

光子晶体光纤飞秒激光非线性放大系统的耦合动力学过程研究

石俊凯 柴路 赵晓薇 李江 刘博文 胡明列 栗岩锋 王清月

Coupling dynamics for a photonic crystal fiber femtosecond laser nonlinear amplification system

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

Wang Qing-Yue

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 094203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.094203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

300W 侧面分布式抽运掺 Yb 全光纤放大器

[300 W all-fiber amplifier with distributed side-coupled pump configuration](#)

物理学报.2015, 64(8): 084205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084205>

高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器

[High-repetition-rate passively mode-locked erbium-doped all fiber laser](#)

物理学报.2015, 64(6): 064206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064206>

增益导引-折射率反导引大模场光纤激光器抽运技术研究进展

[Progress in gain-guided and index-antiguided large mode area fiber laser pump technology](#)

物理学报.2015, 64(2): 024210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024210>

780W 全光纤窄线宽光纤激光器

[780 W narrow linewidth all fiber laser](#)

物理学报.2014, 63(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134205>

光子晶体光纤飞秒激光非线性放大系统的耦合动力学过程研究*

石俊凯¹⁾ 柴路^{1)2)†} 赵晓薇¹⁾ 李江¹⁾ 刘博文¹⁾²⁾ 胡明列¹⁾²⁾
栗岩锋¹⁾ 王清月¹⁾

1)(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)

2)(天津大学微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2014年10月16日收到; 2014年11月2日收到修改稿)

构建了掺镱大模场面积单偏振光子晶体光纤飞秒激光非线性放大系统. 讨论了腔内净色散量和抽运功率对振荡级输出参数的影响和振荡级参数对放大级输出参数的影响. 在本实验条件下, 当腔内净色散量取较大负色散时, 振荡级直接输出的脉冲更宽, 且携带更少的啁啾. 当振荡级抽运 4.53 W 时, 选择最接近变换极限的脉冲作为种子脉冲, 放大级在 60 W 抽运时输出压缩后无基底的短脉冲, 宽度为 45.7 fs, 平均功率 28 W. 振荡级抽运功率增加到 5.08 W, 放大级抽运 70 W 时, 获得最高输出功率 34.5 W, 对应脉宽 53.5 fs.

关键词: 大模场面积光子晶体光纤, 飞秒激光放大, 非线性放大, 自相位调制

PACS: 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.60.Lh, 42.65.Jx

DOI: 10.7498/aps.64.094203

1 引言

由于具有良好的增益特性、散热特性和较宽的增益光谱, 基于掺镱光纤的锁模激光器可获得较高的平均功率和较窄的脉冲. 相比于基于块状晶体的超快激光系统, 光纤激光器的另一个优势就是体积小. 采用最简单的结构搭建紧凑、稳定的超快光源一直是人们追寻的目标. 要实现高平均功率和高脉冲能量的输出, 放大是必不可少的手段. 然而放大过程中的高阶非线性效应会引起脉冲畸变, 严重影响脉冲质量, 降低峰值功率. 因此, 对于飞秒光纤放大系统必须进行各级之间的匹配和优化.

对于高阶非线性效应的影响, 目前主要有两种处理方法.

第一种方法是避免非线性效应. 例如采用大模场面积光子晶体光纤 (photonic crystal fiber,

PCF)^[1], 通过增加模场面积, 降低功率密度, 达到减少非线性效应的目的. 目前国内在大模场面积 PCF 方面也取得了一定的进展^[2,3]. 为了保证激光单模运转, 模场面积不可能无限增大. 2010年, Seise 等将连续光放大领域的相干合束技术^[4]应用到飞秒激光放大领域^[5]. 该方法在保证光纤的单模特性的同时, 等效于将光纤的模场面积扩大了倍. 此外, 也可以从纵向来考虑, 尽量延长脉冲在时域的持续时间. 最常见的方法就是啁啾脉冲放大 (chirped pulse amplification, CPA), 在放大之前先将种子脉冲展宽至数十 ps 甚至更宽, 降低脉冲峰值功率以避免非线性的产生. 采用该方法可以获得平均功率 kW 量级^[6,7], 或脉冲能量 mJ 量级^[7,8] 的输出. 但是, 一套典型的光纤 CPA 系统包括振荡级, 展宽器, 一级或多级预放, 主放大级和压缩器, 此外还有选脉冲机理等单元结构. 如此复杂的系统失去了光纤激光器小型化的优势. 2008年, Renninger

