

大模场面积光子晶体光纤全正色散自相似锁模激光器

杨 珍 柴 路 胡明列* 黄莉莉 陈 伟 廖若宇 王清月

天津大学精密仪器与光电子工程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 通过数值模拟和实验研究了一种基于大模场面积光子晶体光纤的高功率全正色散自相似锁模激光器。激光器采用长为 1.9 m 的掺镱双包层大模场面积光子晶体光纤作为增益介质, 腔内没有引入色散图, 整个激光器工作在全正色散域。激光器采用环形腔结构, 利用非线性偏振旋转锁模和一个窄带高斯滤波器实现了稳定的自相似锁模运转。实验最终获得了直接输出平均功率为 5 W, 重复频率为 72 MHz, 单脉冲能量超过 69 nJ, 脉冲宽度为 1.699 ps 的自相似锁模脉冲输出, 经过腔外 1200 line/mm 的透射光栅对压缩后脉宽为 84 fs。激光器可以实现自启动锁模, 光束质量因子 M^2 为 1.41。

关键词 激光器; 光纤激光器; 自相似; 大模场面积; 光子晶体光纤; 光栅滤波器; 全正色散

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0302005

All-Normal-Dispersion Self-Similar Mode-Locked Laser Based on Large Mode Area Photonic Crystal Fiber

Yang Zhen Chai Lu Hu Minglie Huang Lili Chen Wei Liao Ruoyu Wang Qingyue

*Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Ministry of Education,
Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China*

Abstract A high power self-similar fiber laser based on the Yb-doped large mode area photonic crystal fiber (LMA-PCF) is studied by simulation and experiment. The laser is operated in an all-normal-dispersion region. To obtain higher power, the laser is performed by Yb-doped LMA-PCF without dispersion map with length of 1.9 m, which operates in the all normal dispersion. A ring cavity is employed and the stable mode-locking is achieved through nonlinear polarization rotation with a grating filter. The laser directly outputs the self-similar pulses with average power of 5 W at repetition rate of 72 MHz with pulse duration of 1.699 ps, corresponding to pulse energy of 69 nJ. The dechirped pulse is 84 fs which is compressed by a pair of 1200 line/mm transmission gratings. The laser shows good self-starting property with the beam quality factor M^2 of 1.41.

Key words lasers; fiber laser; self-similar; large mode area; photonic crystal fiber; grating filter; all-normal-dispersion

OCIS codes 140.3615; 140.3510; 140.4050; 140.3560

1 引 言

超短脉冲激光具有峰值功率极高、脉冲宽度极窄、光谱宽等优点,在微观世界探测、精密测量、材料微加工、生物研究等方面有很好的应用^[1-2]。光纤激光器由于设计紧凑、结构简单、稳定性好、操作方便、非线性动力学过程丰富等优点,在产生超短脉冲上有着独特的优势^[3]。尤其是大模场面积光子晶体光纤问世之后,由于

收稿日期: 2015-08-27; 收到修改稿日期: 2015-10-13

基金项目: 国家自然科学基金 (61322502, 61078028, 61377041)、国家 973 计划 (2010CB327604, 2011CB808101, 2014CB339800)、教育部长江学者和创新团队发展计划 (IRT13033)

作者简介: 杨 珍 (1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤飞秒激光器等方面的研究。E-mail: zyang@tju.edu.cn

导师简介: 柴 路 (1956—), 男, 博士, 教授, 主要从事飞秒激光技术及其应用等方面的研究。E-mail: lu_chai@tju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: huminglie@tju.edu.cn

灵活的可设计性、极大的模场面积、良好的光束质量,光纤激光器在产生高能量、高峰值功率方面有着很大的潜力^[4]。双包层大模场面积掺镱光子晶体光纤的出现,更是有效地提高了抽运效率,具有高抽运吸收、高转换效率的特点,和普通单模掺镱光纤相比,还具有更高的功率损伤阈值。

