

文章编号: 0258-7025(2005)05-0613-04

飞秒激光脉冲在双折射微结构光纤中频率变换的研究

胡明列^{1,2}, 王清月^{1,2}, 栗岩峰^{1,2}, 柴路^{1,2}, 王专^{1,2}, 邢歧荣^{1,2}

(天津大学¹精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 天津 300072)
²教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072

摘要 报道了高非线性的双折射微结构光纤(MFs)与纳焦耳量级的飞秒激光脉冲相互作用下,在可见光波段通过相位匹配的四波混频效应获得了波长可调谐的反斯托克斯波的实验结果。由于该光纤的双折射性质,因此在不同偏振方向上具有不同的色散特性,所产生的反斯托克斯超短脉冲的中心波长受到输入脉冲的偏振态的影响。通过旋转输入端的半波片,在相互垂直的两种偏振态的飞秒激光脉冲的作用下,所产生的反斯托克斯波脉冲的中心波长分别为 490 nm 和 510 nm,在微结构光纤的输出端能分别观察到明亮的蓝光和绿光的基模输出。实验研究了在不同功率飞秒脉冲激光的作用下,在不同长度的双折射微结构光纤中反斯托克斯波的产生情况,并对一系列现象进行了对比分析。

关键词 非线性光学; 微结构光纤; 飞秒脉冲激光; 超连续光谱; 双折射

中图分类号 O437 **文献标识码** A

Frequency Conversion in a Birefringent Microstructure Fiber by Femtosecond Pulses

HU Ming-lie^{1,2}, WANG Qing-yue^{1,2}, LI Yan-feng^{1,2}, CHAI Lu^{1,2},
WANG Zhuan^{1,2}, XING Qi-rong^{1,2}

¹ Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering,
² Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Microstructure fibers (MFs) with a specially designed form birefringence are shown to be ideally suited for the creation of highly efficient frequency-tunable sources of short pulses in the visible range as a result of nonlinear-optical spectral transformation of unamplified femtosecond Ti:sapphire laser pulses. The modes of doublet polarized along the fast and small axes of the elliptical core of the fiber have different propagation constants. Controlled by a half waveplate, femtosecond pulses of 820 nm pump radiation polarized along the fast and slow axes of the elliptical core of the microstructure fiber can generate intense blue-shifted lines centered at 490 and 510 nm respectively, observed as bright blue and green emission at the output end of the microstructure fiber. The dependence factors, such as length, power, are also compared and analyzed experimentally.

Key words nonlinear optics; microstructure fiber; femtosecond laser; supercontinuum spectrum; birefringent

1 引 言

近年来高非线性微结构光纤(MFs)^[1,2]已经成为产生超连续光谱的有效手段,未经过放大的纳焦耳量级的飞秒激光脉冲就可以在光纤中产生一个倍频程

甚至两个倍频程的超连续光谱。自从 Ranka 等^[3]报道在微结构光纤中产生两个倍频程(390~1600 nm)的超连续光谱以来,该领域便迅速成为当前光学研究的一个热点^[4~9],而且超连续光谱在控制飞秒激光脉

收稿日期: 2004-03-12; 收到修改稿日期: 2004-05-26

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

作者简介: 胡明列(1978—),男,四川广汉人,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

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。以前的实验已经发现所产生的超连续光谱同微结构光纤和飞秒激光脉冲的参量都有关,例如微结构光纤的零色散点、空气比以及飞秒激光脉冲的脉宽、中心波长、功率、偏振态^[15]等等。传统光纤主要依赖自相位调制效应产生在中心频率两侧对称分布的钟形超连续光谱,而在微结构光纤中自相位调制、高阶孤子分裂、群速度色散、三阶色散、四波混频、交叉相位调制、双折射以及自陡峭等诸多效应对超连续光谱的形成都有贡献^[16~21]。对于几十个飞秒宽度的脉冲来说,当入射的低平均功率飞秒脉冲位于反常色散区时,在同样平均功率的飞秒脉冲作用下,脉冲越宽,产生的超连续光谱也越宽。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^[9,20]。在以前的研究中,主要热点都集中在如何获得更宽、更平坦、更连续的光谱,并多使用弱双折射的微结构光纤,而本文选取宽度为35 fs脉冲作为输入脉冲,在强双折射微结构光纤中利用相位匹配的四波混频效应在可见光波段产生了反斯托克斯的上转换频移飞秒脉冲光,并且利用光纤的保偏特性以及在快慢轴方向上的不同色散特性,使得输出光具有特定的偏振特性且中心波长在490 nm和510 nm可调谐。