* 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), 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20110032110056) 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: luchai@tju.edu.cn

等提出以巨啁啾振荡级作为光纤放大系统的种子源^[9]. 具体方法是在振荡级腔内引入一段无源光纤, 为脉冲提供啁啾, 同时降低重复频率以提高脉冲能量. 2011年, Chichkov等在ANDi腔内引入一段45 m的无源光纤, 获得4.3 MHz, 0.54 μJ, 39 ps的脉冲输出^[10]. 以此作为光纤CPA系统的种子源, 不但将展宽器合并到振荡级中, 并省去了选脉冲机理, 一级或多级预放, 大大简化了系统结构. 然而, 此类方法虽然避免了放大过程中非线性啁啾的积累, 但是这种巨啁啾脉冲经过放大及线性压缩器压缩后, 脉宽都在数百 fs, 甚至 ps 量级, 很难达到应用的要求.

第二种方法就是利用非线性效应. 即种子脉冲不经过展宽, 直接进入增益光纤进行放大, 获得增益的同时利用光纤的非线性效应对脉冲进行整形. 目前最常用的就是自相似放大. 种子脉冲在增益光纤中传输时, 经过非线性、增益和正色散的共同作用, 最终演化成抛物线型脉冲. 该脉冲中部主要含有线性啁啾, 因此, 通过色散补偿可获得接近傅里叶变换极限脉冲. 采用该方法可以获得脉冲能量数百 nJ, 宽度 50 fs 左右的脉冲输出^[11]. 自相似演化需要一段足够长的增益光纤. 在放大过程中, 长光纤可能会诱导受激拉曼散射, 限制了脉冲能量. 在

实际激光器中, 即使是获得抛物线光谱, 在高功率下脉冲质量也出现明显的下降^[12]. 而不需要自相似演化的非线性放大, 同样可以利用光纤的非线性效应展宽光谱, 获得 50 fs 左右的脉冲输出^[13].

本文采用最简单的PCF单级非线性放大结构, 分别讨论振荡级的腔内净色散 (net-cavity dispersion, NCD) 和抽运功率对振荡级输出脉冲特性及其对放大级脉冲演变动力学过程的影响. 结果表明, 对于飞秒光纤非线性放大系统, 放大(压缩)后的脉冲质量与种子脉冲的啁啾特性直接相关; 在振荡级输出脉冲含有正啁啾的一般情况下, 通过调节振荡级NCD, 使种子脉冲的啁啾量尽量小(接近傅里叶变换极限), 就可以在放大过程中减小非线性积累, 使之与压缩器的三阶色散相匹配^[14], 从而获得基底干净的高功率飞秒脉冲.

2 实验装置

PCF飞秒激光放大系统结构如图1所示. 方框(1)内为振荡级, 方框(2)为隔离器, 方框(3)为放大级, 方框(4)为压缩器. 其中各器件参数见文献^[15].

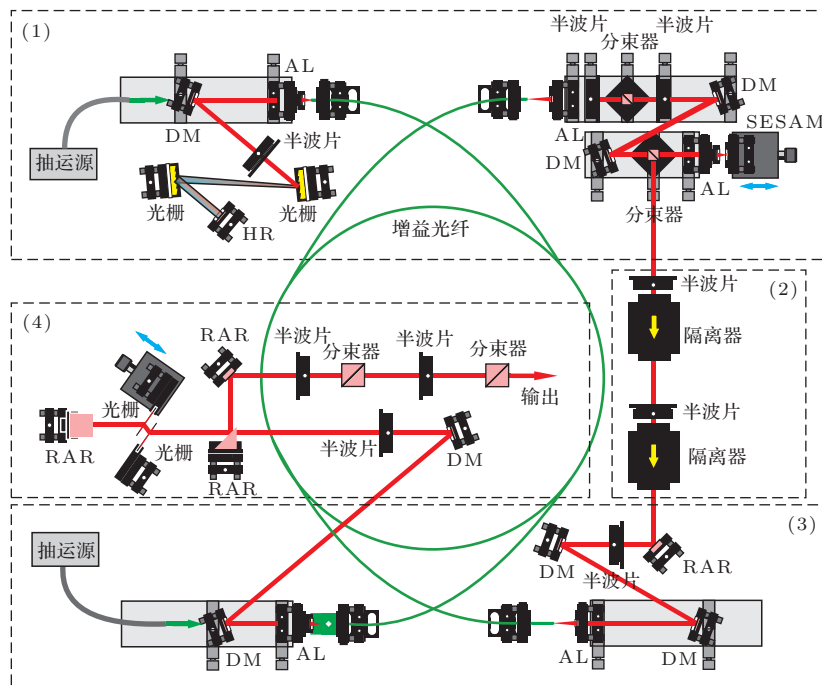


图1 (网刊彩色) 飞秒激光放大系统实验装置图 (AL: 非球面镜; DM: 双色镜; HR: 全反镜; RAR: 直角反射镜; SESAM: 半导体可饱和吸收镜)