锁模作为获得超短脉冲的一种重要方法,随着光纤激光器的发展而不断丰富起来。传统的被动锁模机制有孤子锁模、色散管理锁模,但是受到光纤中非线性效应的影响,输出能量有限^[5]。当脉冲能量进一步提高时,受到光纤非线性效应的影响会发生光波分裂。为了克服这种影响,人们发现将激光器运转维持在净正色散域就可以延迟甚至避免光波分裂,提升激光脉冲能量;相继发明了耗散孤子锁模、自相似锁模、全正色散锁模、放大的自相似锁模等,这些都可归属于耗散锁模。1993年 Anderson 等^[6]的研究表明:具有线性啁啾的脉冲在光纤中传输时,可以不发生光波分裂。2000年, Fermann 等^[7]在放大器中实现了抛物线脉冲的自相似演化。这些研究在理论上证明了自相似抛物线脉冲的存在和演化过程,通过对正色散域的非线性薛定谔方程求解,可以获得一个抛物线形的渐进解,其具有线性啁啾。并且脉冲的峰值功率、时域宽度和频谱宽度仅仅只由光纤参数和初始脉冲能量决定,在沿着传输距离指数增长的同时可以保持抛物线形不变,在高功率传输时,光波不发生分裂,对于获得高能量脉冲有着重要意义。而自相似脉冲只需进行合适的整形和压缩即可获得高功率、无基底的近似于变换极限的超短脉冲。

目前自相似锁模激光器主要有两种^[8]。一种是被动自相似激光器,主要通过对腔内的色散进行精确控制使脉冲在被动光纤内演化为自相似子。2004年, Ilday 等^[9]将孤子传输原理和自相似放大的原理结合设计了被动自相似光纤激光器,在腔内观察到了自相似子,在此基础上于2005年输出了单脉冲能量超过 10 nJ 自相似脉冲^[10]。另一种是放大自相似激光器,脉冲在增益光纤中依靠光纤的本征吸引子而演化为自相似子,实现了稳定的脉冲输出^[11]。2010年, Oktem 等^[12]通过在色散腔内加入一个滤波器对脉冲进行整形,脉冲在增益光纤中演化为自相似子,在腔内剩余部分演化为孤子,实现了孤子-自相似子的稳定运转。2010年, Renninger 等^[13-14]通过在腔内加入色散延迟线和一个光栅滤波器,输出了 3 nJ、65 fs 的自相似脉冲输出,通过调色散延迟线,可以将自相似演化扩展到了整个色散域。在此基础上,2013年, Lefrancois 等^[15]简化了腔内器件,仅采用一根长为 3 m 的 3 C(chirally coupled core fiber)光纤和一个光栅构成的窄带高斯滤波器,在腔内实现了自相似演化,输出了单脉冲能量 61 nJ 的超短脉冲,这是目前为止报道的放大自相似锁模振荡器输出的最高单脉冲能量。2014年,天津大学石俊凯等^[16]构建了全保偏双包层掺镱大模场面积光子晶体光纤(LMA-PCF)的单级飞秒激光放大系统,获得了平均功率为 34 W,脉冲宽度约为 50 fs,重复频率为 42 MHz 的高功率飞秒脉冲输出。2015年,徐润亲等^[17]报道了重复频率为 88.3 MHz,平均功率达到 3.5 W,脉宽为 7.2 ps,单脉冲能量为 39.64 nJ 的超短脉冲输出。同年,黄龙等^[18]报道了一种全光纤结构的高消光比线偏振激光振荡器,其输出功率为 93.2 W,中心波长为 1080 nm,光谱宽度为 1.2 nm。

为了获得更高的输出指标和探索这种锁模机制的稳定性,本文构建了基于大模场面积光子晶体光纤(LMA-PCF)的全正色散自相似锁模激光器。利用非线性偏振旋转(NPE)锁模,以及在腔内加入一个窄带光栅滤波器实现全正色散域的耗散机制,同时来稳定自相似演化。通过数值模拟系统研究了该激光器的锁模动力学过程,并在实验中获得了直接输出平均功率大于 5 W,单脉冲能量大于 69 nJ,重复频率为 72 MHz,脉冲宽度为 1.699 ps 的抛物线形脉冲,经腔外压缩后脉宽为 84 fs。

