

doi: 10. 3788/gzxb20174608. 0814004

基于级联型光纤的孤子自频移增强特性

楼洋, 魏一振

(浙江大学 光电科学与工程学院 光及电磁波研究中心, 杭州 310058)

摘 要:设计了一种 10 m 掺铥光纤级联于 3 m 大模场光子晶体光纤末端的结构, 利用 400 fs、1 550 nm 脉冲光产生孤子自频移, 在入射光功率相同的情况下, 掺铥光纤末端的孤子频移量比大模场光纤末端多 100~150 nm, 平均多 30% 左右. 孤子与泵浦光在掺铥光纤末端的输出光谱表明, 残留泵浦光作用于 Tm^{3+} , 在 1.8~2.1 μm 范围产生受激辐射, 从而增强了拉曼效应, 导致孤子自频移增强. 实验结果揭示了一种增强孤子自频移效应的方法, 对于了解孤子在光纤中频移特性和提高基于孤子自频移的可调谐光源的调谐范围等具有参考意义.

关键词:非线性光学; 可调谐光源; 级联光纤; 孤子; 孤子自频移; 增强效应

中图分类号: O437

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0814004-5

Characteristics of Enhanced SSFS Based on Cascaded Fiber

LOU Yang, WEI Yi-zhen

(Center for Optical & Electromagnetic Research, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: A structure was designed that a 10m thulium-doped fiber is cascaded to 3 m large-mode-area photonic crystal fiber, and soliton self-frequency shift was generated by a 400 fs, 1 550 nm light pulse. At the same incident power, solitons in thulium-doped fiber experience more frequency-shift than that in large-mode-area fiber by 100-150 nm (30% on the average). Output spectra of soliton and pump at the end of thulium-doped fiber show that the stimulated radiation from Tm^{3+} is generated among 1.8-2.1 μm by residual pump, which results in greater Raman effect and cause the soliton self-frequency shift enhanced. The findings reveal a way to enhance soliton self-frequency shift, and have significance on extension of tunable range of laser based on soliton self-frequency shift.

Key words: Nonlinear optics; Tunable light sources; Cascaded fiber; Solitons; Soliton self-frequency shift; Enhanced effect

OCIS Codes: 140.3510; 140.3430; 190.5530; 190.5650; 190.4370

0 引言

1973 年 Bell 实验室的 Hasegawa^[1]对光纤中孤子的存在进行了理论分析, 1986 年 Gordon^[2]提出了孤子自频移(Soliton Self-Frequency Shift, SSFS)效应, 次年由 Mitschke 等实验证实^[3]. 孤子自频移是一种高阶的非线性效应, 当超短光脉冲在光纤中传播时, 高频分量通过受激拉曼效应将能量从高频转移到低频部分, 表现为孤子的中心波长连续地往长波方向移动. SSFS 被广泛应用在光模数转换器^[4]、光延迟器^[5]等领域, 更引人注目的是其在波长转换的潜力^[6], 即孤子频移量随着泵浦光功率的增加而增加, 这是实现可调谐

基金项目: 浙江省公益技术研究工业项目 (No. 2014C31066), 浙江省自然科学基金青年基金项目 (No. LQ13F050009) 资助

第一作者: 楼洋(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤激光器, 光纤非线性效应. Email: lou_fsn@hotmail.com

导师(通讯作者): 魏一振(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为超快激光及光纤非线性效应. Email: yizhenwei@hdu.edu.cn

收稿日期: 2017-03-07; 录用日期: 2017-04-14

<http://www.photon.ac.cn>

激光器的方式之一.高雪健^[7]利用飞秒脉冲泵浦高非线性光纤,实现了1 584~1 982 nm的脉冲调谐范围.