Fig. 1. (color online) Experimental setup of femtosecond laser amplification system. (AL, aspheric lens; DM, dichroic mirror; HR, high-reflectivity mirror; RAR, right angle reflectivity mirror; SESAM: semiconductor saturable absorber mirror).

3 实验结果

3.1 振荡级实验结果

由于振荡级输出参数直接影响放大级的输出结果, 所以首先讨论振荡级的运转动力学过程, 以及NCD和抽运功率对振荡级输出结果的影响.

3.1.1 振荡级的动力学过程

首先采用分步傅里叶法解非线性薛定谔方程^[16]来讨论脉冲在腔内的演化过程. 实验中所用增益光纤的材料色散为 $0.024 \text{ ps}^2/\text{m}$, 光纤长 1.8 m , 往返两次共计产生的正色散量为 0.0864 ps^2 . 腔内光栅对入射角为 30° , 往返两次共计产生色散 -0.1036 ps^2 , NCD为负. 起始光为白噪声, 在腔内循环300圈后, 获得稳定的脉冲输出.

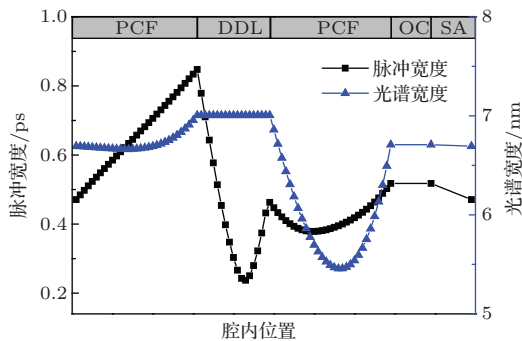


图2 (网刊彩色) 模拟的脉冲宽度与光谱宽度在一个谐振腔循环周期内的演化曲线(DDL, 色散延迟线; OC, 耦合输出; SA, 饱和吸收体)

Fig. 2. (color online) Pulse duration (square) and spectrum width (triangle) evolution over one roundtrip (DDL, dispersive delay line; OC, output coupler; SA, saturable absorber).

稳定脉冲在腔内的演化过程如图2所示. 起始脉冲选择在进入增益光纤的非抽运端, 此时抽运方式为对向抽运. 在色散的作用下, 脉冲在时域单调展宽. 而在频域, 由于此时脉冲峰值功率较低, 自相位调制对光谱的作用并不明显, 同时, 在光纤吸收和增益窄化的共同作用下谱宽略有下降. 随着脉冲峰值功率的增加, 自相位调制作用增强, 光谱开始展宽. 进入色散补偿阶段, 脉冲在频域保持不变, 而在时域, 脉冲本身的正啁啾被快速补偿, 脉宽急剧下降, 过补偿后再急剧展宽. 脉冲携带负啁啾反向进入增益光纤, 此时抽运方式为同向抽运. 脉冲中的负啁啾被光纤正色散补偿, 脉冲被压缩. 负啁啾被完全补偿以后, 脉冲开始展宽. 由于脉冲啁啾为负时脉冲峰值功率较高, 光谱在自相位调

制作用下迅速压窄, 色散过补偿后再被展宽. 输出后, 脉冲能量下降, 脉宽和谱宽保持不变. 最后, 在SESAM的调制作用下, 脉冲在时域和频域的宽度都略微下降. 调制后的脉冲作为种子光开始下一个周期的循环.

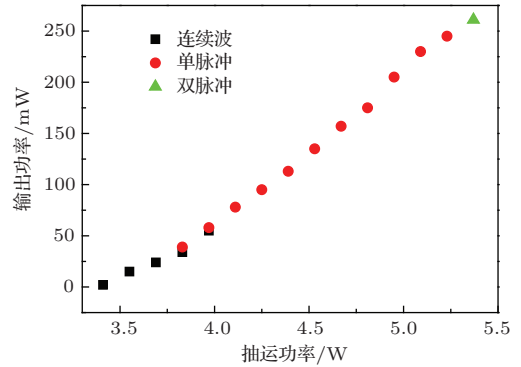


图3 振荡级的运转状态和输出功率随抽运功率的变化情况

Fig. 3. Operational states and output power as a function of the pump power. Square: continue wave; Circle: single-pulse mode-locking; Triangle: double-pulse mode-locking.