2 实验装置和数值模拟

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,激光器采用波长为 976 nm 的大功率激光二极管进行反向抽运,经过两个非球面透镜耦合到增益光纤中。增益光纤采用的是长为 1.9 m 的掺镱双包层大模场面积光子晶体光纤(LMA-PCF, DC-170-40-Yb-2),其纤芯模场直径为 30 μm ,数值孔径为 0.03。光纤内包层直径为 170 μm ,数值孔径为 0.62。增益光纤对 976 nm 的抽运光吸收系数为 13 dB/m。其中双包层的结构,有效地耦合了抽运光。为了防止自激振荡,将光纤端面打磨成为 8°。用一个非球面透镜将输出激光耦合到自由光路中,经过一个对中心波长为 976 nm 高透、中心波长为 1040 nm 光高反的双色镜(DM)分离了抽运光和激光,在整个环形腔中自由运转。为了保证整个腔内单方向运转加入了一个隔离度为 40 dB 的高功率隔离器。1/4 波片(QWP)、1/2 波

片(HWP)、偏振分束器(PBS)以及光栅后面的1/4波片和光纤共同组成了一个等效的可饱和吸收体,用于实现NPE锁模。输出端口1用来测量光谱,端口2用来测量脉冲的自相关曲线,端口3用来测量输出功率,端口4的激光用来监控锁模。图中HR为45°反射镜。

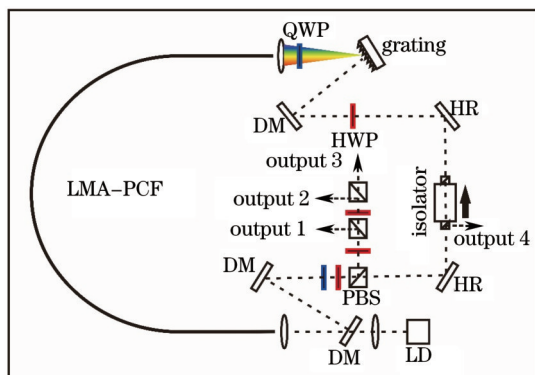


图1 激光器实验装置结构图

Fig.1 Experimental setup of laser system

研究表明:激光器腔内的窄带滤波器不仅提供了全正色散锁模激光器必须的耗散机制,而且对实现脉冲自相似演化起到了至关重要的作用。该窄带滤波器由一个300 line/mm的反射光栅、一个透镜和光纤端面构成。反射光栅将激光中的不同波长部分在空间上发散开,再用焦距为18 mm的透镜将发散的光谱适当会聚,在焦点位置用光纤端面采样,光栅透镜距离为11.5 cm;光纤的数值孔径整形了光束,构成了一个单峰只有几纳米的高斯滤波器。为了更加深入理解等效滤波器的传输特性,根据广义ABCDGH光束传输矩阵理论^[19],模拟光束从光栅衍射到透镜,以及通过透镜聚焦到光纤端面的传输过程。根据模拟结果其等效的滤波器带宽小于4 nm。实验中通过调整光栅前面的1/2波片,可以使其一级光衍射效率达到最高。

