

基于 10 m 光子晶体光纤的放大自相似锁模振荡器研究

石俊凯 柴路 赵晓薇 刘博文 胡明列 栗岩锋 王清月

Amplifier similariton oscillator using 10 m photonic crystal fiber

Shi Jun-Kai Chai Lu Zhao Xiao-Wei Liu Bo-Wen Hu Ming-Lie Li Yan-Feng Wang Qing-Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 184210 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.184210

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

石墨烯被动锁模全正色散掺镜光纤激光器中的暗脉冲及其谐波

Dark pulses and harmonic mode locking in graphene-based passively mode-locked Yb^{3+} -doped fiber laser with all-normal dispersion cavity

物理学报.2015, 64(19): 194205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194205>

国产光纤实现直接抽运全光纤化 3000 W 级激光输出

3000 W direct-pumping all-fiber laser based on domestically produced fiber

物理学报.2015, 64(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164204>

高速线性光采样用被动锁模光纤激光器重复频率优化

Repetition rate optimization of passively mode-locked fiber laser for high-speed linear optical sampling

物理学报.2015, 64(13): 134206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134206>

303MHz 高重复频率掺 Er 光纤飞秒激光器

A 303 MHz fundamental repetition rate femtosecond Er: fiber ring laser

物理学报.2015, 64(11): 114210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114210>

覆盖可见光波长的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳

Er-fiber femtosecond optical frequency comb covering visible light

物理学报.2015, 64(9): 094204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094204>

基于10 m光子晶体光纤的放大大自相似锁模振荡器研究*

石俊凯 柴路[†] 赵晓薇 刘博文 胡明列 栗岩锋 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 超快激光研究室, 天津 300072)

(2015年4月6日收到; 2015年4月23日收到修改稿)

基于单根10 m大模场面积保偏光子晶体光纤, 搭建了带有色散图的放大大自相似振荡器; 通过仔细调节腔内色散量的大小以及位于色散补偿端的端镜前的狭缝位置和大小, 实现了稳定的锁模运转, 获得了抛物线形脉冲输出. 输出脉冲的重复频率为8.6 MHz, 脉冲宽度为6.2 ps, 光谱宽度为3.84 nm, 平均功率820 mW, 对应单脉冲能量95 nJ. 这是第一次在自相似振荡器中直接获得重复频率在10 MHz以下的脉冲输出, 95 nJ也是目前自相似振荡器直接输出的最高脉冲能量. 通过数值模拟证实了在第一个光栅的零级反射处和狭缝滤波后可以分别实现抛物线型脉冲和高斯脉冲的两种锁模脉冲输出.

关键词: 大模场面积光子晶体光纤, 自相似演化, 放大大自相似, 色散图

PACS: 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.60.Lh, 42.79.Dj

DOI: 10.7498/aps.64.184210

1 引言

飞秒激光具有窄脉冲宽度、高峰值功率、宽光谱等特点, 被广泛应用于军事国防、信息通信、微纳加工等重要的前沿领域. 除了脉冲宽度和峰值功率之外, 不同的应用领域对脉冲的重复频率也有不同的要求. 其中在微纳加工领域, 理想光源的重复频率在10 MHz以下, 超过10 MHz会产生不利的等离子体屏蔽效应^[1]. 无论是基于块状晶体还是光纤的锁模激光器, 其重复频率一般都在数十或上百MHz, 需要使用调制器降低重复频率. 这种方法既引入能量损耗, 又增加了系统的复杂性. 降低重复频率最有效的方法就是增加腔长^[2]. 对于传统的块状晶体锁模激光器, 一般采用多通结构来构建长腔^[3]. 而光纤的波导结构使其在增加腔长方面具有天然优势^[4,5]. 以低重频的振荡器作为放大系统的种子源, 可直接满足微纳加工对重复频率的要求.