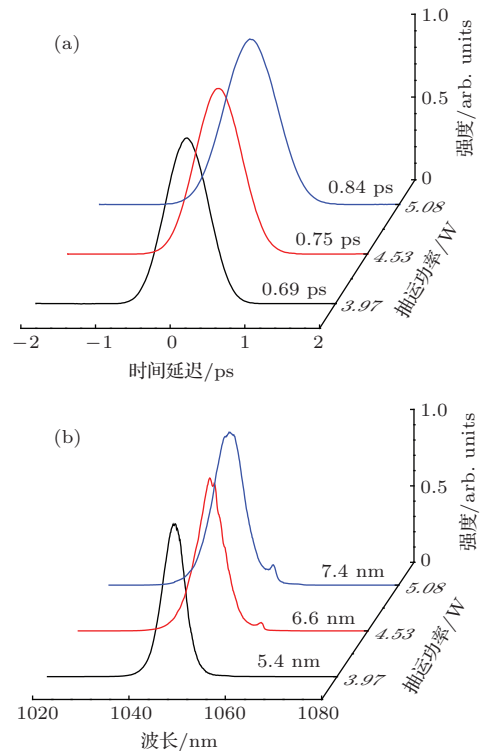


图4 振荡级输出的(a)自相关曲线与(b)光谱随抽运功率的变化规律(图中标注的自相关读数 and 谱宽为半高全宽度(FWHM))

Fig. 4. (a)Autocorrelations and (b)spectrum as a function of pump power.

根据模拟参数搭建振荡级, 并进行优化实验. 实验结果如图3和图4所示. 激光产生的阈值为

3.41 W, 此时激光器在腔内色散、增益和SESAM的作用下产生很强的调制, 类似于调Q状态. 当抽运功率增加到3.97 W时, 输出功率为58 mW, 激光器进入单脉冲锁模运转. 输出脉冲重复频率43 MHz. 随着抽运功率增加, 输出脉冲宽度和光谱宽度随之单调增加, 如图4所示. 当抽运功率为5.23 W时, 获得最高输出功率为245 mW. 当抽运功率增加到5.37 W时, 发生脉冲分裂, 激光器进入双脉冲状态.

3.1.2 腔内净色散量对振荡级输出结果的影响

在确保激光器维持稳定单脉冲运转的前提下, NCD取不同值, 分别测量输出的自相关曲线和光谱, 结果如图5所示. 从图5(a)可以看出, 在单脉冲运转的前提下, NCD的调节范围为+0.00888 ps²至-0.0577 ps². 当NCD大于0.00888 ps²时, 脉冲分裂, 激光器进入双脉冲运转; 当NCD小于-0.0577 ps²时, 激光器不能维持稳定的锁模运转,

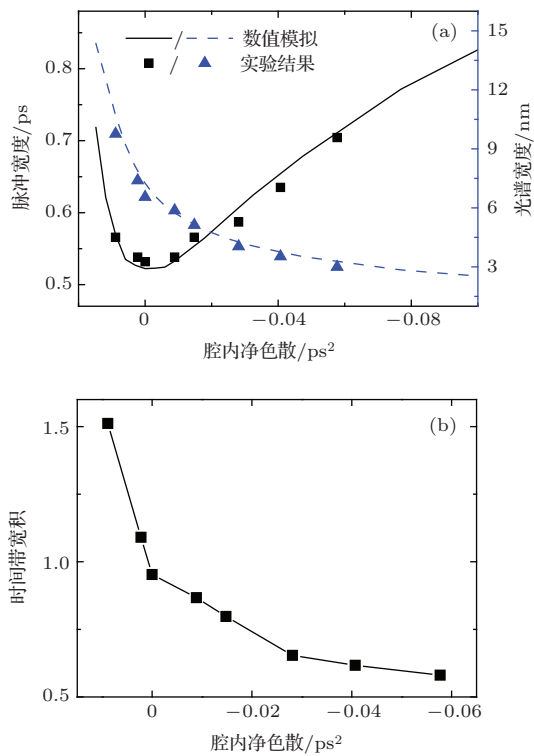


图5 (网刊彩色) (a) 振荡级输出脉冲宽度和光谱宽度随腔内色散量变化情况 (黑色方点为直接输出脉宽, 蓝色三角点为输出谱宽, 黑色实线和蓝色虚线分别为脉宽和谱宽模拟结果); (b) 对应的时间带宽积随腔内色散量变化情况
Fig. 5. (color online) (a) Pulse duration (square: measured; solid line: simulated), spectrum width (triangle: measured; dashed line: simulated) and (b) corresponding time-bandwidth product (measured) as a function of net cavity dispersion.