2.2 实验模型的数值模拟

为了更深入地研究该激光器的锁模动力学过程,利用薛定谔方程,建立了光子晶体光纤自相似锁模激光器的数值模型。数值模拟采用分布傅里叶变换,并根据实验结果和光纤参数共同设定激光器模型中各参数,光纤长度为1.9 m,中心波长为1035 nm,增益带宽为45 nm,群速度色散 $\beta_2 = 24 \text{ ps}^2/\text{km}$,光纤中三阶色散和其他器件引入的色散相对于光纤的二阶色散影响较小,可基本忽略不计,因此设定 $\beta_3 = 0$,非线性系数 $\gamma = 0.2589 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。根据实验结果设定小信号增益为 $g_0 = 4.08 \text{ m}^{-1}$,增益饱和能量为 $E_{\text{sat}} = 42 \text{ nJ}$,可饱和吸收体的调制深度 $l_0 = 0.95$,饱和功率为 $P_{\text{sat}} = 10 \text{ kW}$,高斯窄带滤波器的半峰全宽为3 nm,输出效率为70%,考虑到光栅衍射效率和耦合效率,腔内的损耗为30%。输出脉冲形状如图2(a)所示,输出脉冲具有抛物线形,其瞬时频率为线性的,可以证明在腔内实现了自相似演化。模拟结果显示输出单脉冲能量为69.8 nJ,光谱宽带为30.1 nm,脉宽为1.626 ps的抛物线形脉冲。

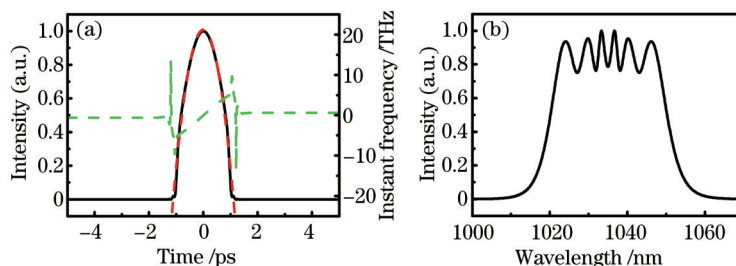


图2 数值模拟自相似脉冲。(a) 脉冲形状(黑色实线)、瞬时频率(绿色虚线)和抛物线拟合(红色虚线);(b) 光谱

Fig.2 Simulated self-similar pulse. (a) Pulse shape (black solid), instant frequency (green dashed), parabolic fit (red dashed); (b) spectrum

图3为输出脉冲的宽度和光谱在光纤中的演化过程。脉冲能量在光纤中不断放大,其宽度和相应光谱不断展宽,整个腔内循环的脉冲宽度和光谱都具有很大的呼吸比,其中光谱的呼吸比可达10。

