纤(Photonic Crystal fiber, PCF), 多孔光纤(Holey fiber, HF)^[1~3]。由于包层中空气孔的引入, 所形成的很大的折射率梯度变化使其能够将光场强烈地局域在纤芯中, 使其具有增强的非线性效应和可控色

收稿日期: 2004-01-16; **收到修改稿日期**: 2004-04-01

基金项目: 国家 973 计划(编号: G1999075201 和 2003CB314904), 国家自然科学基金(编号: 60278003) 和国家 863 计划(编号: 2003AA311010) 资助项目。

作者简介: 胡明列(1978—), 男, 四川广汉人, 天津大学精仪学院超快激光研究室博士研究生, 主要从事超快激光技术及其应用研究。E-mail: huminglie@yahoo.com

散特性。这样微结构光纤正在成为产生超连续光谱的有效手段——未经过放大的纳焦量级的飞秒激光脉冲就可以在光纤中产生一个倍频程(octave)甚至两个倍频程的超连续光谱。自从 Ranka 等报道在微结构光纤中产生两个倍频程(390~1600 nm)的超连续光谱^[4,5]以来,在微结构光纤中产生超连续光谱便成为一个新的研究热点^[6~9],而且超连续光谱在控制飞秒激光脉冲的相位稳定^[10]、光学频率测量^[11~13]、光学相干层析(OCT)^[14]等方面已经带来重要突破。理论和实验^[15,16]表明,当入射的低平均功率飞秒脉冲位于反常色散区时,在同样强度下,宽脉冲产生的超连续光谱可以比窄脉冲时更宽。这时的超连续光谱的产生机理被解释为高阶孤子裂变和四波混频。在脉宽较宽时,孤子的阶数更大, N 阶孤子裂变为 N 个基孤子脉冲,每个孤子脉冲会发出对应的蓝移而且相位匹配的非孤子波,最终脉冲稳定形成红移的 N 个基孤子,同时发生的四波混频效应使得光谱加宽并更加平滑。而对于超连续光谱的应用,研究各种效应在超连续光谱产生中的作用对产生平坦、稳定的超连续光谱而言是非常必要的,因此越来越多的注意力被吸引到微结构光纤中利用飞秒激光脉冲的频谱展宽上来。本文报道了微结构光纤包层结构对超连续光谱产生的影响,在35 fs激光脉冲的作用下,由于大空气比对传输的光场具有更强烈的局域作用,使得脉冲的光谱展宽有了十分明显的增加。

2 实验结果及分析

实验中使用的光源是自行研制的飞秒激光振荡级系统,这台激光器由于使用了自行设计的半导体可饱和吸收镜,可以实现自启动锁模,具有很高的稳定性,输出的最高平均功率可达到1.7 W^[17]。实验中使用的飞秒激光脉冲宽度为35 fs,中心波长820 nm。使用40×耦合透镜输入输出,并采用CCD监视仪和功率计监控耦合输入和输出的情况。实验中所使用的光纤端面结构的电子扫描显微图如图1,都由单纯的硅构成,外径 $150 \pm 3 \mu\text{m}$,芯径 $2 \pm 0.2 \mu\text{m}$,空气比分别为60%(光纤A)和80%(光纤B),光纤长度为60 cm。输入输出光谱分别由两个光谱仪接收,输出光谱由0.5%的分束镜分束后由Ocean Optics, Inc.的S2000光谱仪接收用以实时观测,测量精度设定为5~10 nm,测量范围200~1200 nm。