随着对光纤中孤子研究的深入,人们开始寻找增强光纤中 SSFS 效应的方式. Gordon 的研究表明^[2], SSFS 强度与脉冲宽度、色散和拉曼泵浦等相关,目前报道过的增强方式主要也是从这几点出发. SSFS 频移量与脉冲宽度的四次方成反比^[2],通过减小脉宽来提高 SSFS 效果显著. Serebryannikov 等^[8]实验研究了小脉宽脉冲的增强效果,用 30 fs 脉冲在 7 cm 光子晶体光纤中得到 100 THz 的频移量.然而产生超短脉冲的成本高、器件复杂,Alaa 等^[9]利用光纤色散控制孤子频移量,在 10 cm 拉锥 As₂Se₃ 硫系光纤中得到 860 nm 频移量.脉宽和色散控制对光纤和初始光脉冲有较高要求,Chestnut 等^[10]发现在孤子频移范围内加泵浦源提供增益,可获得额外的频移增量,Blow^[11]等通过数值模拟也得到了类似的结论.

本文提出了一种采用级联光纤增强 SSFS 效应的方法,将一段 10m 长的掺铥光纤 (Thulium-Doped Fiber, TDF) 空间耦合到一段 3 m 长的大模场光子晶体光纤 (Large-Mode-Area Fiber, LMA25) 的后端,同时注入超短脉冲产生 SSFS.在相同光功率的情况下,TDF 出射端相对于 LMA25 出射端的孤子频移量有显著增加,实验和理论分析表明,其频移增量来源于光纤中 Tm³⁺ 受激辐射产生的频谱分量的激励作用.研究可同时实现 2~2.2 μm 波长连续可调的脉冲输出.

1 实验装置与方法

实验光路如图 1,除了两段光纤外,其它部分均采用空间光形式.光源采用脉宽约为 400 fs、重频 1MHz、中心波长 1 550 nm 的被动锁模激光器.空间光隔离器 (Optical Isolator, ISO) 用于防止背向光损坏光源.半波片和偏振分束器 (Polarization Beam Splitter, PBS) 用于调整脉冲偏振态和光功率.透镜 (L₁、L₂、L₃) 根据光纤数值孔径采用合适的焦距以达到较好的空间光耦合效率.孤子首先在一段 3 m 长的 LMA25 光纤中产生,并随着入射光功率的增加往长波长方向移动,即 SSFS 效应.接着光脉冲通过空间光耦合进入另一段 10 m 长的 TDF 进行第二阶段的 SSFS,在 LMA25 和 TDF 的出射端用光谱仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA) 接收并记录其频谱.为方便比较,实验中的功率测量位置在两段光纤之间,即 LMA25 的输出端光功率.为了进一步分析 SSFS 效应的增强原因,在光纤间采用不同的滤光片 (Optical Filter) 对入射 TDF 的频谱进行选择.

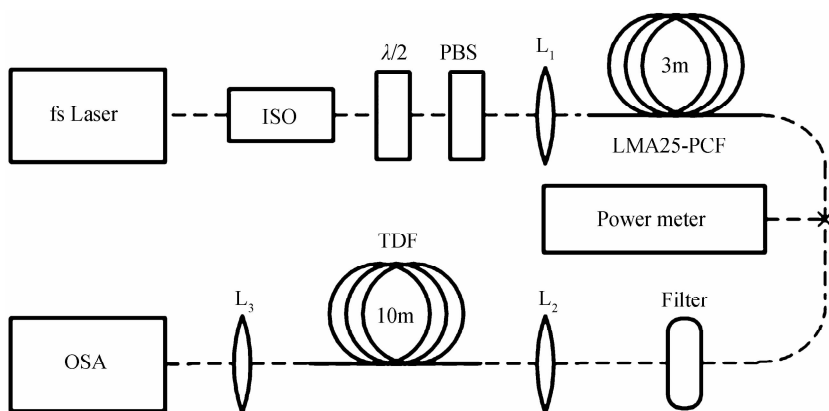


图 1 级联型光纤 SSFS 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of cascaded fiber experiment of SSFS