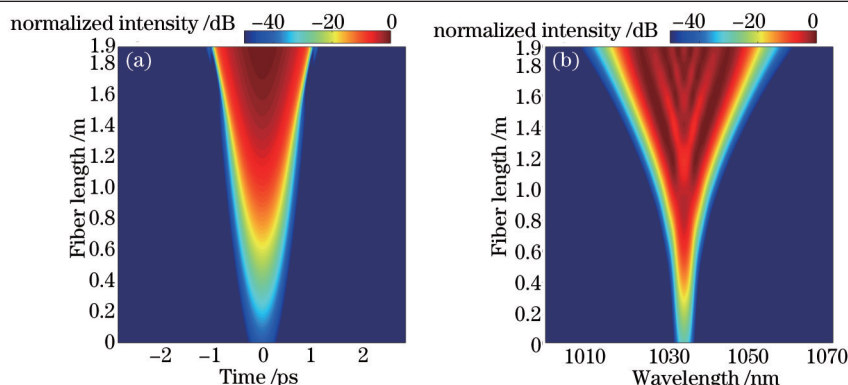


图3 数值模拟光纤中脉冲能量演化图。(a) 时域; (b) 频域

Fig.3 Pulse evolution in fiber simulated. (a) Time domain; (b) frequency domain

3 实验结果与分析

激光器工作在全正色散锁模区域内,增加抽运光功率,适当的调整波片位置,微调光栅改变入射到光纤中的中心波长和带宽,可以发现当抽运光功率达到 14 W 时,获得稳定的锁模输出。在输出端口 4 处监控锁模,获得了重复频率为 72 MHz 的锁模输出。如图 4(a)所示,增加抽运光功率,激光器的输出功率不断提高,当抽运光功率为 22 W 时,在输出端口 3 处获得输出功率为 5 W,单脉冲能量超过 69 nJ。受到抽运光功率的限制,最高只能输出功率为 5 W。激光器的锁模光谱随着抽运功率的增加而不断变宽,在最高输出功率为 5 W 处测得的光谱图像和对应的自相关曲线分别如图 5(a)、(b)所示。其中图 5(a)主图显示中心波长为 1035 nm,带宽为 28 nm,输出光谱近似于抛物线形,插图为对数坐标下的光谱,受到光纤中自相位调制的影响,抛物线拟合和实际光谱中心波段有一定的差别;图 5(b)的输出脉冲自相关曲线显示直接输出脉冲宽度为 1.699 ps (插图),通过在腔外使用一对 1200 line/mm 的透射光栅对其进行有效地压缩,获得了脉宽为 84 fs 的脉冲(主图)。为了测量激光器的稳定性,对其功率测量了 1 h,发现其抖动在 1% 以下,并且可以实现锁模自启动,如图 4(b)所示。光束质量是衡量激光光束的一个重要指标,实验中使用 $f=100$ mm 的透镜对激光器的输出光束

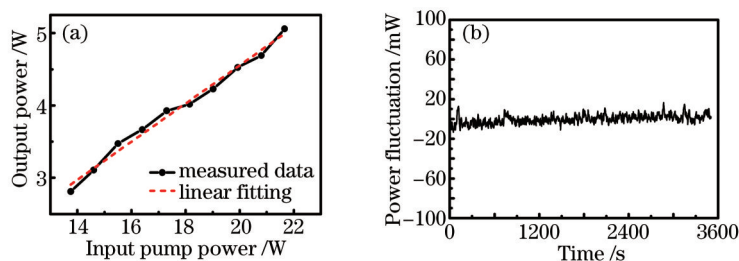


图4 (a) 激光器的锁模斜效率曲线; (b) 激光器的功率抖动曲线(1 h)

Fig.4 (a) Output power as a function of pump power; (b) power fluctuation of laser output over 1 h

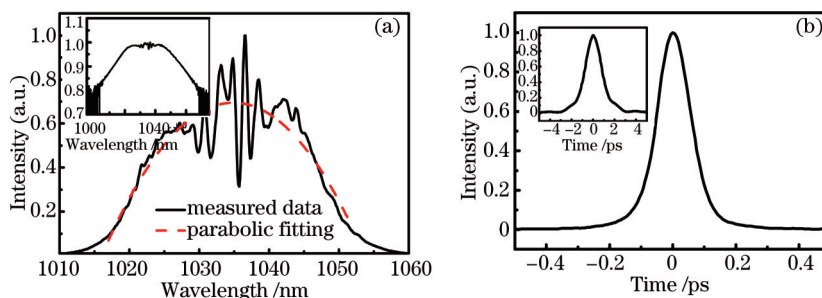


图5 (a) 激光器输出功率为 5 W 的光谱(黑色实线),抛物线拟合(红色虚线),插图为 dB 坐标下的光谱;

(b) 相应的自相关曲线:插图为压缩前,主图为压缩后的自相关曲线

Fig.5 (a) Output spectrum (black solid) and parabolic fit (red dashed) with laser power of 5 W. The inset shows the spectrum with dB coordinate; (b) corresponding autocorrelation traces: after and before (inset) the gratings compressor

进行聚焦,使用 Coherent 公司的 CCD 对激光器的输出光斑进行测量,激光器保持单横模运转,测得 M^2 因子为 1.41,其中 ω 为输出光斑的半径,如图 6 所示。

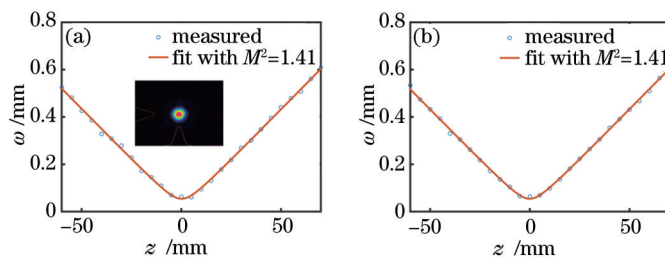


图 6 激光器输出光束 M^2 因子测量曲线,插图为输出的基模光斑。(a) x 轴; (b) y 轴

Fig.6 M^2 factor measurement of output beam. Inset shows output beam. (a) x axis; (b) y axis