进入调制状态. 当激光器锁模运转在正色散域时, 随着NCD的减小, 脉冲宽度逐渐下降, 并在零色散点处达到最小值. 进入负色散域后, 随着负色散量的增加, 脉宽单调增加. 而在频域中, 光谱宽度则随着NCD从正最大值到负最大值单调递减. 这是因为NCD向负色散方向偏移, 自相位调制对光谱的压缩效应更加强烈, 输出光谱更窄. 图中实线和虚线为模拟结果, 可以看到实验结果与理论结果拟合的很好. 图5(b)所示的是对应的时间-带宽积 (time-bandwidth product, TBP), 可见TBP随腔内负色散量的增加而单调递减. 这说明只有在腔内负色散量较大时, 才可以获得更接近傅里叶变换极限的脉冲.

3.1.3 抽运功率对振荡级输出结果的影响

除了NCD, 另一个可调节的参数就是抽运功率. 这里选取抽运功率分别为3.97 W, 4.53 W和5.08 W, 测量结果如图6所示. 从图中可以看出, 无论是脉宽还是谱宽, 在不同抽运功率下随NCD的变化趋势完全一致. 从图6(a)中可见, 随抽运功率

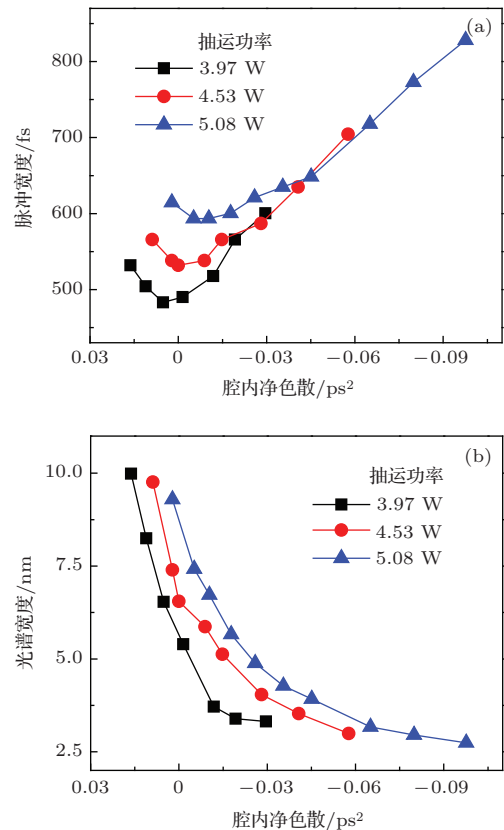


图6 (网刊彩色) 不同抽运功率下, 振荡级输出的 (a) 脉冲宽度和 (b) 谱宽随腔内色散量的变化情况
Fig. 6. (color online) (a) Pulse duration and (b) spectrum width as a function of net cavity dispersion with different pump power.

的增加, 脉宽最小值对应的色散点向右移动. 这是因为抽运功率越高, 腔内激光强度相关的自相位调制引入的正啁啾越大, 因此需要更多负色散来补偿; 同时, 随着抽运功率的增加, NCD的可调谐范围也在变大, 如图 6(b)所示, 调谐范围分别为 0.04588 ps^2 (3.97 W), 0.06658 ps^2 (4.53 W) 和 0.0999 ps^2 (5.08 W).

3.2 放大级实验结果

我们采用的是非线性直接放大形式, 这种放大级的输出结果与种子脉冲的参数直接相关, 因此需要仔细优化振荡级和放大级之间的匹配关系, 以获得最佳输出脉冲质量.

3.2.1 放大级的动力学过程

取抽运功率为 4.53 W , NCD 为 -0.0577 ps^2 条件下的振荡级输出作为种子脉冲. 其脉宽为 704 fs , 谱宽 3 nm , 重复频率为 42 MHz , 经过两个隔离器后进入放大级的功率为 90 mW .