在不同功率输入时,光谱随功率的增加而展宽,

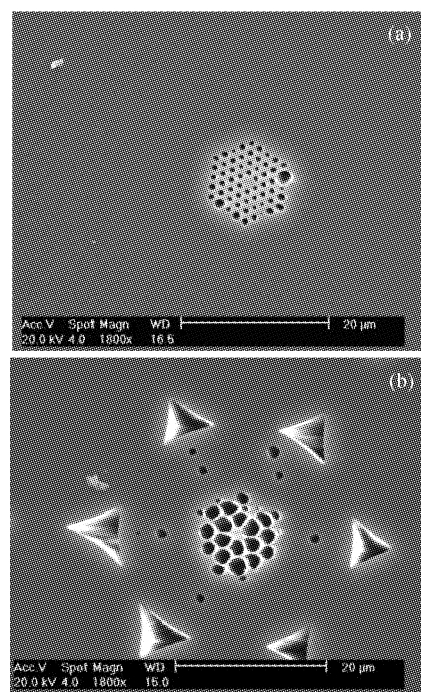


图1 空气比分别为60%(光纤A)(a)和80%(光纤B)(b)的微结构光纤端面显微图

Fig. 1 Cross-sectional images of microstructure fibers with a core diameter of $2 \mu\text{m}$. The air-filling fraction is 60% (fiber A) (a) and 80% (fiber B) (b)

并趋于更加平坦。在功率增加过程中,光谱的展宽包含了明显的孤子自相位频移、高阶孤子的形成、高阶孤子分裂成几个基孤子、非孤子的辐射,以及在四波混频效应的作用下,光谱趋向平坦。图2中(a),(b)为光纤A和光纤B在输入脉冲宽度35 fs,中心波长820 nm,不同平均功率飞秒激光脉冲作用下产生的超连续光谱。从图中可以看到二者有一些共同的规律,在低功率时有很明显的自频移效应,在红外波段形成一个明显的峰,同时在可见光波段也有相应的峰出现;随着功率的增加,飞秒激光脉冲在红外波段形成孤子,并伴随相应的非孤子辐射^[15,16],光谱显示为红外波段的峰往长波扩展,并出现几个峰,而相应短波也往蓝绿方向扩展,峰与峰之间的间隔也逐渐被新的成分所占据,从而使整个光谱变得平坦。明显的区别在于短波波段的非孤子辐射的峰值不同,光纤A在700 nm处,而光纤B则离输入脉冲的中心波长更远,在550 nm处。随着功率增加,非孤子辐射的强度增强,短波波段继续扩展,相应的长波波段也在扩展,而且光纤A在长波波段有明显的高阶孤子分裂^[15],而光纤B存在两个主要的峰值,为孤子自频移和非孤子辐射所形成^[16],最终在

四波混频效应的作用下,光谱变得连续,因此大空气比的微结构光纤获得较宽的超连续光谱。

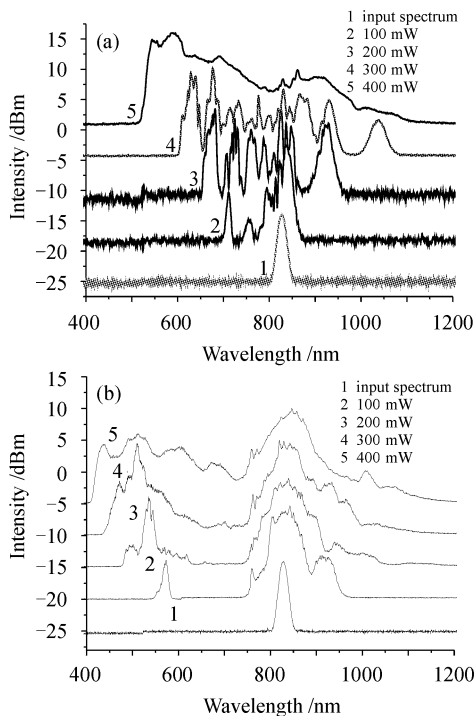


图 2 在不同功率的飞秒脉冲输入下光纤 A(a), 光纤 B(b) 所获得的超连续光谱

(本文中所有光谱数据都在纵坐标上作了调整以方便对比, 实际数据在强度上都近似相等)