为了验证激光器是否实现了自相似演化,利用实验输出的光谱以及自相关图像,在输出功率为 5 W 时,通过 PICASO(phase and intensity from cross correlation and spectrum only)算法还原出脉冲实际形状,并与理想的抛物线型脉冲进行对比,如图 7 所示。图 7(a)为利用 PICASO 算法计算出的直接输出的脉冲时域形状,以及对其进行抛物线和高斯拟合的结果,可以看出脉冲更接近抛物线型,证明该激光器已经实现了脉冲自相似演化。通过为实验中测得的光谱施加零相位,再经过傅里叶变换就获得了相应的变换极限的脉冲形状,如图 7(b)中虚线所示,变换极限脉冲宽度为 74 fs;将实验中直接输出的脉冲经过去啁啾后的 PICASO 还原脉冲形状如图 7(b)中的实线所示,其宽度为 84 fs。所以,实验所得脉冲与变换极限的脉冲有着几乎完全相同的时域形状,脉冲宽度相差不大,说明自相似脉冲的积累的啁啾基本是线性的。

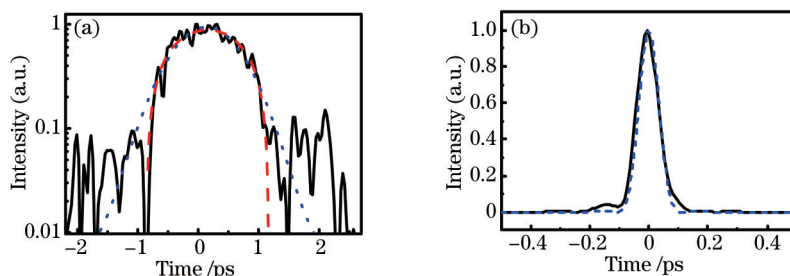


图 7 (a) 直接输出脉冲的 PICASO 还原脉冲形状(黑色实线),以及抛物线拟合(红色虚线)和高斯拟合(蓝色点线);

(b) 实验的去啁啾脉冲的 PICASO 还原脉冲形状(实线)和变换极限脉冲形状(虚线)

Fig.7 (a) Pulse shape retrieved by PICASO algorithm (black solid), parabolic fitting (red dashed) and Gaussian fitting (blue dotted) respectively; (b) dechirped pulse shape retrieved by PICASO algorithm (black solid) and transmitted limited pulse (blue dashed)

4 结 论

使用双包层 LMA-PCF,利用 NPE 锁模,可以在全正色散域内实现自相似演化。在时域上和频域上分别获得具有抛物线形的脉冲和光谱,同时输出的脉冲具有线性啁啾,经压缩后脉宽接近变换极限。数值模拟和实验均表明:窄带滤波器在形成自相似演化中发挥着极其重要的作用,腔内的光栅窄带滤波器既提供了全正色散锁模的耗散机制又促进了放大自相似的演化进程。

实验获得了最大功率为 5 W,单脉冲能量为 69 nJ,重复频率为 72 MHz 的脉冲输出,其直接输出脉宽为 1.699 ps,在腔外光栅对压缩后脉宽为 84 fs,达到了实验的预期效果。受到抽运源的最高输出功率的限制,激光器的输出功率难以进一步提高,将来通过更换抽运源,相信可以获得更高的输出功率和单脉冲能量。当抽运功率足够高的时候,自相似演化最终会受到增益带宽的影响。总的来说,实验中获得的线性啁啾自相似脉冲在输出能量增加的同时避免了光波分裂,从而获得了高能量、腔外压缩接近于变换极限的脉冲。

参 考 文 献

1 Wang Sijia, Gu Chenglin, Liu Bowen, *et al.*. Fast self-similar amplification through passive nonlinear pulse pre-shaping[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 140601.