此外, 微纳加工需要高平均功率和高脉冲能量, 因此脉冲放大过程必不可少. 目前最常用的光纤放大技术是啁啾脉冲放大^[6], 但其获得的脉冲较宽, 限制了应用范围. 若采用不经展宽的直接放大, 其高峰值功率会引起大量的非线性相位积累, 从而导致脉冲发生畸变, 需要额外的脉冲整形装置优化脉冲形状^[7]. 而基于自相似演化的自相似放大, 种子脉冲在放大过程中会演化成抛物线形脉冲. 这种形状的脉冲在放大过程中只产生可补偿的线性啁啾, 可支持更窄的脉宽和更高的峰值功率^[8]. 根据自相似理论^[9], 自相似演化是一个渐进过程, 其演化速率取决于输出脉冲的时域宽度和波形^[10], 通常需要足够长的增益光纤以完成自相似演化过程. 但是过长的增益光纤在放大过程中可能会引起受激拉曼散射, 限制了输出的脉冲能量^[11]. 因此, 如果振荡器直接输入抛物线形脉冲作为种子脉冲, 则上述问题将迎刃而解.

2004年, Ilday等^[12]首次在光纤激光器腔内实

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327604, 2011CB808101, 2014CB339800)、国家自然科学基金 (批准号: 61377041, 61322502, 61377047, 61027013) 和长江学者和创新团队发展计划 (批准号: IRT13033) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lu_chai@tju.edu.cn

现自相似运转. 激光器由一段长 23 cm 的掺 Yb 光纤提供增益, 由光栅对提供色散补偿, 腔内净色散量为正; 脉冲在一段 6 m 的普通单模光纤中完成自相似演化, 最终实现抛物线型脉冲输出. 2010 年, Oktem 等^[13]在掺 Er 光纤的激光器中实现自相似子与孤子两种形状的脉冲输出. 该激光器由一段具有负群速度色散 (group velocity dispersion, GVD) 的无源单模光纤提供色散补偿, 腔内净色散量为正; 脉冲在增益光纤中完成自相似演化, 并在腔内引入 12 nm 的带宽滤波器以减少自相似演化过程中积累的线性啁啾; 随后脉冲在具有负 GVD 的无源光纤中演化成孤子脉冲. 这也是首次在光纤激光器内的增益光纤中实现自相似演化. 近几年, 人们对自相似锁模做了大量理论^[14,15]和实验研究^[16-19]. 2011 年, Renninger 等^[17]通过理论模拟和实验验证, 发现一种全新的工作在大的净负色散区的锁模状态, 即带有色散图的放大大自相似 (dispersion-mapped amplifier similariton, DMAS). 在该色散域, DMAS 激光器可以获得比孤子运转激光器更高的脉冲能量.

基于上述微纳加工对脉冲重复频率和振荡级直接输出抛物线形种子脉冲的需求, 本文搭建了基于 10 m 单根保偏大模场面积 (large-mode-area, LMA) 光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 的 DMAS 激光器, 将重复频率降低到了 8.6 MHz, 又通过模拟分析确定了合适的输出位置, 获得了自相似输出. 该激光器采用线形腔结构, 启动和维持锁模采用半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM), 降低了激光器对环境的敏感度. 最后获得了直接输出 95 nJ 的单脉冲能量, 优于此前的最高结果 61 nJ^[19].

2 实验装置

激光器结构如图 1 所示. 其中增益光纤为 NKT 公司生产的掺镱双包层 (double-clad, DC) 保偏 LMA-PCF, 模场直径为 29 μm , 长 10 m. 光纤两端塌陷后研磨成 8° 角以避免发生自激. 在色散补偿臂的端镜前引入一个可调谐狭缝, 可通过调节平移台来调节激光运转的波长, 并在腔内引入一定的耗散作用. 本实验中采用的 SESAM 的中心波长为 1060 nm, 最大调制深度 40%, 弛豫时间 500 fs. 其余器件及参数在文献^[20]中已进行了描

述. SESAM 前面的半波片和偏振分束器起到提高腔内激光的偏振度的作用. 以第一个光栅的零级反射作为输出, 调节光栅前的半波片使输出功率达到最高.