2 实验装置

实验中使用的光源是自行研制的飞秒激光振荡级系统,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^[22,23]。实验中使用的飞秒激光脉冲宽度为35 fs,中心波长在800~840 nm可调。使用了40×的耦合透镜输入输出,并采用电荷耦合器件(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扫描电子显微镜(SEM)图如图1所示,由单纯的硅构成,外径 $150 \pm 3 \mu\text{m}$,纤芯面积为 $2.1 \mu\text{m} \times 1.6 \mu\text{m}$,空气比为80%,单模截至波长在450 nm,快轴(x 方向)和慢轴的零色散点分别在675 nm和685 nm。输入输出光谱分别由两个光谱仪接收,输入光谱由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。输出光谱由 Ando 宽带光谱仪接收测量,测量精度5~10 nm。实验中耦合效率为20%~30%,输出为具有特定偏振方向的基模光。

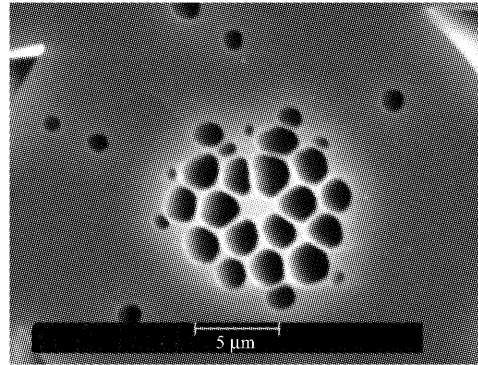


图1 扫描电子显微镜扫描获得的微结构光纤端面图
Fig. 1 SEM of the microstructure fiber section used for the experiment

实验装置中使用一个半波片来调整输入的飞秒脉冲激光的偏振态,微结构光纤纤芯的椭圆形状决定了其保偏特性,因此输出光谱也具有固定的偏振方向。正是由于形状上的特征,使得该种微结构光纤的快轴和慢轴方向的色散曲线不一样^[24],零色散点分别在675 nm和685 nm^[25]。正是由于不同的色散曲线,使得对于不同偏振方向的偏振光入射,非线性光学参量过程有了一个可以调谐的尺度。实验中通过简单的调整(旋转半波片)输入飞秒激光脉冲的偏振态便可以获得不同中心波长的反斯托克斯波。

3 实验结果及分析

实验使用的飞秒激光器输出的脉冲中心波长工作在820 nm之间调谐,保持输入脉冲宽度为35 fs。输入脉冲的偏振方向为平行于长轴方向和垂直于长轴方向,在60 cm长的微结构光纤中获得的光谱如图2所示。光谱有两个峰值,长波波段的峰值在输入脉冲的孤子自频移作用下有很小的红移,而短波波段的峰值则是通过相位匹配的四波混频效应产生的。由于双折射微结构光纤纤芯的椭圆结构,因此不同偏振方向的色散曲线是不同的,受相位匹配出现的反斯托克斯波的中心波长在不同偏振方向的飞秒激光脉冲的作用下发生偏移。在相互垂直的两种偏振方向的飞秒激光脉冲作用下,反斯托克斯波有30 nm的偏移,分别为480 nm和510 nm。