- 王思佳, 顾澄琳, 刘博文, 等. 利用非线性脉冲预整形实现脉冲快速自相似放大[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 140601.
- 2 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, *et al.*. Recent progress of high-power fiber lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 135-138.
- 楼祺洪, 周 军, 朱健强, 等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 135-138.
- 3 Zhang Dapeng, Hu Minglie, Xie Chen, *et al.*. A high power photonic crystal fiber laser oscillator based on nonlinear polarization rotation mode-locking[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(4): 044206.
- 张大鹏, 胡明列, 谢 辰, 等. 基于非线性偏振旋转锁模的高功率光子晶体光纤飞秒激光振荡器[J]. 物理学报, 2012, 61(4): 044206.
- 4 Knight J C. Photonic crystal fibers and fiber lasers (invited)[J]. JOSA B, 2007, 24(8): 1661-1668.
- 5 Baumgartl M, Ortac B, Schreiber T, *et al.*. Ultrashort pulse formation and evolution in mode-locked fiber lasers[J]. Appl Phys B, 2011, 104(3): 523-536.
- 6 Anderson D, Desaix M, Lisak M, *et al.*. Wave breaking in nonlinear-optical fibers[J]. JOSA B, 1992, 9(8): 1358-1361.
- 7 Fermann M E, Kruglov V I, Thomsen B C, *et al.*. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers[J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(26): 6010-6013.
- 8 Wise F W, Chong A, Renninger W H. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion[J]. Laser & Photon Rev, 2008, 2(1-2): 58-73.
- 9 Ilday F Ö, Buckley J R, Clark W G, *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser[J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(21): 213902.
- 10 Buckley J R, Wise F W, Ilday F Ö, *et al.*. Femtosecond fiber lasers with pulse energies above 10 nJ[J]. Opt Lett, 2005, 30(14): 1888-1890.
- 11 Renninger W H, Chong A, Wise F W. Self-similar pulse evolution in an all-normal-dispersion laser[J]. Phys Rev A, 2010, 82(2): 0218051.
- 12 Oktem B, Ulgudur C, Ilday F Ö. Soliton-similariton fibre laser[J]. Nat Photon, 2010, 4(5): 307-311.
- 13 Renninger W H, Chong A D, Wise F W. Amplifier similaritons in a dispersion-mapped fiber laser (invited)[J]. Opt Express, 2011, 19(23): 22496-22501.
- 14 Renninger W H, Chong A, Wise F W. Pulse shaping and evolution in normal-dispersion mode-locked fiber lasers[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2012, 18(1): 389-398.
- 15 Lefrancois S, Liu C H, Stock M L, *et al.*. High-energy similariton fiber laser using chirally coupled core fiber[J]. Opt Lett, 2013, 38(1): 43-45.
- 16 Shi Junkai, Chai Lu, Zhao Xiaowei, *et al.*. Generation of 34 W high power femtosecond pulses by single-stage direct amplification in an all-photonic-crystal-fiber laser system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0202001.
- 石俊凯, 柴 路, 赵晓薇, 等. 全光子晶体光纤单级直接放大产生 34 W 高功率飞秒脉冲[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202001.
- 17 Xu Runqin, Li Kexuan, Fang Xiaohui, *et al.*. All normal-dispersion Yb-doped mode-locked fiber laser and amplifier[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091401.
- 徐润亲, 李克轩, 方晓慧, 等. 全正色散掺镱锁模光纤激光器及放大器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091401.
- 18 Huang Long, Shi Chen, Wang Xiaolin, *et al.*. 100 W level all-fiber linear-polarization laser oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0402005.
- 黄 龙, 史 尘, 王小林, 等. 百瓦级全光纤线偏振激光振荡器[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0402005.
- 19 Tovar A A, Casperson L W. Generalized beam matrices.IV.optical system design[J]. JOSA B, 1997, 14(14): 882-894.

栏目编辑: 宋梅梅