

利用非线性脉冲预整形实现脉冲快速自相似放大*

王思佳 顾澄琳 刘博文[†] 宋有建 钱程 胡明列 柴路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2013年1月15日收到; 2013年3月27日收到修改稿)

报道了一种通过预先对信号光脉冲非线性整形, 进而在光纤放大器中实现自相似演化的方法. 利用透射光栅和普通单模光纤组成被动脉冲整形装置, 预先优化脉冲的时域宽度和光谱质量, 使脉冲在光纤放大器中快速演化到自相似子. 研究中首先通过数值模拟对比, 说明了非线性整形对脉冲实现快速自相似放大的关键作用, 提高了放大器输出脉冲质量, 减小了去啁啾脉冲宽度. 实验中, 通过优化非线性整形输出, 在 2.2 m 长的掺 Yb^{3+} 光纤中, 在一定抽运功率范围内均实现了脉冲自相似放大, 去啁啾后得到脉冲宽度 60 fs 的变换极限脉冲输出. 这种非线性脉冲预整形方法有效减小了自相似演化所需光纤长度, 同时降低了自相似放大对种子源质量的要求, 首次将全正色散光纤锁模激光器成功用于自相似放大, 促进了当前自相似放大系统的全光纤化.

关键词: 非线性整形, 光纤放大器, 自相似放大, 飞秒激光

PACS: 06.60.Jn, 42.55.Wd, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.62.140601

1 引言

光纤飞秒激光系统具有结构简单、集成度高、稳定性好、成本低和易操作等优点, 能够满足众多应用领域需求, 如非线性光学、精密测量等. 除此之外, 光纤带来的近衍射极限分辨率, 使光纤飞秒激光技术成为高速高精度材料加工、生物医学成像、组织处理以及纳米诊断等研究中的重要工具^[1]. 掺 Yb^{3+} 光纤抽运效率高、增益大、发射谱宽、热效应小^[2], 在输出高平均功率上具有得天独厚的优势, 但在获得高能量和窄脉冲方面仍然落后于传统固体飞秒激光技术. 为提高光纤飞秒激光器输出指标, 目前主要有啁啾脉冲放大和非线性放大两种技术手段^[3]. 为提高输出脉冲能量, 大多采用啁啾脉冲放大结构, 但是受限于放大器有限的增益带宽, 啁啾脉冲放大通常不能获得小于 100 fs 的脉冲宽度, 因而存在一定的局限性. 为减小输出脉冲宽度, 通常采用非线性放大结构, 利用放大过程中的自相位调制作用, 得到光谱宽度近 50 nm, 脉宽约 50 fs 的飞秒激光脉冲输出, 但是一般都带有不可

避免的非线性啁啾积累^[4]. 为克服这个缺点, 在非线性放大中引入了立方子 (cubicon)^[5] 和自相似子 (similariton)^[6] 的概念. 在立方子放大器中, 利用光纤展宽器和光栅对压缩器之间不匹配的三阶色散补偿放大过程中积累的非线性啁啾. 但是这种方法很难得到变换极限脉冲输出, 并且需要三阶色散和非线性啁啾之间的精确匹配^[7].

与立方子放大不同, 自相似放大只会积累线性啁啾, 保证放大脉冲的有效压缩, 得到脉宽 100 fs 左右的变换极限脉冲. 根据自相似理论^[8], 脉冲的自相似演化行为只由初始脉冲能量和放大器增益水平决定, 但是在增益水平一定的情况下, 其演化速度却受到脉冲时域宽度和形状的影响^[9]. 在早期的研究中, 为完成抛物线脉冲演化, 总是采用较长的增益光纤. 但是当增益光纤过长时, 脉冲会受到受激拉曼散射效应的影响, 自相似演化进程遭到破坏, 限制输出脉冲能量, 降低压缩后脉冲质量^[10]. 除脉冲时域参数之外, 脉冲自相似演化也与入射脉冲的光谱宽度和形状有关, 为此, 在早期的研究中通常采用输出脉冲光谱平滑、谱宽 2—3 nm 的固

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB808101, 2010CB327604)、国家自然科学基金 (批准号: 61227010, 61008015, 61078028) 和教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20100032120057) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: bwliu@tju.edu.cn

体飞秒激光器作为自相似放大的振荡级,降低了光纤系统的紧凑性. 由于放大器的增益水平和谱宽由反转粒子数分布决定^[11],对于确定的种子脉冲和增益光纤长度,只存在一个最佳的抽运功率,过高或过低都会使脉冲偏离自相似演化,降低输出脉冲质量^[4]. 因此,研究如何优化脉冲参数以降低脉冲演化对抽运功率的敏感程度,在短增益光纤中尽快实现自相似放大是十分必要的^[12,13].