Fig. 2 Dependence of output spectra, fiber A (a), fiber B (b) on the pump power

(The spectrum curves in this paper are all scaled vertically for comparison; the output spectra all have approximately the same peak value)

随着输入功率的增加,输入脉冲中心波长往长波方向偏离零色散点越远,光谱展宽越宽越平坦。图 3 为脉冲宽度 35 fs,平均功率 600 mW,中心波长为 840 nm 的飞秒激光脉冲在两种光纤中产生的超连续光谱。在光纤 A 中获得了从 520~1250 nm 超过一个倍频程的超连续光谱,而光纤 B 中获得了 350~1320 nm 近两个倍频程的超连续光谱,光谱都展宽了近 1.25 倍(因为光谱的范围限制,这里换用了 Ando 的 AQ6315A 光谱分析仪)。可见在相同纤芯面积情况下,增大空气比能极大地增强飞秒脉冲在微结构光纤中光谱的展宽。

由于包层空气比的增加而极大地增强非线性光谱展宽过程的机理可以通过下面简单的分析去理解。微结构光纤的有效模面积同纤芯和包层的折射率差的关系可以近似表示为^[18]

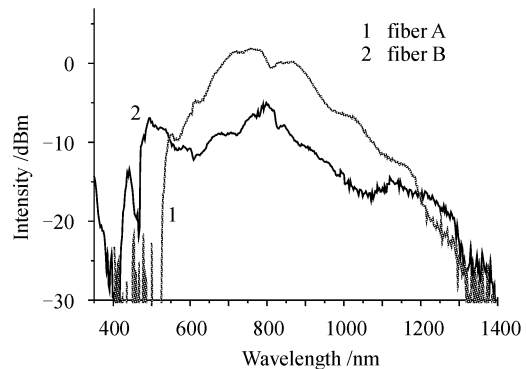


图 3 近两个倍频程的超连续光谱的获得

Fig. 3 Supercontinua about two octave generated at more power coupled in

$$A_{\text{eff}} \propto (\Lambda/d) \times \Lambda^2 + O(\Lambda/d) \quad (1)$$

其中 Λ 为空气孔之间的距离, d 为空气孔的大小,而增大空气比的过程就是减小 Λ , 增大 d 。因此从公式(1)可以清楚地得出增大空气比,有效模面积变得更小,传播的光场更可能被局域在光纤纤芯中。事实上,式(1)还说明有效模面积受空气孔之间的距离影响更大,这是因为空气孔之间距离的减小同时也使纤芯变小。而非线性系数通常由下式表示^[19]

$$\gamma = \omega n_2 / c A_{\text{eff}} \quad (2)$$

其中 n_2 为非线性折射率系数, ω 为角频率, c 为光速。可以明显看到,有效折射模面积越小,非线性作用越强烈。因此在空气比更大的微结构光纤中,自相位调制、四波混频、交叉相位调制、自陡峭等各种非线性效应都被极大地增强了,从而在其他参数相同的情况下,空气比越大的微结构光纤能获得更宽的超连续光谱,这一点已为上述实验所验证。Gaeta 的理论计算结果表明,当入射的低平均功率飞秒脉冲位于反常色散区时,这时超连续光谱的产生机理被解释为主要是高阶孤子裂变和四波混频效应^[20]。输入的飞秒激光脉冲在反常色散区形成的高阶孤子由于拉曼效应和自陡峭效应的作用裂变为多个基孤子脉冲,每个孤子脉冲会发出对应的蓝移而且相位匹配的非孤子波^[15,16];在无高阶孤子形成时,自相位调制和相位匹配的四波混频是超连续光产生的主要机制^[21,22]。色散曲线所决定的相位匹配作用决定了光谱短波段的宽度,同时限制了长波方向的相对展宽。而对于相同纤芯而空气比不同的微结构光纤而言,空气比大的微结构光纤零色散点更偏向短波。本文中光纤 A 的零色散点为 770 nm,而光纤 B 则在 670 nm,因此在相同的飞秒激光脉冲作用下,空气比大的微结构光纤其相位匹配决定了短波的展