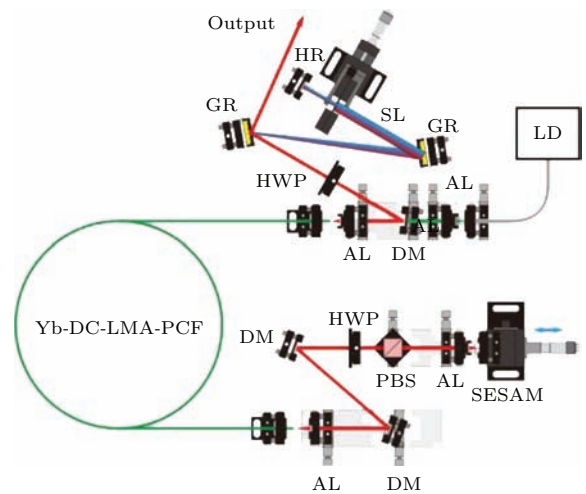


图 1 (网刊彩色) 实验装置图 AL, 非球面镜; DM, 双色镜; PBS, 偏振分束镜; HWP, 半波片; GR, 光栅; HR, 全反镜; SL, 狭缝

Fig. 1. (color online) Experimental setup: AL, aspheric lens; DM, dichroic mirror; PBS, polarization beam splitter; HWP, half-wave plate; GR, grating; HR, high-reflectivity mirror; SL, slit.

3 实验结果

由于脉冲的自相似演化是在光纤中传输时实现的, 演化过程中频域和时域同时得到展宽, 再经过滤波回到演化的初始状态^[13,16]. 本实验装置中, 在经过狭缝处, 以及经过光栅对后携带负啁啾的脉冲进入增益光纤传输直至负啁啾被完全补偿掉这一过程有滤波效果, 该过程属于孤子特征色散域. 而脉冲在增益光纤中转变为正啁啾后, 其在正 GVD 域中传输, 属于自相似演变过程. 因此, 在光纤的激光脉冲耦合端进入到负色散补偿之前最有可能实现自相似输出, 故选取第一个光栅的零级反射作为输出.

在未加狭缝时, 激光器输出的中心波长在 1082 nm 左右. 实验中采用的 SESAM 的调制深度在 1060 nm 处达到最大, 为 40%; 而在 1082 nm 处, 该 SESAM 的调制深度不足以启动锁模. 因此, 我们在色散补偿一臂的端镜前引入狭缝, 通过平移狭缝将激光波长向短波方向调节, 以适应 SESAM 工作的最佳中心波长; 同时狭缝还起到一定的耗散作用, 减小非线性积累, 提高了锁模运转的稳定性.

当激光波长蓝移至 1074 nm 时, 激光器实现了锁模运转. 通过反复调节光栅对的距离发现, 当腔内负色散补偿量不足时, 激光器进入多脉冲锁模状态; 而当负色散补偿量过大时, 激光器的稳定性下降, 通过示波器观察的脉冲序列发生抖动的现象. 最后选取光栅对提供色散补偿量 -1.37 ps^2 . 而光纤的材料色散 (往返两次) 共计 0.48 ps^2 , 腔内净色散量为 -0.89 ps^2 , 该激光器获得了稳定的单脉冲锁模输出. 因此, 该激光器运转是在较大净负色散域.

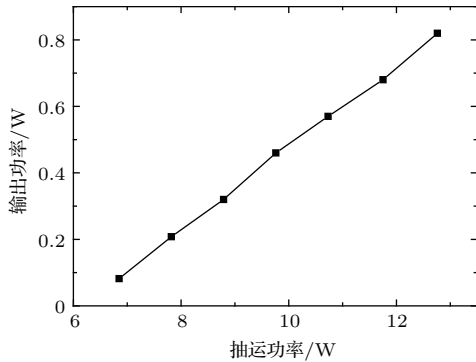


图2 激光器斜效率曲线

Fig. 2. Output power as a function of pump power.

图2为该激光器单脉冲锁模运转时的斜效率曲线. 当抽运功率低于锁模阈值时, 激光器处在连续运转状态; 当抽运功率增加到 6.8 W 时, 激光器进入锁模状态, 此时输出功率为 82 mW; 随着抽运功率的增加, 输出功率线性上升; 抽运功率为 12.8 W 时, 获得最高输出功率 820 mW; 继续增加抽运功率, 锁模进入多脉冲状态. 图3(a)和图3(b)分别为不同抽运功率下输出脉冲的自相关和光谱曲线. 当抽运功率为 6.8 W 时, 输出脉冲时域和谱域宽度分别为 3.7 ps 和 3.26 nm; 随着抽运功率的增加, 光纤内的非线性效应增强, 脉冲和光谱的宽度也随之增加; 当抽运功率达到 12.8 W 时, 此时脉冲和光谱的宽度分别为 6.1 ps 和 3.84 nm. 由于时域上测量的自相关曲线并不能直观地体现脉冲形状, 因此我们通过光谱的形状来判定激光器运转的状态. 由于激光器工作在大的负色散域, 该色散域的典型锁模状态为孤子锁模, 应具有双曲正割形光谱, 并且前后两沿伴有锐利边带^[21]. 图3(c)为激光器输出脉冲能量最高时对数坐标下的光谱, 从中可以看到, 光谱的两沿为平滑曲线, 并没有锐