本文提出一种被动的非线性脉冲整形方法,在放大前对振荡级输出脉冲进行时域和频域优化调整,加速脉冲在放大过程中的自相似演化进程. 非线性脉冲整形装置由一对透射光栅和一段普通单模光纤组成. 由光栅对为振荡级直接输出脉冲提供负啁啾,在单模光纤中的自相位调制效应和群速度色散的共同作用下,负啁啾脉冲在时域和频域同时得到压缩和整形^[14]. 通过调节光栅对提供的预啁啾量,不断优化单模光纤输出的脉冲时域宽度、光谱宽度和脉冲形状,在只有约 2 m 长的掺 Yb^{3+} 光纤中,在一定抽运功率范围内实现了自相似放大,去啁啾后输出脉宽约 60 fs 的变换极限脉冲. 同时,通过这种方法降低了自相似放大对振荡级输出脉冲质量的要求^[12],即使是输出具有光谱不对称、调制深及边沿陡峭等缺点的全正色散锁模光纤激

光器,也可以作为自相似放大的种子源,大大提高了当前自相似放大系统的结构紧凑性.

2 实验装置和数值模拟

图 1 为实验装置示意图,振荡级采用全正色散锁模掺 Yb^{3+} 光纤激光器,直接输出脉冲宽度 1 ps,光谱宽度 15 nm,中心波长 1040 nm,重复频率 48 MHz 的种子脉冲. 该脉冲可以被压缩至 140 fs (压缩后的脉冲自相关曲线和光谱如图 2(a) 和 (b) 中实线所示). 非线性脉冲整形装置由一对 1200 line/mm 的透射光栅和一段 1 m 长的普通单模光纤组成,放大级前脉冲平均功率为 60 mW. 放大级增益光纤为 2.2 m 长的单模偏振型双层掺 Yb^{3+} 光纤 (SM-PM-DC-Yb-fiber),纤芯直径 11 μm ,光纤内包层的蝴蝶结形应力元保证了光纤具有大于 17 dB 的偏振消光比. 增益光纤一端与单模光纤熔接 (熔接损耗约 1%),另一端塌陷并打磨成 8° 角,以防止端面反馈形成自激振荡. 放大器由最大功率 8 W 的 976 nm 波长半导体激光二极管后向抽运. 实验中两次通过 600 line/mm 的闪耀光栅对压缩放大后的脉冲,透过效率约 64%.

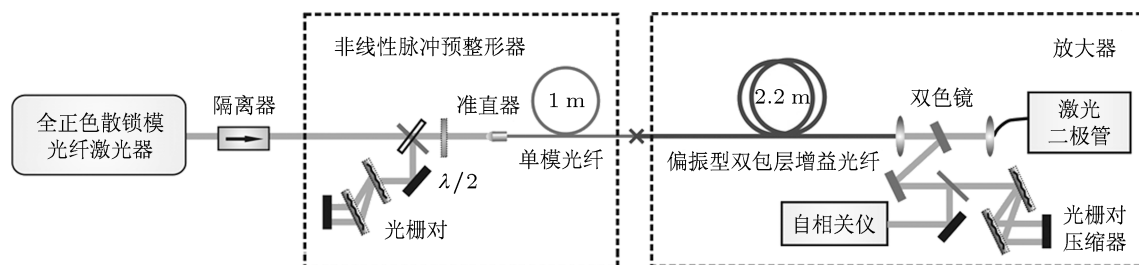


图 1 实验装置图

在非线性脉冲整形阶段,负啁啾脉冲在普通单模光纤中传输时,不仅在正群速度色散的作用下得到时域上的压缩,在自相位调制的作用下,脉冲的光谱宽度和形状也得到了压缩和调整. 通过预整形,对自相似演化速率影响最大的初始脉冲时域宽度得到了精确优化,保证在最短的增益光纤中实现自相似演化. 同时,由于脉冲光谱被压窄,有效地避免演化过程中脉冲光谱过早地超过增益带宽而影响输出脉冲质量^[10];此外,影响压缩脉冲质量的初始脉冲光谱调制也得到了有效抑制. 这两种频域优化处理,保证了自相似演化的完成,在放大过程中只引入线性啁啾,去啁啾后得到高质量的近变换极

限脉冲输出. 在实验中,最佳的预整形状态是通过监测压缩脉冲自相关曲线判定的,以得到最短的脉冲宽度和最小的脉冲基底为最佳.

