

基于锯齿波脉冲抑制自相位调制的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器

盛泉 王盟 史朝督 田浩 张钧翔 刘俊杰 史伟 姚建铨

High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses

Sheng Quan Wang Meng Shi Chao-Du Tian Hao Zhang Jun-Xiang Liu Jun-Jie Shi Wei Yao Jian-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 214202 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210496

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210496>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

窄线宽脉冲光纤激光的自相位调制预补偿研究

Self-phase modulation pre-compensation of narrowlinewidth pulsed fiber lasers

物理学报. 2018, 67(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180486>

窄线宽纳秒脉冲光纤拉曼放大器的理论模型和数值分析

Theoretical and numerical study on narrow-linewidth nanosecond pulsed Raman fiber amplifier

物理学报. 2018, 67(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172679>

相位调制信号对窄线宽光纤放大器线宽特性和受激布里渊散射阈值的影响

Effect of phase modulation on linewidth and stimulated Brillouin scattering threshold of narrow-linewidth fiber amplifiers

物理学报. 2017, 66(23): 234203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.234203>

可调谐掺铥光纤激光器线宽压缩及其超光谱吸收应用

Linewidth compression of tunable Tm-doped fiber laser and its hyperspectral absorption application

物理学报. 2020, 69(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191515>

掺Er光纤飞秒激光器中电光晶体对激光器参数的影响

Influence of electro-optic modulator on Er-doped fiber femtosecond laser

物理学报. 2021, 70(7): 074203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201564>

基于频移反馈腔的全光纤射频调制脉冲激光研究

All-fiber radio frequency-modulated pulsed laser based on frequency-shift feedback loop

物理学报. 2017, 66(18): 184201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.184201>

基于锯齿波脉冲抑制自相位调制的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器*

盛泉¹⁾²⁾ 王盟¹⁾²⁾ 史朝督¹⁾²⁾ 田浩¹⁾²⁾ 张钧翔¹⁾²⁾
刘俊杰¹⁾³⁾ 史伟^{1)2)†} 姚建铨¹⁾²⁾

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

2) (光电信息技术教育部重点实验室-天津大学, 天津 300072)

3) (天津航技术物理研究所, 天津 300308)

(2021 年 3 月 14 日收到; 2021 年 5 月 16 日收到修改稿)

报道了基于锯齿波脉冲抑制自相位调制 (SPM) 的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器. 通过优化掺铋 (Yb) 石英有源光纤的长度, 在保证输出功率和转换效率的同时提高单频光纤激光放大器中的受激布里渊散射阈值, 并采用脉冲波形为锯齿波的种子光, 利用其光强对时间的变化率为常数的特性有效抑制了 SPM 效应导致的激光光谱展宽现象. 主放大级泵浦功率为 11.3 W 时获得了平均输出功率为 3.13 W、脉冲重复频率为 20 kHz 的 1064 nm 单频激光输出; 此时脉冲宽度为 6.5 ns, 对应峰值功率为 24 kW, 测得光谱线宽仅为 83 MHz, 接近变换极限水平. 与采用常规高斯波形脉冲种子光的对照实验相比, 锯齿波形脉冲对 SPM 所致的光谱展宽具有显著抑制效果, 为高功率窄线宽脉冲光纤激光放大器提供了一种行之有效的方法.

关键词: 单频光纤激光器, 脉冲光纤激光器, 自相位调制, 窄线宽激光器

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

DOI: 10.7498/aps.70.20210496

1 引言

基横模、单纵模的单频激光器具有窄线宽、低噪声、高相干性、高光束质量等优良特性, 在相干光通信、高精度光谱及精密测量等领域具有极其重要的应用^[1,2]. 基于调制脉冲种子源的主振荡器-功率放大器 (MOPA) 光纤激光系统具有时间特性灵活、转换效率高等特点, 特别是全光纤化的结构具有优秀的环境适应性和稳定性, 对于需要较高脉冲峰值功率的应用来说是一种较为理想的光源, 相关领域的研究人员在窄线宽脉冲单频光纤激光

MOPA 的功率和线宽这两个主要参数的优化提升方面也付出了大量的努力^[3-5].