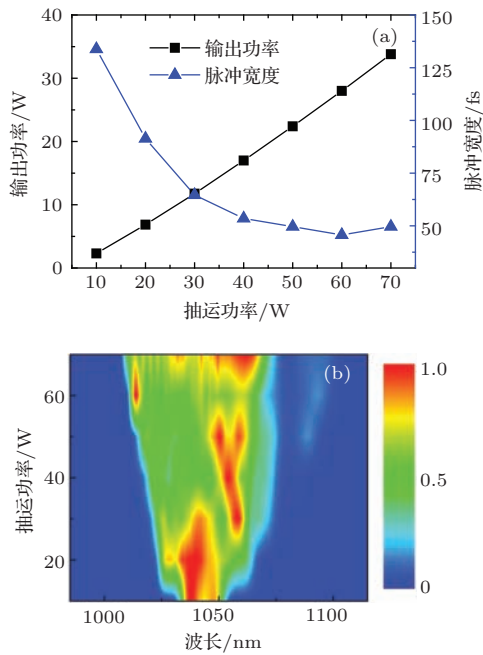


图 7 (网刊彩色) 放大级的动力学过程 (a) 为输出功率及压缩后脉宽随泵浦功率变化情况; (b) 为输出光谱随泵浦功率增加的演变过程

Fig. 7. (color online) Operation dynamics of amplifier: (a) output power, compressed pulse width and (b) power spectra as a function of the pump power.

放大级输出结果如图 7 和图 8 所示. 其中, 图 7 表示了经过放大级放大后的脉冲平均功率、脉宽和谱宽随放大级抽运功率变化的动力学过程. 从斜效率曲线看, 平均输出功率随抽运功率增加而

单调线性上升, 在最高抽运 70 W 时, 脉冲压缩后平均输出功率为 34 W , 斜效率达到 53% . 从脉冲宽度和光谱的演变规律看, 在低功率抽运区域, 随着抽运功率的提高, 光谱被迅速展宽, 相应的压缩后脉冲宽度随之下降. 当光谱展宽到 50 nm 左右时, 光纤的增益谱宽限制开始发挥作用, 光谱不再展宽, 相应的脉冲宽度变化趋于平缓, 在抽运 60 W 条件下获得 45.7 fs 的脉冲输出, 对应 28 W 的平均功率. 继续增加抽运功率, 由于脉冲积累的高阶啁啾的影响, 脉冲基底明显变大 (见图 8), 不能被现有压缩器补偿, 需要采用矢量啁啾补偿法 [14] 进一步改善.

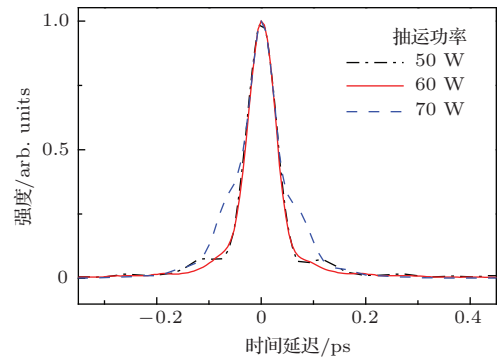


图 8 (网刊彩色) 在不同泵浦功率下放大级输出脉冲经压缩后的自相关曲线

Fig. 8. (color online) Autocorrelations of the output pulses from the amplifier with different pump powers after compression.

3.2.2 振荡级腔内色散量对放大级输出结果的影响

4.53 W 抽运条件下, 调节振荡级 NCD (光栅对间隔), 选取分别对应腔内色散量 0.00888 ps^2 (调谐范围最左端), 0 ps^2 (零色散点), -0.0281 ps^2 , -0.0577 ps^2 (调谐范围最右端) 四种条件下的振荡级输出作为种子光, 分别讨论各自的放大特征. 四种 NCD 条件下振荡级的输出参数见表 1.

表 1 四种条件下振荡级的输出参数

Table 1. The output parameters of oscillator with different net intra-cavity dispersion.