首先,采用实验中测得的全正色散锁模激光器输出光谱(图 2(b) 中的实线)作为输入信号,模拟了脉冲在非线性脉冲整形阶段和放大器中的演化. 在数值计算中,首先给脉冲施加了与实验一致的预啁啾,将脉冲展宽至 1 ps,并带有负啁啾. 利用分步傅里叶算法求解非线性薛定谔方程,模拟脉冲在整形光纤和增益光纤中的自相位调制和群速度色散作用. 整形后的脉冲自相关曲线和光谱如图 2(a) 和 (b) 中的虚线所示,从图中可以看出,在整形光纤中

脉冲的频谱宽度和形状都得到明显地窄化和调整. 在放大器的模拟中, 采用均匀加宽的二能级系统速率方程和传输方程来描述放大器的增益, 模型中的吸收截面 $\sigma_{12}(\nu)$ 和发射截面 $\sigma_{21}(\nu)$ 取参考文献 [13] 中的数值. 最后采用光栅对压缩程序模拟对放大脉冲的去啁啾过程, 图 2(c) 和 (d) 分别为模拟所得去啁啾后的脉冲自相关曲线和光谱. 为确定非线性脉冲预整形对实现脉冲自相似放大的积极作用, 在脉冲宽度、脉冲能量和放大器参数相同的条件下, 模拟了直接输入未经非线性预整形的脉冲的

放大结果. 给振荡级输出脉冲施加正啁啾, 展宽至图 2(a) 虚线所示的脉冲宽度, 将此正啁啾脉冲直接放大, 在相同的抽运功率下, 放大脉冲去啁啾后的自相关曲线和光谱分别如图 2(c) 和 (d) 中实线所示. 对比可知, 经过非线性预整形优化的脉冲, 不仅可以得到更宽的放大光谱, 更窄的去啁啾脉冲宽度, 而且还可以得到更小的脉冲基底. 从上述数值模拟结果, 可以证明非线性脉冲预整形方法确实可以加速脉冲在下一级光纤放大器中的自相似演化.