单频光纤激光器的功率和光谱线宽分别主要受限于受激布里渊散射 (SBS) 和自相位调制 (SPM) 这两种非线性效应. 相比连续波光纤激光器, 脉冲光纤激光器具有更高的峰值功率, 其中的非线性效应更为严重. SBS 产生的后向 Stokes 光会在有源光纤中被放大, 消耗反转粒子数, 影响正向输出的转换效率, 放大的反向光也可能造成器件和系统的损伤; 而 SPM 则使光纤 MOPA 输出的光谱线宽发生明显的展宽, 劣化激光的光谱特性和时间相干性. 抑制光纤中非线性效应的最直接的方法是增大光纤模场面积以降低激光功率密度, 以及采用重掺

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFF0104603)、国家自然科学基金 (批准号: 61975146, 62075159) 和山东省重点研发计划 (批准号: 2019JZZY020206) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shiwei@tju.edu.cn

杂的高增益有源光纤以缩短所需的光纤长度^[6–10]; 对于 SBS 效应, 还可采用降低光场和声场的交叠、施加温度和应力梯度降低有效布里渊增益, 以及采用锥形光纤增加反向信号损耗等抑制方法^[11–15]; 另外采用小于声子寿命 (玻璃光纤中一般约为 10 ns) 的信号光脉冲宽度也能够将 SBS 阈值进一步提高 1—2 个数量级, 实际工作中经常将上述方法相配合应用. 2012 年 Petersen 等^[7]用芯径为 25 μm 、长度仅为 12 cm 的高增益铟共掺磷酸盐光纤放大短脉宽的 1550 nm 单频种子光, 在脉宽为 3 ns、峰值功率为 128 kW 时未发生 SBS 且仍能够保持变换极限的光谱宽度; 同年, Fang 等^[16]采用长为 41 cm 的高增益掺铋锗酸盐光纤对脉冲宽度为 2 ns 的 1918 nm 单频种子光进行放大, 输出峰值功率达到 78.1 kW. 在抑制 SBS 的基础上, 为避免 SPM 导致的光谱展宽, 还可通过对种子信号脉冲预先施加与光纤中的 SPM 共轭的反向调制进行补偿. 中国人民解放军国防科技大学的研究人员对此开展了大量的研究工作, 并报道了数 kW 脉冲峰值功率下实现近变换极限光谱宽度的实验结果^[17,18].

前述 1550 nm 和 1918 nm 的脉冲 MOPA 分别在 128 kW 和 78.1 kW 峰值功率下保持接近变换极限光谱线宽的实验结果都是基于自制的高增益大芯径软玻璃单模光纤. 如采用兼容性和稳定性更好的石英有源光纤, 其相对较低的泵浦吸收系数必然要求更长的光纤长度, 会导致更为严重的非线性积累, 这就对相位调制补偿 SPM 时电光相位调制器 (EOPM) 的调制能力提出了很高的要求^[19]. 进一步提高峰值功率, 则常规 EOPM 的调制能力不足以补偿 SPM 的作用, 因此相关采用石英有源光纤的脉冲单频 MOPA 也大多只能在几千瓦的峰值功率水平保持变换极限的光谱线宽. SPM 过程引起的激光频率变化与光强对时间的变化率有关^[20], 如果光强对时间的导数为常数, 则理论上不会因 SPM 产生额外的频率分量. 2019 年, Su 等^[20]提出采用方波或锯齿波信号来抑制 SPM 导致的光谱展宽的思路, 并用方波信号对该设想进行了实验验证; 2021 年, Huang 等^[21]在基于 4 ns 窄脉宽种子光抑制 SBS 的基础上, 采用方波信号抑制 SPM, 掺铋 (Yb) 光纤放大器输出脉宽为 3.8 ns、峰值功率为 30 kW 时测得光谱半高全宽为 283 MHz, 接近变换极限水平 (时域上方波的理论时间带宽积极限为 0.88).