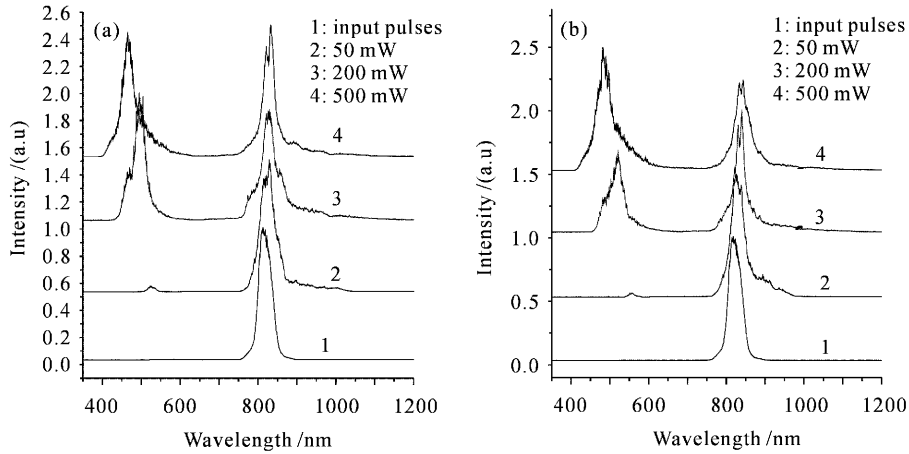


图 2 在 60 cm 微结构光纤中反斯托克斯波随功率演变的光谱图, (a), (b) 分别为不同偏振的入射光所产生的反斯托克斯光谱。(a) 入射光平行于快轴, (b) 与之垂直

Fig. 2 Dependence of output spectra on the pump power and polarization of input light in a 60 cm MFs. (a) generated by light with polarization paralleled to the fast axis, and (b) vertical to (a)

在 30 cm 长的微结构光纤中获得的光谱如图 3 所示, 结果同 60 cm 长的光纤中获得的结果相似, 只是反斯托克斯波的中心波长更靠近输入脉冲的中心波长。从图 2 和图 3 的对比分析中可以看出所获得的反斯托克斯波明显的特点是功率越高, 反斯托克斯波的光谱越宽, 中心波长越往短波移。光纤长度越长, 反斯托克斯波的光谱也变得越宽, 中心波长同样也向短波波段移。这是因为在更高功率情况下, 对于参量过程 $2\omega_p = \omega_s + \omega_a + 2\gamma P_0$ 而言, 非线性项的作用更加明显, 更多的光谱成分参与到四波混频中来; 而光纤越长, 也使得非线性作用长度更长, 通过参量过程, 在短波波段产生了更多的光谱成

分。因为本文中的参量过程是在脉冲光的作用下产生的, 因此所产生的反斯托克斯波的脉冲重复频率应该与抽运光脉冲重复频率一致。实验中在过滤 650 nm 以上的光谱成分以后所测量的光同样是脉冲序列, 而且重复频率同输入脉冲的重复频率一致。通过估算, 该反斯托克斯波的时域宽度为皮秒量级。如果输入脉冲的中心波长更长, 实验中使用 840 nm 的中心波长时, 长波波段的峰值便出现了分裂; 这时如果输入的飞秒激光脉冲的平均功率继续增加, 由于四波混频效应, 超连续光谱便产生了。在中心波长 840 nm, 平均功率 600 mW 时, 获得了近两个倍频程的超连续光谱 (350~1320 nm)^[25]。