利边带, 而且相比于双曲正割曲线更加陡峭, 明显区别于孤子锁模的情况. 因此, 该激光器是工作在一种不同于孤子锁模的锁模域, 即 DMAS 锁模状态^[17]. 图4为该激光器输出的脉冲序列和一次谐波射频谱, 可以看出, 该激光器输出的重复频率为 8.6 MHz, 激光器的信噪比为 62 dB. 在最高单脉冲锁模输出功率下, 对应最高的单脉冲能量为 95 nJ, 这是目前自相似振荡器直接输出的最好结果.

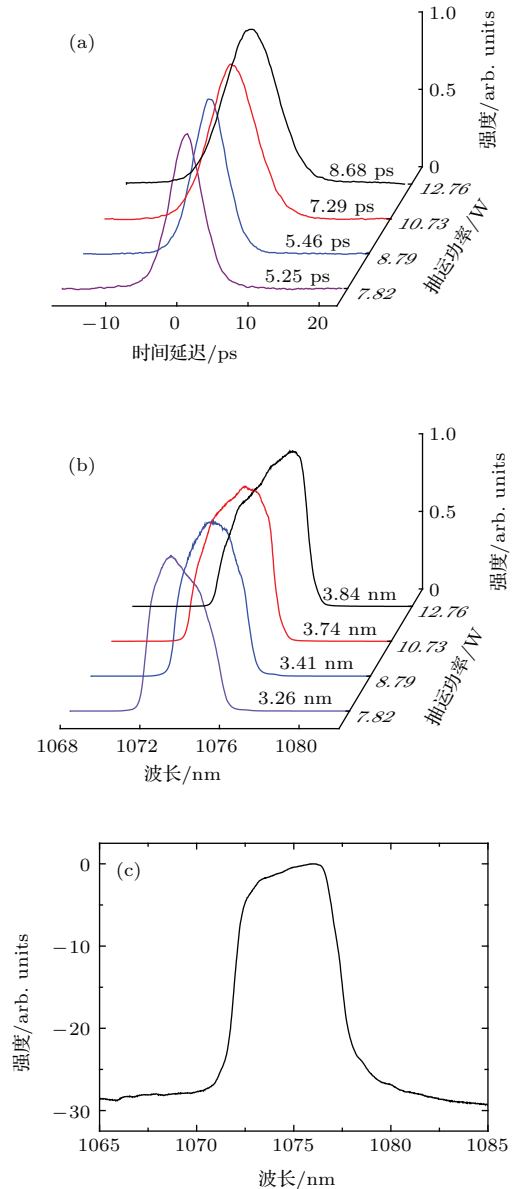


图3 (网刊彩色) 不同抽运功率下的 (a) 自相关曲线和 (b) 功率谱, (c) 为输出最高脉冲能量对应的对数坐标下的光谱

Fig. 3. (color online) (a) Autocorrelations and (b) power spectra at different pump power, (c) spectra on log scale corresponding to max output pulse energy.