锯齿波脉冲中光强的时间导数为常数, 因此

同样具有抑制 SPM 的效果. 与方波脉冲相比, 锯齿波的时间带宽积极限更小, 因此在同等的脉冲宽度下具有实现光谱线宽更窄的激光输出的潜力. 另外, 在对脉冲能量有一定要求的应用中, 也不宜单纯依靠小于声子寿命的短脉冲宽度来抑制 SBS. 本文采用锯齿脉冲波形抑制高功率单频掺铋光纤激光放大器中 SPM 导致的光谱展宽, 结合对商用石英有源光纤长度的优化抑制 SBS, 获得了峰值功率为 24 kW、脉冲宽度为 6.5 ns、脉冲重复频率 (PRF) 为 20 kHz 的 1064 nm 脉冲单频激光输出; 最高输出功率时的光谱线宽仅为 83 MHz, 接近变换极限水平.

2 实验装置

图 1 为窄线宽脉冲单频光纤 MOPA 的实验光路示意图. 波长为 1063.66 nm 的单频掺 Yb 光纤激光振荡器提供功率为 70 mW 的连续波种子光, 经过高速信号发生器 (AFG) 控制的电光强度调制器 (EOIM) 调制产生锯齿波形、脉冲半高全宽为 7.5 ns 的种子光, 经过 2 级由 976 nm 单横模半导体激光器 (LD) 纤芯泵浦的掺 Yb 光纤预放大级后, 又经过与 EOIM 同步的声光调制器 (AOM) 调制以减小连续波成分的放大的自发辐射 (ASE) 的影响. 此时 PRF 为 20 kHz 的信号光平均功率为 200 μW , 峰值功率约为 1.3 W. 在进入主放大器之前, 信号光又经历 2 级掺 Yb 有源光纤尺寸分别为 10/130 μm 和 20/130 μm 的 976 nm 包层泵浦的预放大器将种子光平均功率放大到 50 mW 和 220 mW, 对应的峰值功率分别约为 330 W 和 1.5 kW. 主放大器所用有源光纤的纤芯和包层直径分别为 35 μm 和 250 μm , 由于光纤纤芯尺寸较大, 采用 14—15 cm 的小盘绕直径以抑制高阶横模, 实验中尝试了不同有源光纤长度以优化 SBS 阈值及泵浦吸收所决定的转换效率. 上述各级预放大器和主放大器采用稳波长为 976 nm 的 LD 作为泵浦源, 各级放大器之前均加入了隔离器 (ISO) 滤除反向 ASE, 在 3 级包层泵浦放大器之间还采用带通滤波器 (BPF) 滤除带内 ASE. 主放大器后用包层模式剥除器 (CMS) 去除未吸收的残余泵浦光, 光纤输出端 8°角斜切以避免端面对激光的反射. 在主放大级所用的信号泵浦合束器的空闲端口观察反向光光谱, 以监测 SBS 是否发生.