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

图 2(a) 为 LMA25 出射端测得的光谱,测量位置统一在图 1 中标记处.当光功率达到 7.5 mW 时,1 550 nm 泵浦脉冲分裂出基态孤子,并随着功率增加产生了中心波长连续红移的孤子自频移现象,在 2.1 μm 处由于石英光纤损耗快速增加导致频移减缓,直至停止.可以看到,除了频移量最大的基态孤子,随着功率增加,泵浦脉冲还会不断分裂出高阶孤子,受到多种非线性效应的影响最终形成超连续谱,其特性不在本文的讨论范围内.图 2(b) 为不加滤光片情况下 TDF 出射端测得光谱,观察到在 1.6~1.9 μm 范围内几乎没有频谱分量,因此进一步测量了实验用的 TDF 吸收谱如图 3.吸收谱表明了 1.6~1.9 μm 频谱范围处

在 Tm^{3+} 的吸收频带内,此范围内的频谱分量被大幅削减,所以光谱记录从孤子中心波长大于 $1.9 \mu m$ 后开始. TDF 吸收谱线左边缘近似直线的原因是测量时采用了截止波长为 $1.6 \mu m$ 的长波通滤光片. 图 2(b) 中的孤子首先在功率达到 $30 mW$ 时出现,中心波长在 $2 \mu m$ 附近,随着功率增加孤子往长波长方向频移,在 $2.2 \mu m$ 附近停滞.

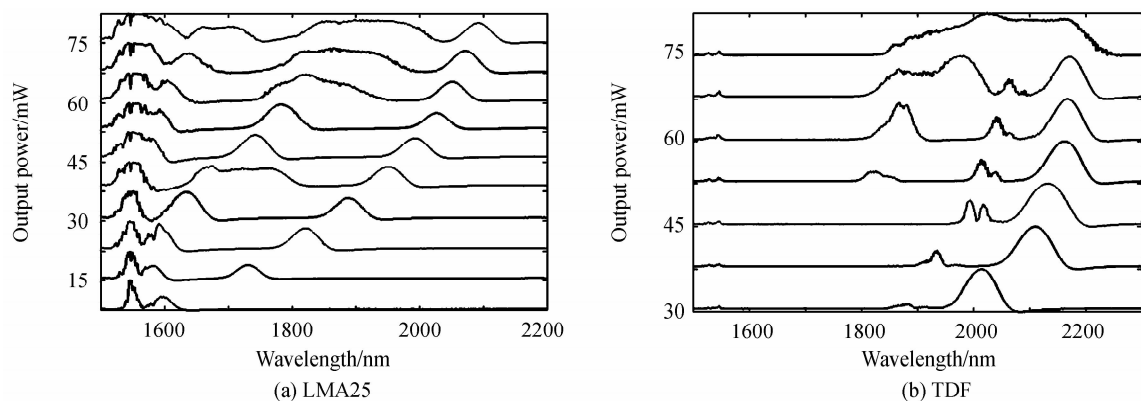


图 2 LMA25 和 TDF 的出射光谱
Fig. 2 Output spectrum of LMA25 and TDF

将两段光纤中光功率随波长变化的情况进行对比得到图 4. 很明显,在同一光功率下孤子在 TDF 中的中心波长比 LMA25 中增加了 $100 \sim 150 nm$ 不等,平均增加了 30% ,表明了 TDF 对孤子自频移效应的增强作用,同时两段光纤中孤子的 SSFS 斜率变化接近,说明这种增强效应与孤子的中心波长关系不大.