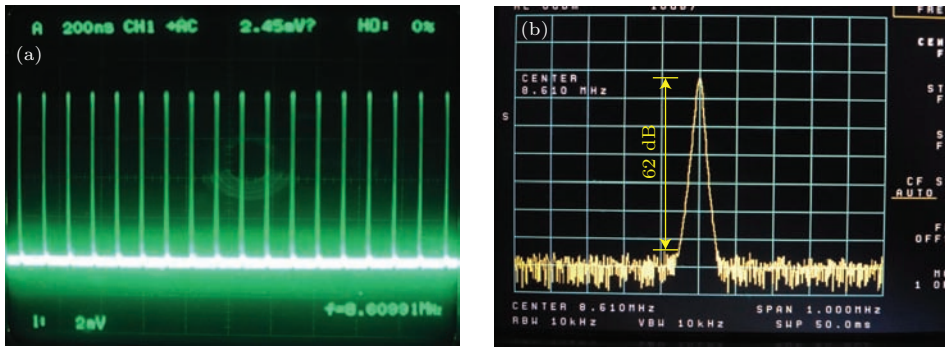


图4 (网刊彩色) 在抽运功率 12.76 W 下的 (a) 脉冲序列和 (b) 一次谐波射频谱
 Fig. 4. (color online) (a) Measured pulse train and (b) its radio frequency spectrum under pump power of 12.76 W.

4 模拟结果

为了说明该激光器的DMAS锁模的动力学过程, 了解其中每个阶段的脉冲演变特征, 我们采用对称分步傅里叶法求解非线性薛定谔方程, 建立数值模型^[22]. 模拟参数选取实验参数, 其中光纤参数 $\beta_2 = 0.024 \text{ ps}^2/\text{m}$, $\gamma = 9.1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 滤波器设定为带宽 2 nm 的方波滤谱. 为了判定脉冲是否为抛物线型, 选取 M 因子作为衡量标准^[23]; 当

M 值约等于 0.04 时, 即可认为脉冲为抛物线型. 模拟结果表示在图 5 中. 其中, 图 5 (a) 和图 5 (b) 分别为激光器腔内脉冲携带的啁啾量和 M 因子在单个腔周期内的演化过程. 啁啾量是表现色散图对脉冲在腔内演化过程影响的参数. 由图 5 (a) 可知: 在进入 PCF-1 (同向抽运) 阶段时, 脉冲携带负啁啾, 但在光纤中传输一小段距离后啁啾符号突变为正号, 其原因可由非线性吸引子效应来解释^[17]. 对应图 5 (b), 在该过程中脉冲的 M 因子由 0.14 快速降

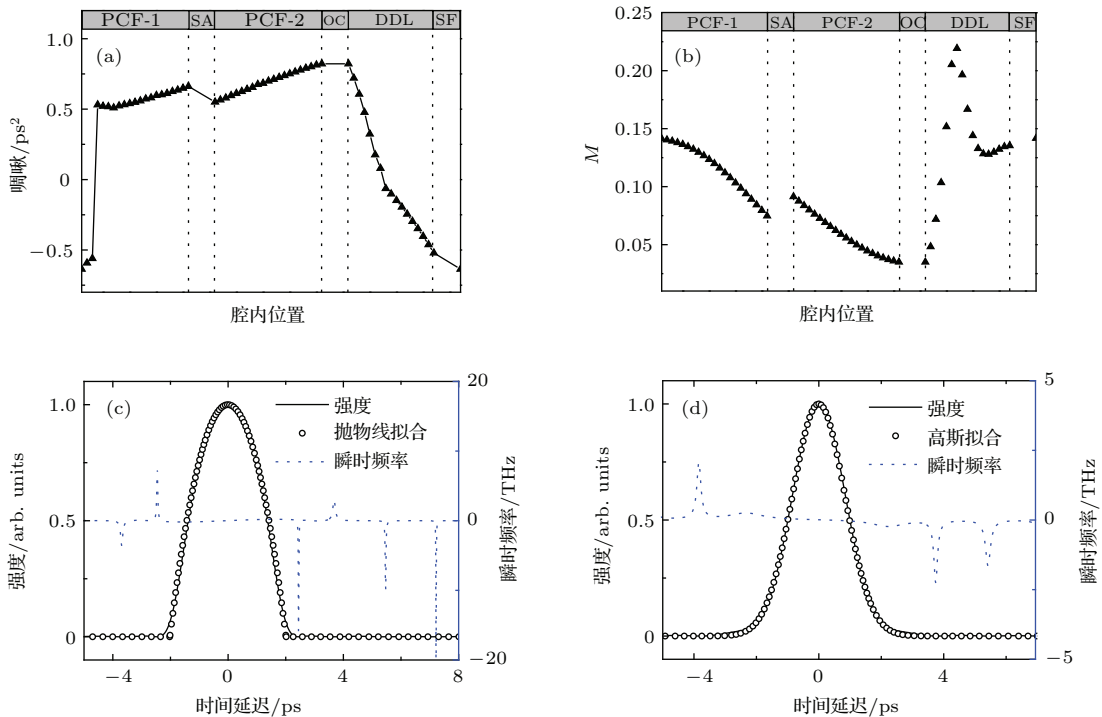


图5 数值模拟结果 (a) 脉冲啁啾与 (b) M 因子在腔内演化过程 (SA, 饱和吸收体; OC, 耦合输出; DDL, 色散延迟线; SF, 光谱滤波); (c) 输出和 (d) 滤波后的脉冲曲线