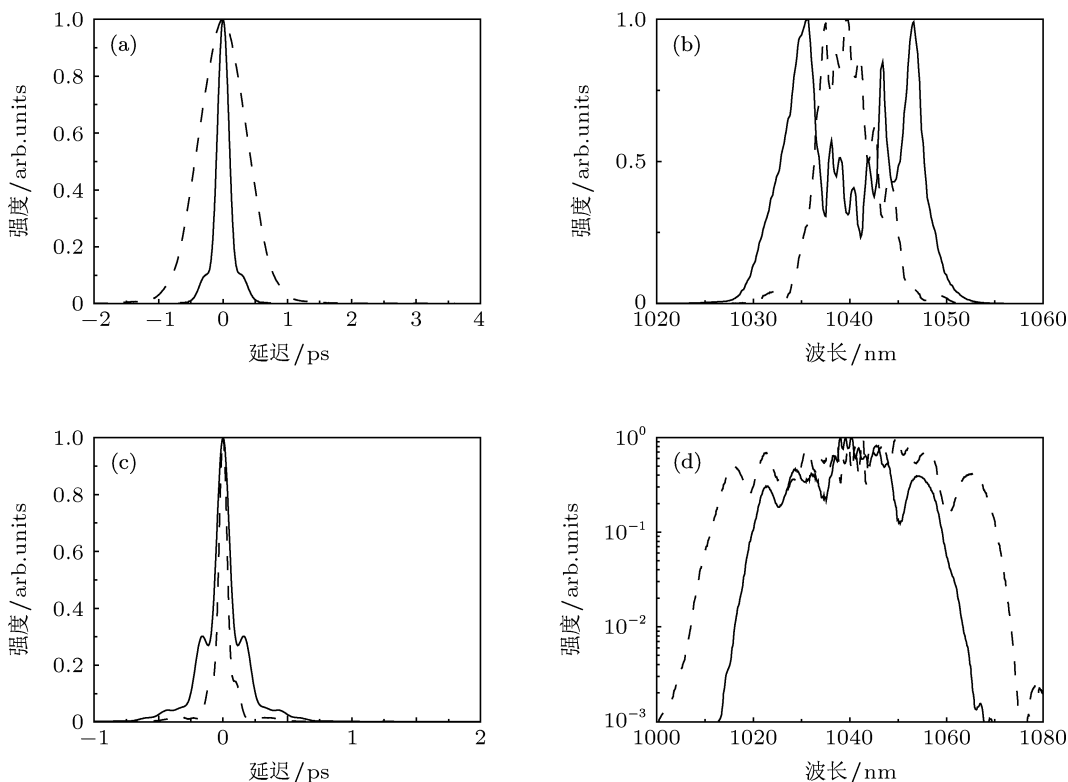


图 2 (a) 实验测量的振荡级输出脉冲去啁啾后的自相关曲线 (实线), 数值模拟的预啁啾脉冲经单模光纤传输后的自相关曲线 (虚线); (b) 实验测量的振荡级输出脉冲光谱 (实线), 数值模拟的预啁啾脉冲经单模光纤传输后的光谱 (虚线); (c) 数值模拟的经过非线性脉冲预整形优化的放大脉冲去啁啾自相关曲线 (虚线), 数值模拟的未经过脉冲预整形优化的放大脉冲去啁啾自相关曲线 (实线); (d) 数值模拟的经过非线性脉冲预整形优化的放大脉冲光谱 (虚线), 数值模拟的未经过脉冲预整形优化的放大脉冲光谱 (实线)

3 实验结果

根据模拟分析结果设计了实验, 通过优化预整形输出脉冲参数, 在一定的抽运功率范围内均实现了快速自相似脉冲演化.

从放大脉冲光谱随抽运功率的演化图 3(a) 中可以看出, 由于自相位调制效应的光谱展宽作用, 当抽运功率从 1 W 增加到 5 W 时, 输出脉冲光谱宽度单调增加, 对应的去啁啾脉冲宽度 (图 3(b)) 单调递减. 而当抽运功率高于 5 W 时, 由于增益窄化效应加强, 限制了输出光谱的展宽速度, 脉冲光谱和

压缩后脉冲宽度随着抽运功率的增加没有明显变化. 除此之外, 高抽运功率会带来偏向短波的增益中心 [13], 造成图 3(a) 中的脉冲放大光谱中心随抽运功率的增加而偏向短波. 当增益谱线中心与初始脉冲中心波长偏离较大时, 不可避免的增益整形作用劣化了输出脉冲质量, 使压缩后脉冲带有一定的基底.

在实验中, 根据抽运功率调整单模光纤前的光栅对提供的负啁啾量, 确保获得最佳的放大压缩脉冲质量. 尽管放大器的抽运功率是变化的, 但是经

过单模光纤对放大前脉冲的时域和频域的优化, 依然保证了脉冲可以快速地进入抛物线脉冲放大. 图 4(a)—(c) 为三种典型抽运功率下得到的去啁啾脉冲, 图中黑色实线为利用 PICASO 算法还原所得的脉冲时域形状, 为实验测得光谱施加零相位, 经傅里叶变换后得到相应的变换极限脉冲时域形状如图中红色虚线所示. 从图 4 可以看出, 当抽运功率从 3 W 增加到 7.6 W 时, 经 PICASO 算法还原的去啁啾脉冲与相应傅里叶变换极限脉冲有着几乎完全相同的时域形状, 说明脉冲放大过程中只引入了线性啁啾, 这是抛物线形脉冲放大的典型特点. 在实验中, 当抽运功率为 5 W 时, 脉冲得到了最有效的压缩, 获得了约 60 fs 无基底变换极限脉冲输出. 当抽运功率偏离 5 W 时, 与傅里叶变换极限脉冲相比, 压缩后脉冲具有少量基底.