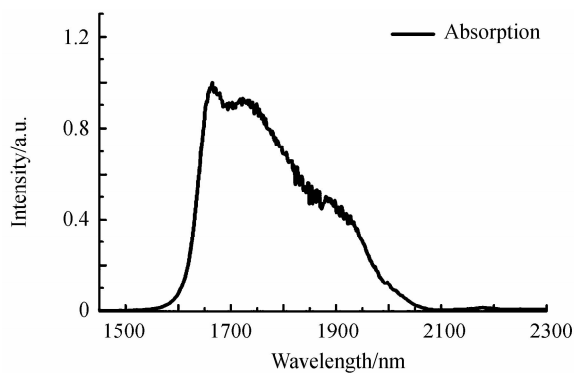


图 3 TDF 的吸收谱
Fig. 3 Absorption spectrum of TDF

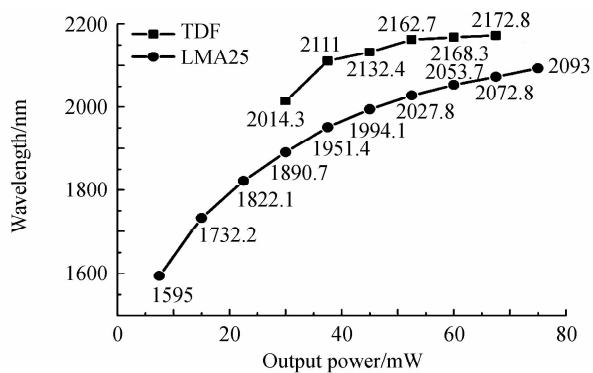


图 4 LMA25 和 TDF 中孤子中心波长随光功率的变化
Fig. 4 Wavelength of soliton versus optical power in LMA25 and TDF

2.2 分析

从实验结果来看, TDF 是 SSFS 效应增强的关键,其中产生了某种激励源,将一部分能量从高频转移到了低频部分,孤子得以继续往长波长方向频移. 由此可以做出合理的假设, TDF 作为有源光纤, Tm^{3+} 的掺杂增强了光纤的非线性效应,导致了更大的孤子自频移量,同时随孤子一起入射 TDF 的 $1550 nm$ 的残留泵浦光也起到了一定作用.

为了验证假设,通过在两段光纤中间加入滤光片来分离泵浦光和孤子,单独分析两者在 TDF 中的效果. 图 5(a) 为使用中心波长为 $1550 nm$ 的带通滤光片的出射光谱,即仅有泵浦光进入 TDF,观察到除了泵浦光外,在 $1.9 \sim 2.1 \mu m$ 区域产生了频谱分量,并随着功率增加,频谱分量连续红移. 值得注意的是,在相同入射功率下,频谱分量的中心波长与图 2(a) 中孤子中心波长相同,说明泵浦光虽可以产生红移频谱分量,但是没有起到频移量增强效果. 图 5(b) 为使用截止波长为 $1600 nm$ 的长波通滤光片后 TDF 的出射光谱,即入射光去除了泵浦光保留了孤子部分. 同样可以观察到连续红移的频谱分量,即在相同入射功率下,其中心波长与图 2(b) 中的孤子中心波长对应,说明这个频谱分量为孤子. 在缺少泵浦光的情况下, SSFS 效应没有得到加强, TDF 仅作为传输介质延长了传输距离,可以排除光纤长度增加而导致孤子频移量增加的可能性. 因此,无泵浦光存在下 TDF 中的 SSFS 效应不能加强,仅有泵浦光存在时也不能加强,只有泵浦光与孤子同时

存在时才会加强 SSFS 效应.