Fig. 5. The numerical simulated results: the evolution of (a) the M parameter and (b) pulse chirp in the cavity (SA, saturable absorber; OC, output coupler; DDL, dispersion delay line; SF, spectrum filter); the simulated pulse intensity (c) at the output and (b) after filter.

低到0.075; 进入SESAM阶段, 由于SESAM滤波效应, 脉冲啁啾量有所下降, M 因子增加到0.09; 然后进入PCF-2 (逆向抽运) 阶段, 脉冲啁啾逐渐增加, 同时在增益和色散的共同作用下, M 因子逐渐降低; 在输出位置, M 因子为0.035, 形状与抛物线型脉冲拟合得很好 (见图5(c)), 从而说明在此阶段已经实现了脉冲的自相似演化和输出; 在进入色散补偿阶段后, 脉冲的啁啾量迅速降低, M 因子快速增大; 而过补偿后负啁啾量增加, M 因子随之下降并趋于稳定; 再经狭缝滤波后, M 因子为0.14, 此时的脉冲形状与高斯脉冲拟合的很好 (见图5(d)). 根据模拟结果, 激光器在第一个光栅的零级反射处和狭缝滤波后可以分别实现抛物线型脉冲和高斯脉冲的两种锁模脉冲输出.

5 总结

搭建了基于单根10 m长、LMA-PCF的DMAS锁模激光振荡器; 采用SESAM与狭缝滤波结合的启动和稳定锁模的方式, 并调整激光输出为光栅的零级反射处, 最终实现了重复频率8.6 MHz, 脉冲宽度6.2 ps的自相似脉冲输出; 最高平均功率为820 mW, 对应的单脉冲能量为95 nJ. 并通过数值模拟研究了该激光器中脉冲在各个阶段的演变特征, 证实了脉冲在增益光纤中完成了自相似演化. 据我们所知, 这是第一次在自相似振荡器中直接获得重复频率在10 MHz以下的脉冲输出, 95 nJ也是目前自相似振荡器直接输出的最高脉冲能量. 该激光器可以作为微纳加工应用的高功率激光自相似放大系统的理想种子源.

参考文献

- [1] Fermann M E, Hartl I 2013 *Nature Photon.* **7** 868
- [2] Killi A, Dörring J, Morgner U, Lederer M J, Frei J, Kopf D 2005 *Opt. Express* **13** 061916
- [3] Cho S H, Bouma B E, Ippen E P, Fujimoto J G 1999 *Opt. Lett.* **24** 06417
- [4] Yang J H, Guo C Y, Ruan S C, Ouyang D Q, Lin H Q, Wu Y M 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 024208
- [5] Luo Z C, Lin Z B, Li J Y, Zhu P F, Ning Q Y, Xing X B, Luo A P, Xu W C 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064203
- [6] Želudevičius J, Danilevičius R, Viskontas K, Rusteika N, Regelskis K 2013 *Opt. Express* **21** 055338
- [7] Yao Y H, Lu C H, Xu S W, Ding J X, Jia T Q, Zhang S A, Sun Z R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 184201 (in Chinese) [姚云华, 卢晨晖, 徐淑武, 丁晶新, 贾天卿, 张诗按, 孙真荣 2014 物理学报 **63** 184201]
- [8] Huang Z Y, Leng Y X, Dai Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 124210
- [9] Fermann M E, Kruglov V I, Thomsen B C, Dudley J M, Harvey J D 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 266010
- [10] Kruglov V I, Peacock A C, Harvey J D, Dudley J M 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 03461
- [11] Chang G, Galvanauskas A, Winful H G, Norris T B 2004 *Opt. Lett.* **29** 222647
- [12] Ilday F Ö, Buckley J R, Clark W G, Wise F W 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 213902
- [13] Oktem B, Ülgüdür C, Ilday F Ö 2010 *Nature Photon.* **4** 307
- [14] Bale B G, Wabnitz S 2010 *Opt. Lett.* **35** 142466
- [15] Boscolo S, Turitsyn S K, Finot C 2012 *Opt. Lett.* **37** 214531
- [16] Renninger W H, Chong A, Wise F W 2010 *Phys. Rev. A* **82** 021805
- [17] Renninger W H, Chong A, Wise F W 2011 *Opt. Express* **19** 2322496
- [18] Nie B, Pestov D, Wise F W, Dantus M 2011 *Opt. Express* **19** 1312074
- [19] Lefrancois S, Liu C, Stock M L, Sosnowski T S, Galvanauskas A, Wise F W 2013 *Opt. Lett.* **38** 0143
- [20] Shi J K, Chai L, Zhao X W, Li J, Liu B W, Hu M L, Li Y F, Wang Q Y 2014 *Chin. J. Laser* **41** 0202001 (in Chinese) [石俊凯, 柴路, 赵晓薇, 李江, 刘博文, 胡明列, 栗岩锋, 王清月 2014 中国激光 **41** 0202001]
- [21] Kelly S M J 1992 *Electron. Lett.* **28** 806
- [22] Agrawal G P 2007 *Nonlinear Fiber Optics (4th Ed.)* (New York: Academic Press) pp41–45
- [23] Finot C, Parmigiani F, Petropoulos P, Richardson D J 2006 *Opt. Express* **14** 083161