宽更有优势,这一点在图 2 的光谱图中也能看出来。因此在相同飞秒激光脉冲作用下,对于相同纤芯面积的微结构光纤而言,大空气比的微结构光纤能获得更宽的光谱展宽。

3 结 论

实验研究了微结构光纤包层空气比对超连续光谱产生的影响,并详细研究了在不同功率情况下光谱的展宽情况。在平均功率为 600 mW,中心波长为 840 nm 的飞秒激光的作用下,获得了近两个倍频程的超连续光谱。通过改变包层空气比来控制非线性光谱展宽的过程,这对接下来的研究,如脉冲压缩、孤子传输、受激拉曼传输等都很有现实意义。

参 考 文 献

- J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19):1547~1549
- T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13):961~963
- J. C. Knight, P. St. J. Russell. New ways to guide light [J]. *Science*, 2002, **296**(5566):276~277
- Jinendra K. Ranka, Robert S. Windeler, Andrew 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
- T. A. Birks, W. J. Wadsworth, P. St. J. Russell. Supercontinuum generation in tapered fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19):1415~1417
- William J. Wadsworth, Arturo Ortigosa-Blanch, Jonathan C. Knight *et al.*. Supercontinuum generation in photonic crystal fibers and optical fiber tapers; a novel light source [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9):2148~2155
- Anton V. Husakou, Joachim Herrmann. Supercontinuum generation, four-wave mixing, and fission of higher-order solitons in photonic-crystal fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9):2171~2182
- Alexander Apolonski, Boris Povazay, Angelika Unterhuber *et al.*. Spectral shaping of supercontinuum in a cobweb photonic-crystal fiber with sub-20-fs pulses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9):2165~2170
- Andrei B. Fedotov, Aleksandr N. Naumov, Aleksei M. Zheltikov *et al.*. Frequency-tunable supercontinuum generation in photonic-crystal fibers by femtosecond pulses of an optical parametric amplifier [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9):2156~2164
- D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka *et al.*. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. *Science*, 2000, **288**(5466):635~639
- S. A. Diddams, D. J. Jones, J. Ye *et al.*. Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(22):5102~5105
- R. Holzwarth, Th. Udem, T. W. Hansch *et al.*. Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(11):2264~2267
- Th. Udem, R. Holzwarth, T. W. Hansch. Optical frequency metrology [J]. *Nature*, 2002, **416**(6877):233~237
- I. Hartl, X. D. Li, C. Chudoba *et al.*. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air silica microstructure optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9):608~610
- A. V. Husakou, J. Herrmann. Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(20):203901-1~203901-4
- J. Herrmann, U. Griebner, N. Zhavoronkov *et al.*. Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(17):173901-1~173901-4
- Sun Jinghua, Zhang Ruobing, Wang Qingyue *et al.*. High-average-power self-mode-locked Ti:sapphire laser self-started by a semiconductor saturable-absorber mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8):1019~1021
孙敬华,章若冰,王清月等. 半导体可饱和吸收镜启动的高功率飞秒掺钛蓝宝石激光器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8):1019~1021
- Niels Asger Mortensen. Effective area of photonic crystal fibers [J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(7):341~351
- G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd Ed. New York: Academic Press, 2001
- Alexander L. Gaeta. Nonlinear propagation and continuum generation in microstructured optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(11):924~926
- Karen Marie Hilligsøe, Thomas Vestergaard Andersen *et al.*. Supercontinuum generation in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**:1045~1053
- Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng *et al.*. Supercontinuum generation and transmission in a random distorted microstructure fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):567~569
胡明列,王清月,栗岩锋等. 非均匀微结构光纤中超连续光的产生和传输[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):567~569