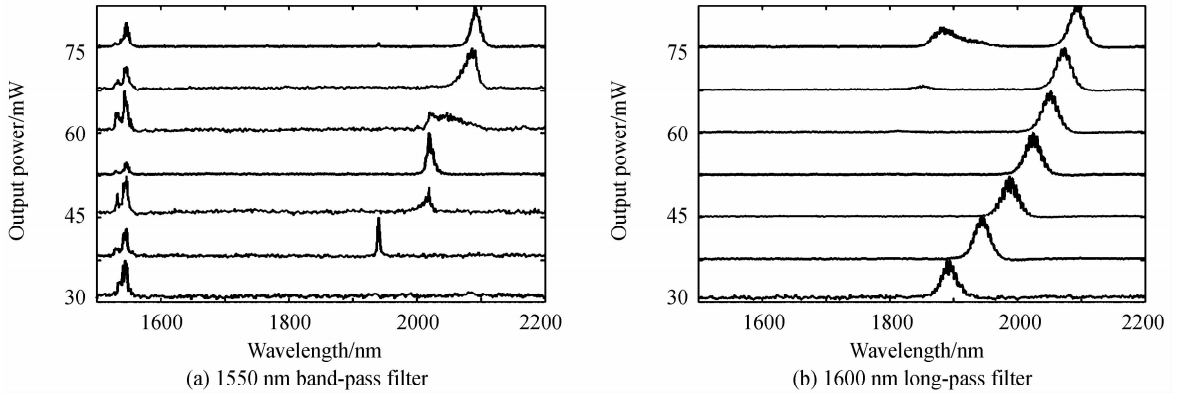


图5 使用不同滤光片后 TDF 出射光谱

Fig. 5 Output Spectrum of TDF based on different filters

考察了孤子在不同光纤中产生的频移量的相关报道^[12-15]发现,除了光纤损耗外,一个重要的影响因素就是光纤拉曼增益谱的不同,Gordon^[2]指出孤子频移量与拉曼效应的强度存在正相关关系.TDF 具有较大的拉曼效应强度^[16]和非线性系数,更易于满足 SSFS 的相位匹配条件,有利于频移量的增加.然而,孤子本身能量较小,不足以激发很强的拉曼效应,TDF 作为有源光纤在此过程中起到了很大作用.关于 TDF 的特性,文献^[17, 18]给出了一定的分析,结合本实验可以得出,孤子频移能量主要来源于 Tm^{3+} 的受激辐射,受到残留 1 550 nm 泵浦光的作用, Tm^{3+} 产生的能级跃迁,同时受激辐射出 1.8~2.1 μm 的频率分量,这部分能量增强了拉曼效应,从而使 TDF 中处于此波长范围内的孤子获得了频移增量.当 $3F_4$ 粒子数量足够大,粒子会通过产生交叉驰豫激发到 $3H_4$ 能级上,能级的受激辐射产生 2.2~2.5 μm 的频率分量,有利于孤子进一步频移,然而此跃迁属于能量上转换,条件不易满足,实验结果中此现象不明显.

SSFS 效应的增强意味着以较少的泵浦光功率得到较大的输出孤子的频移量,对提高基于 SSFS 的可调谐光源的调谐范围、降低其所需的泵浦光能量具有积极意义.对比图 2(a)和图 2(b),在 LMA25 和 TDF 末端测得孤子的中心波长都频移到 2 μm 处时,LMA25 需要的功率为 45 mW,TDF 只需要 30 mW,节省了 33%的功率.从另一个角度来看,同样是 45mW 的光功率,LMA25 末端孤子获得了 1 600~2 000 nm 一共 400 nm 的频移量,TDF 末端则获得了 1 600~2 150 nm 一共 550 nm 的频移量,比前者增加了 37.5%.

3 结论

本文将掺铥光纤 TDF 通过空间光耦合级联到大模场直径光子晶体光纤 LMA25 末端,使用 1 550 nm、400 fs 的超短脉冲依次通过两段光纤,实验研究了两段光纤中孤子自频移的增强特性,结果表明:

1) 400 fs、1 550 nm 脉冲光源在两段光纤中产生孤子自频移现象,输出功率相同时,掺铥光纤中孤子的频移量比大模场光纤中的增加了 100~150 nm,平均增加了 30%;

2) TDF 中残留的 1 550 nm 泵浦光使得 Tm^{3+} 产生了的能级跃迁,并在 1.8~2.1 μm 范围产生受激辐射,增强了拉曼散射效应进而导致孤子频移量增加;

3) 相比于单 LMA 的情况,级联 TDF 的方式将孤子获得相同频移量所需的泵浦光功率减少了 33%左右,将相同泵浦光功率下的孤子频移量提高了 37.5%,对采用 SSFS 制作波长可调谐的光源提供了新思路.