编号	腔内净色散量/ ps^2	脉冲宽度/fs	光谱宽度/nm	TBP
a	0.00888	566	9.8	1.51
b	0	532	6.6	0.95
c	-0.0281	587	4.0	0.65
d	-0.0577	704	3.0	0.58

经放大后的实验结果如图 9 所示. 从图 9(a) 中可以看出, 在低抽运功率 (10 W 左右) 时, a, b, c, d 四种条件下输出的脉宽依次递增. 这是因为在低抽运功率下, 脉冲能量较低, 自相位调制对光谱

的展宽效应还不明显, 初始光谱窄的脉冲放大后光谱依然最窄, 其压缩后的脉冲也就最宽. 而随着抽运功率的增加 (20—40 W), 脉冲能量迅速提高, 光谱在自相位调制效应作用下急剧展宽, 此时不同起始条件下的脉宽逐渐接近. 继续增加抽运功率 (50—70 W), 光纤的增益谱宽限制开始发挥作用, 激光光谱展宽到极限后各种条件下的光谱宽度差别不大. 同时, 由于 d 条件下, 种子脉冲最宽, 初始啁啾最小, 放大过程中积累的非线性啁啾最小, 因此压缩后脉宽小于另外三种情况. 图 9 (b) 为四种条件下获得的最窄脉宽的自相关曲线. 可以看到, 仅在 d 条件下的脉冲几乎没有基底. 这说明在脉冲能量一定的条件下, 脉冲宽度越大, 峰值功率就越低, 在放大过程中积累的非线性啁啾就越少. 同时, 种子脉冲本身携带的啁啾会影响到放大之后脉冲的特性, 种子脉冲携带的啁啾越小, 放大后的脉冲质量越好. 实验结果表明, 对于非线性放大系统, 振荡级的输出脉冲应该尽可能选择满足傅里叶变换极限的宽脉冲.

4 结 论

构建了基于掺镱大模场面积保偏 PCF 的飞秒激光单级非线性放大系统. 分别讨论了振荡级的 NCD 和抽运功率变化对其输出脉冲参数影响的动力学过程和种子脉冲参数对非线性放大后输出脉冲特性的影响. 当保持振荡级抽运功率不变时, 在维持单脉冲运转的前提下, 振荡级腔内负色散量越大, 输出的种子脉冲越宽, 且啁啾量越小, 则在高功率非线性放大后下脉冲越窄, 基底越小, 脉冲质量越好. 因此, 在本实验条件下, 对于非线性放大系统, 振荡级的工作状态应该选择输出脉冲为尽量满足变换极限的宽脉冲.

在振荡级抽运为 4.53 W 的条件下, 选择啁啾最小的种子脉冲, 在放大级抽运为 60 W 时, 非线性相位积累和压缩器的三阶色散基本匹配, 获得了最窄 45.7 fs, 输出功率 28 W 的无基底脉冲. 在振荡级抽运为 5.08 W 的条件下, 选择啁啾最小的种子脉冲, 可在放大级抽运为 70 W 时, 获得了最高 34.5 W 的输出功率, 脉宽为 53.5 fs.

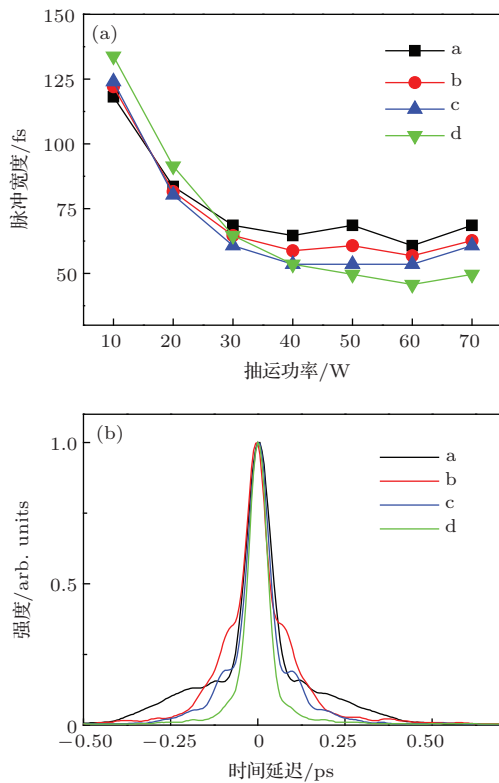


图 9 (网刊彩色) 振荡级腔内净色散取不同值时 (a) 放大级压缩后脉宽随泵浦功率变化曲线和 (b) 60 W 抽运下的自相关曲线

Fig. 9. (color online) (a) The compressed pulse width of amplifier as a function of pump power and (b) autocorrelations under a amplifier pump power of 60 W with different net cavity dispersion of oscillator.