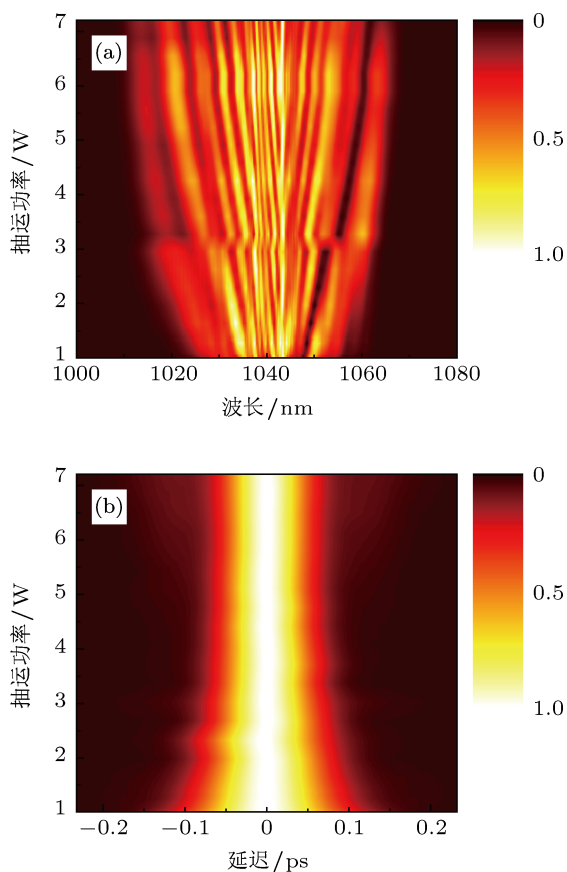


图 3 实验结果 (a) 放大脉冲光谱; (b) 去啁啾自相关曲线随抽运功率的演化

在非线性放大研究中, 常采用“Strehl ratio”^[15]来评价压缩后的时域脉冲质量, 当 Strehl ratio 值为 1 时, 表示输出傅里叶变换极限脉冲. 根据图 4 中的还原结果, 分别计算去啁啾脉冲的 Strehl ratio 值. 当抽运功率为 3 W (图 4(a)) 时, 算得脉冲的 Strehl ratio

值为 0.956, 当抽运功率增长到 5 W 时 (图 4(b)), 该值增长到 0.985, 这个增长反映了脉冲在增益光纤中的演化已经趋近于抛物线放大. 当抽运功率高达 7.6 W (图 4(c)) 时, Strehl ratio 值降低到 0.931, 此时放大器增益已经大于 20 dB, 此处 Strehl ratio 值的下降是因为由粒子数反转水平决定的增益谱形状对脉冲形状的破坏. 尽管如此, 在整个抽运功率范围内, Strehl ratio 都保持了大于 0.9 的数值, 表明了脉冲的抛物线放大过程, 说明了非线性脉冲预整形对于完成自相似放大演化, 获得变换极限去啁啾脉冲的重要作用.

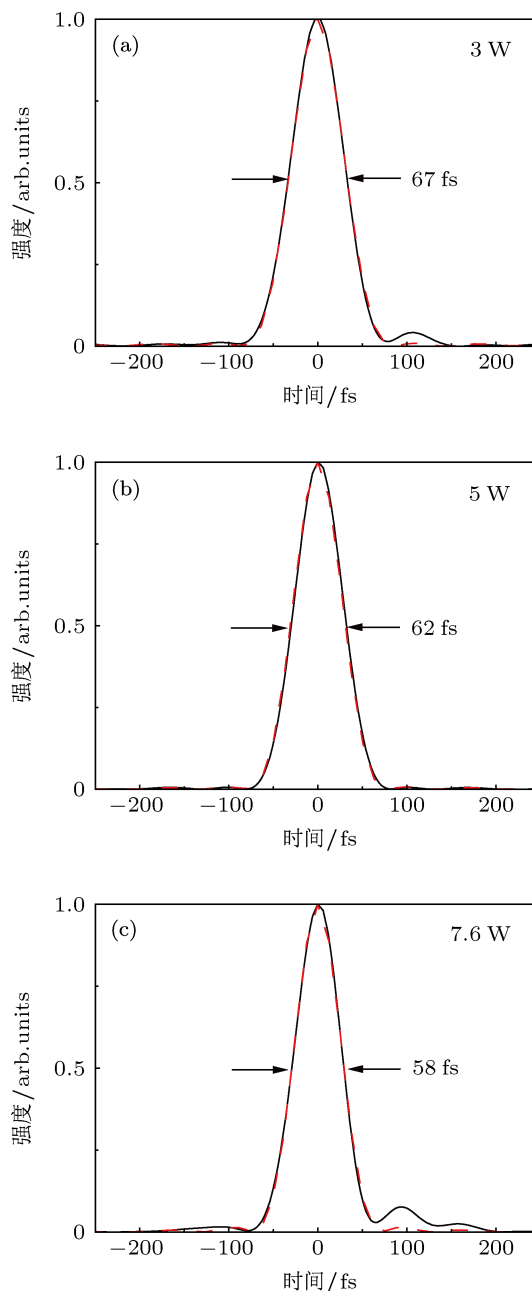


图 4 不同抽运功率下的去啁啾脉冲 PICASO 还原脉冲形状 (黑色实线) 和相应的变换极限脉冲形状 (红色虚线) (a) 3 W; (b) 5 W; (c) 7.6 W