参考文献

- [1] HASEGAWA A, TAPPERT F. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. I. Anomalous dispersion[J]. *Applied Physics Letters*, 1973, **23**(3):142-144.
- [2] GORDON J P. Theory of the soliton self-frequency shift[J]. *Optics Letters*, 1986, **11**(10):662-664.
- [3] MITSCHKE F M, MOLLENAUER L F. Discovery of the soliton self-frequency shift[J]. *Physics Today*, 1987, **11**(10):659-661.
- [4] NISHITANI T, KONISHI T, ITOH K. Resolution improvement of all-optical analog-to-digital conversion employing self-frequency shift and self-phase-modulation-induced spectral compression[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, **14**(3):724-732.
- [5] ODA S, MARUTA A. All-optical tunable delay line based on soliton self-frequency shift and filtering broadened

- spectrum due to self-phase modulation. [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(17):7895-7902.
- [6] ZHU Qi-hua, ZHOU Shou-huan, ZHAO Lei, *et al.* Influence of Raman gain on soliton transmission[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(8):331-339.
朱启华, 周寿桓, 赵磊, 等. 拉曼增益对孤子传输特性的影响[J]. 物理学报, 2011, **60**(8):331-339.
- [7] GAO Xue-jian. Study on 2 μm femtosecond pulse fiber laser based on Raman soliton self-frequency shift [D]. Changchun: School of Electronic Science and Engineering, 2016.
高雪健. 基于拉曼孤子自频移效应的 2 μm 飞秒脉冲光纤激光器研究[D]. 长春: 电子科学与工程学院, 2016.
- [8] SEREBRYANNIKOV E E, HU Ming-lie, LI Yan-feng, *et al.* Enhanced soliton self-frequency shift of ultrashort light pulses[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2005, **81**(10):487-490.
- [9] ALKADRY A, ROCHETTE M. Maximized soliton self-frequency shift in non-uniform microwires by the control of third-order dispersion perturbation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(9):1462-1467.
- [10] CHESTNUT D A, TAYLOR J R. Soliton self-frequency shift in highly nonlinear fiber with extension by external Raman pumping[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(24):2512-2514.
- [11] BLOW K J, DORAN N J, WOOD D. Suppression of the soliton self-frequency shift by bandwidth-limited amplification [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1988, **5**(6):1301-1304.
- [12] LIU X, XU C, KNOX W H, *et al.* Soliton self-frequency shift in a short tapered air - silica microstructure fiber[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(6):358-360.
- [13] XUE Guang-hui, YIN Ke, ZHANG Bin, *et al.* Numerical study of soliton self-frequency shift in fluoride fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(b12):162-167.
薛光辉, 殷科, 张斌, 等. 氟化物光纤中孤子自频移效应的数值研究[J]. 中国激光, 2013, **40**(b12):162-167.
- [14] WEI D, GALSTIAN T, ZOHRABYAN A, *et al.* Tunable femtosecond soliton generation in Ge-doped fibre[J]. *Electronics Letters*, 2004, **40**(21):1329 - 1330.
- [15] LU Chuan, YU Chong-xiu, SANG Xin-zhu, *et al.* Wavelength conversion based on SSFS in highly nonlinear PCF[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, **30**(4):595-598.
陆川, 余重秀, 桑新柱, 等. 基于高非线性 PCF 中 SSFS 效应的波长变换技术研究[J]. 半导体光电, 2009, **30**(4):595-598.
- [16] TUCKER L, CARNEY F, MCMILLAN P, *et al.* Raman and resonance raman spectroscopy of selected rare-earth sesquioxides[J]. *Applied Spectroscopy*, 1984, **38**(6):857-860.
- [17] GENG Ji-hong, WANG Qing, JIANG Shi-bin. High-spectral-flatness mid-infrared supercontinuum generated from a Tm-doped fiber amplifier[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(7):834-840.
- [18] SWIDERSKI J, MICHALSKA M. Mid-infrared supercontinuum generation in a single-mode thulium-doped fiber amplifier[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, **10**(3):035105.