参考文献

- [1] Limpert J, Liem A, Reich M, Schreiber T, Nolte S, Zellmer H, Tünnermann A, Broeng J, Petersson A, Jakobsen C 2004 *Opt. Express* **12** 1313
- [2] Chen G, Jiang Z W, Peng J G, Li H Q, Dai N L, Li J Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144206 (in Chinese) [陈瑰, 蒋作文, 彭景刚, 李海清, 戴能利, 李进延 2012 物理学报 **61** 144206]
- [3] Zhao N, Chen G, Wang Y B, Peng J G, Li J Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 024202 (in Chinese) [赵楠, 陈瑰, 王一礴, 彭景刚, 李进延 2014 物理学报 **63** 024202]
- [4] Xiao R, Hou J, Jiang Z F, Liu M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6464 (in Chinese) [肖瑞, 侯静, 姜宗福, 刘明 2006 物理学报 **55** 6464]
- [5] Seise E, Klenke A, Limpert J, Tünnermann A 2010 *Opt. Express* **18** 27827
- [6] Eidam T, Hanf S, Seise E, Andersen T V, Gabler T, Wirth C, Schreiber T, Limpert J, Tünnermann A 2010 *Opt. Lett.* **35** 94
- [7] Wan P, Yang L M, Liu J 2013 *Opt. Express* **21** 29854
- [8] Röser F, Eidam T, Rothhardt J, Schmidt O, Schimpf D N, Limpert J, Tünnermann A 2007 *Opt. Lett.* **32** 3495
- [9] Renninger W H, Chong A, Wise F W 2008 *Opt. Lett.* **33** 3025
- [10] Chichkov N B, Hapke C, Hausmann K, Theeg T, Wandt D, Morgner U, Neumann J, Kracht D 2011 *Opt. Express* **19** 3647
- [11] Deng Y J, Chien C Y, Fidric B G, Kafka J D 2009 *Opt. Lett.* **34** 3469

- [12] Schreiber T, Schimpf D, Müller D, Röser F, Limpert J, Tünnermann A 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1809
- [13] Zaouter Y, Papadopoulos D N, Hanna M, Bouillet J, Huang L, Agueraray C, Druon F, Mottay E, Georges P, Cormier E 2008 *Opt. Lett.* **33** 107
- [14] Xie C, Liu B W, Niu H L, Song Y J, Li Y, Hu M L, Zhang Y G, Shen W D, Liu X, Wang C Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 4149
- [15] Shi J K, Chai L, Zhao X W, Li J, Niu H L, Hu M L, Li Y F, Wang Q Y 2014 *Chinese J Laser* **41** 2001 (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** 2001]
- [16] Agrawal G P 2007 *Nonlinear Fiber Optics* (4th Ed.) (New York: Academic Press) pp41–45

Coupling dynamics for a photonic crystal fiber femtosecond laser nonlinear amplification system*

Shi Jun-Kai¹⁾ Chai Lu^{1)2)†} Zhao Xiao-Wei¹⁾ Li Jiang¹⁾ Liu Bo-Wen¹⁾²⁾ Hu Ming-Lie¹⁾²⁾
Li Yan-Feng¹⁾ Wang Qing-Yue¹⁾

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

2) (*MOEMS Education Ministry Key Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(Received 16 October 2014; revised manuscript received 2 November 2014)

Abstract

A femtosecond laser single-stage nonlinear amplification system composed of Yb-doped large-mode-area single-polarization photonic crystal fibers is demonstrated. Effects of net cavity dispersion and pump power on oscillator output parameters and the evolution dynamics of the amplified pulse after compression are discussed for different seed pulse parameters. Under the experimental conditions in this paper, the longer and less chirped pulses are obtained with a larger negative net intracavity dispersion in the oscillator. When a nearly-transform-limited pulse is chosen as seed pulse under the condition of oscillator pump power of 4.53 W, the shortest nearly-pedestal-free amplified pulse is achieved under the amplifier pump power of 60 W after the dispersion is compensated by a grating pair, in which the pulse duration is 45.7 fs with an average power of 28 W at a repetition frequency of 42 MHz. When the oscillator pump power is increased to 5.08 W and most nearly-transform-limited pulses under the pump condition are selected as the seed pulses, the maximum average power of 34.5 W with a duration of 53.5 fs is obtained at an amplifier pump power of 70 W.

Keywords: large-mode-area photonic crystal fiber, femtosecond laser amplification, nonlinear amplification, self-phase modulation

PACS: 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.60.Lh, 42.65.Jx

DOI: 10.7498/aps.64.094203

* Project supported in part 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), the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20110032110056), and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of China (Grant No. IRT13033).

† Corresponding author. E-mail: luchai@tju.edu.cn