4 结论

本文报道了一种优化初始脉冲参数获得自相似脉冲放大的非线性脉冲预整形方法. 利用正色散光纤中的自相位调制效应和群速度色散对负啁啾脉冲的整形作用, 通过调整光栅对间距, 种子脉冲时域宽度、光谱宽度和形状都得到了优化. 在约 2 m 长掺 Yb^{3+} 光纤中, 在 3—7.6 W 的抽运功率

下都实现了放大过程中色散、非线性和增益之间的平衡, 保证了线性啁啾自相似脉冲输出, 压缩后得到近 60 fs 的无基底变换极限脉冲. 利用这种非线性预整形方法, 只需提高增益光纤的模场面积^[16], 采用更高功率的抽运源, 就可以输出具有更高单脉冲能量和峰值功率的无基底变换极限飞秒激光脉冲.

- [1] Limpert J, Rser F, Schreiber T, Tünnermann A 2006 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **12** 233
- [2] Song Y J, Hu M L, Liu B W, Chai L, Wang Q Y, 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6425 (in Chinese) [宋有建, 胡明列, 刘博文, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 6425]
- [3] Liu B W, Hu M L, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6921 (in Chinese) [刘博文, 胡明列, 宋有建, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 6921]
- [4] Deng Y, Chien C, Fidiric G B, Kafka D J 2009 *Opt. Lett.* **34** 3469
- [5] Shah L, Liu Z, Hartl I, Imeshev G, Cho G, Fermann M 2005 *Opt. Express* **13** 4717
- [6] Zhou S, Kuznetsova L, Chong A, Wise F 2005 *Opt. Express* **13** 4869
- [7] Xie C, Liu B, Niu H, Song Y, Li Y, Hu M, Zhang Y, Shen W, Liu X, Wang C 2011 *Opt. Lett.* **36** 4149
- [8] Fermann E M, Kruglov I V, Thomsen C B, Dudley M J, Harvey D J 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 6010
- [9] Kruglov I V, Peacock C A, Harvey D J, Dudley M J 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 461
- [10] Chang Q G, Galvanauskas A, Winful G H, Norris B T 2004 *Opt. Lett.* **29** 2647
- [11] Paschotta R, Nilsson J, Tropper C A, Hanna C D 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 1049
- [12] Finot C, Parmigiani F, Petropoulos P, Richardson J D 2006 *Opt. Express* **14** 3161
- [13] Finot C, Provost L, Petropoulos P, Richardson J D 2007 *Opt. Express* **15** 852
- [14] Oberthaler M, Hopfel A R 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 1017
- [15] Zaouter Y, Papadopoulos N D, Hanna M, Druon F, Cormier E, Georges P 2007 *Opt. Express* **15** 9372
- [16] Fang X H, Hu M L, Song Y J, Xie C, Chai L, Wang Q Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064208 (in Chinese) [方晓惠, 胡明列, 宋有建, 谢辰, 柴路, 王清月 2011 物理学报 **60** 064208]

Fast self-similar amplification through passive nonlinear pulse pre-shaping*

Wang Si-Jia Gu Cheng-Lin Liu Bo-Wen[†] Song You-Jian Qian Cheng
Hu Ming-Lie Chai Lu Wang Qing-Yue

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 15 January 2013; revised manuscript received 27 March 2013)

Abstract

A nonlinear pre-shaper which optimizes initial pulses for self-similar evolution in a following short fiber amplifier is demonstrated. It consists of a pair of transmission gratings and a segment of single mode fiber, by which pulses are shaped temporally and spectrally before amplification. To confirm the benefit of nonlinear pre-shaping for the self-similar evolution, pulse amplifications with and without the nonlinear pre-shaper are simulated. From comparison, pulses optimized by nonlinear pre-shaper show a shorter pulse duration, less pedestal and broader spectrum after amplification and compensation. With this optimization, the self-similar amplification can be realized in a 2.2-meter Yb³⁺-doped fiber in a large range of pump power, generating 60 fs transform-limited pulses after compression. This nonlinear pre-shaping method can efficiently shorten the fiber length and release the seed quality required for self-similar amplification. An all-normal dispersion mode-locked fiber laser is employed as the seed of a self-similar amplifier for the first time, thus facilitating an all-fiber system.

Keywords: nonlinear pulse shaping, fiber amplifier, self-similar amplification, femtosecond laser

PACS: 06.60.Jn, 42.55.Wd, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.62.140601

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CB808101, 2010CB327604), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61227010, 61008015, 61078028), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20100032120057).

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