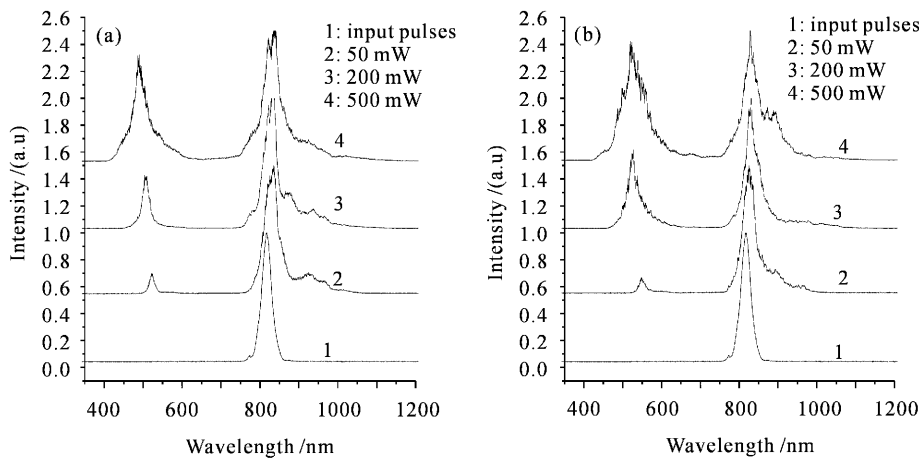


图 3 在 30 cm 微结构光纤中反斯托克斯波随功率演变的光谱图。(a), (b) 分别为不同偏振的入射光所产生的反斯托克斯光谱。(a) 入射光平行于快轴, (b) 与之垂直

Fig. 3 Dependence of output spectra on the pump power and polarization of input light in a 30 cm MFs. (a) generated by light with polarization paralleled to the fast axis, and (b) vertical to (a)

4 结 论

实验研究了双折射微结构光纤与纳焦耳量级的飞秒激光脉冲相互作用下,在可见光波段通过相位匹配的四波混频效应产生了波长可调谐的反斯托克斯波超短脉冲。由于该光纤的双折射性质,其快慢轴的色散曲线有所差异,因此所产生的反斯托克斯超短脉冲的中心波长受到输入脉冲的偏振态的影响。在相互垂直的两种偏振态的飞秒激光脉冲作用下,所产生的反斯托克斯波脉冲的中心波长有30 nm的调谐范围。实验研究了在不同功率、不同中心波长的飞秒脉冲激光的作用下,在不同长度的双折射微结构光纤中反斯托克斯波的产生情况,并对一系列现象进行了对比分析。

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. 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
- T. A. Birks, W. J. Wadsworth, P. St. J. Russell. Supercontinuum generation in tapered fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1415~1417
- W. J. Wadsworth, Arturo Ortigosa-Blanch, J. 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
- A. V. Husakou, J. 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
- A. Apolonski, B. Povazay, A. 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
- A. B. Fedotov, A. N. Naumov, A. 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
- 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
- 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*, 2002, **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): 2264~2268
- 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
- M. Lehtonen, G. Genty, H. Ludvigsen *et al.*. Supercontinuum generation in a highly birefringent microstructured fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(7): 2197~2200
- Stephane Coen, Alvin Hing Lun Chau, Rainer Leonhardt *et al.*. Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 753~764
- Jay E. Sharping, Marco Fiorentino, Ayodeji Coker *et al.*. Four-wave mixing in microstructure fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14): 1048~1050
- Alexander L. Gaeta. Nonlinear propagation and continuum generation in microstructured optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(11): 924~926
- Stephane Coen, Alvin Hing Lun Chau, Rainer Leonhardt *et al.*. White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(17): 1356~1358
- 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
- Hu Minglie, Wang Chingyue, Li Yanfeng *et al.*. Supercontinuum generation and transmission in 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
- 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
- Zhang Zhigang, Chai Lu, Zhao Jiangshan *et al.*. Semiconductor saturable-absorber mirror for self-starting mode-locked Ti:sapphire lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1151~1152
- 张志刚,柴路,赵江山等. 用于钛宝石激光器自启动锁模的半导体可饱和吸收镜 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1151~1152
- Yanfeng Li, Bowen Liu, Zhihan Wang *et al.*. Influence on photonic crystal fiber dispersion of the size of air holes in different rings within the cladding [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(2): 75~77
- Ming Lie Hu, Ching-yue Wang, Lu Chai *et al.*. Birefringence-controlled anti-Stokes line emission from a microstructure fiber [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2004, **1**(6): 299~302