Amplifier similariton oscillator using 10 m photonic crystal fiber*

Shi Jun-Kai Chai Lu[†] Zhao Xiao-Wei Liu Bo-Wen Hu Ming-Lie
Li Yan-Feng Wang Qing-Yue

(Ultrafast Laser Laboratory, Key Laboratory of Optoelectronics Information Technique, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 6 April 2015; revised manuscript received 23 April 2015)

Abstract

Ultrashort pulse laser with a repetition rate of below 10 MHz is suitable for a variety of micromachining applications to avoid plasma shielding effects. Besides, the parabolic pulse possesses clean wings, short pulse duration, and large peak power because only the linear chirp is accumulated during the propagation. Based on these two points, a similariton oscillator with a repetition rate of below 10 MHz is a most perfect seed source of an amplification system for micromachining. In this paper, an amplifier similariton oscillator with dispersion map based on a piece of 10 m Yb-doped large-mode-area single-polarization photonic crystal fiber is demonstrated. The semiconductor saturable absorber mirror is employed in the linear cavity as an end mirror to initiate and maintain the mode-locking operation. An adjustable slit is adopted between the end mirror and grating pair in another arm, as a central wavelength adjuster and the spectral filter to ensure the laser operational wavelength in accordance with the working wavelength of semiconductor saturable absorber mirror and the stability of mode-locking operation. The stable single-pulse mode-locking operation can be achieved by adjusting the intracavity dispersion and the operating wavelength. With the net cavity dispersion of -0.89 ps^2 , a spectrum with steep and smooth edges is obtained, which means that the laser does not operate in the soliton regime but in the dispersion-mapped amplifier similariton regime. A highest output power of 820 mW is obtained with a pulse duration of 6.2 ps and spectral width of 3.84 nm under a pump power of 12.8 W. The repetition rate is 8.6 MHz, corresponding to a pulse energy of 95 nJ. It is the first time that the similariton with a repetition rate of lower than 10 MHz and a highest pulse energy of 95 nJ from a similariton laser has been achieved, to the best of our knowledge. Numerical simulation results confirm that the self-similar evolution is achieved in the gain fiber, and the parabolic- and gauss-shaped pulse can be emitted at the zero-order reflection of the grating and after the slit, respectively.

Keywords: large-mode-area photonic crystal fiber, self-similar evolution, amplifier similariton, dispersion-map

PACS: 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.60.Lh, 42.79.Dj

DOI: 10.7498/aps.64.184210

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2010CB327604, 2011CB808101, 2014CB339800), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61377041, 61322502, 61377047, 61027013), and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University, China (Grant No. IRT13033).

[†] Corresponding author. E-mail: lu_chai@tju.edu.cn