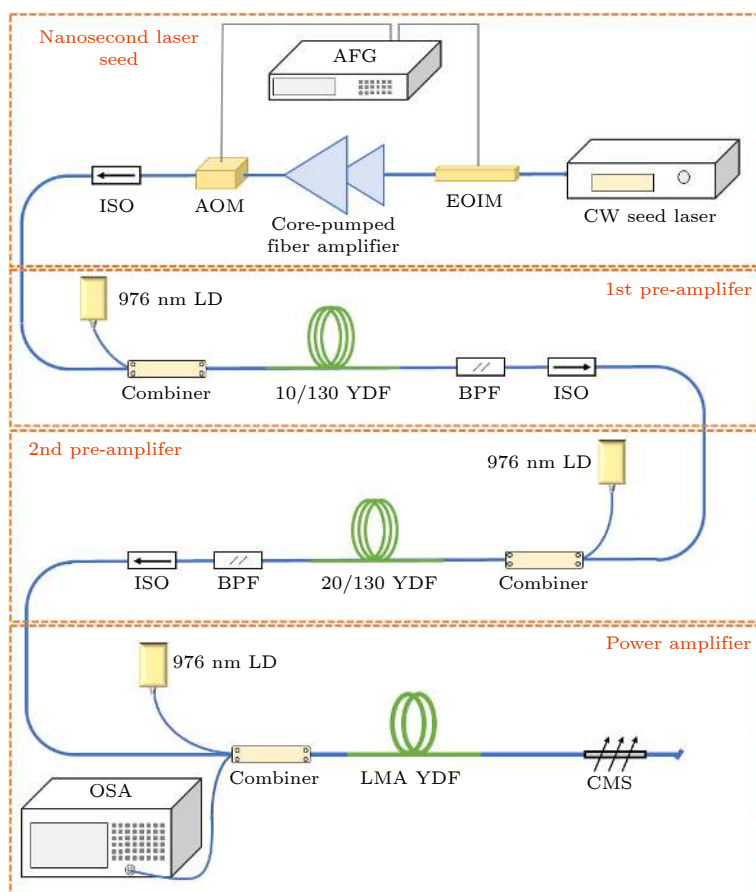


图 1 脉冲单频光纤激光 MOPA 光路示意图

Fig. 1. Schematic of the pulsed single-frequency fiber MOPA.

3 实验结果和讨论

首先测量脉冲重复频率 20 kHz 时光纤 MOPA 的功率特性, 结果如图 2, 所用功率计探头和表头分别为 Ophir 12A 和 Ophir VEGA. 进入主放大器的种子光平均功率为 220 mW, 在放大器有源光纤长度为 0.9 m 时得到了最佳实验结果, 11.3 W 泵浦功率下激光平均输出功率为 3.13 W, 斜效率为 35.5%, 考虑 20 kHz 的脉冲重复频率, 对应单脉冲能量为 157 μJ . 进一步增加泵浦功率则会在主放大器信号泵浦合束器的空闲端口观察到明显的 SBS 斯托克斯光成分. 有源光纤长度为 1 m 时, 得益于较高的泵浦吸收, 斜效率达到 38.8%, 但泵浦功率为 9.8 W、平均输出功率为 2.83 W 时即观察到了 SBS 斯托克斯光激励; 而使用 0.8 m 长的有源光纤时, 受泵浦吸收所限, 12.8 W 泵浦功率下的激光平均输出功率为 3.06 W, 转换效率与有源光纤长 0.9 m 时相比偏低, 且高泵浦功率下激光器的输出功率曲线出现明显的饱和现象; 因此后续实验

中均采用 0.9 m 长的有源光纤. 需要说明的是, 上述由平均功率换算得到的单脉冲能量与将激光功率衰减后用自动扣除连续波成分的能量计探头 Ophir PE10-C 测得的单脉冲能量相符, 证明放大器的输出中不存在明显的连续波 ASE. 图 3 给出

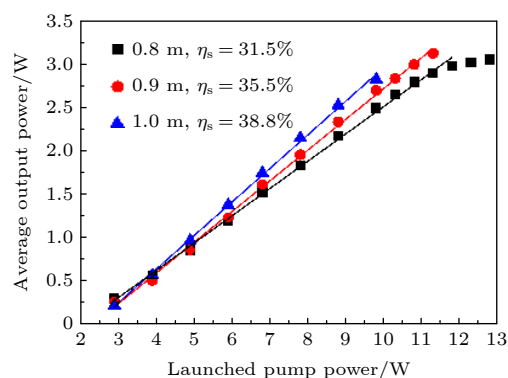


图 2 不同有源光纤长度时光纤激光 MOPA 的平均输出功率曲线, 进入放大器种子光功率为 220 mW, 重复频率为 20 kHz

Fig. 2. Average power of the fiber MOPA with different active fiber lengths as a function of launched pump power with 220 mW seed power at a PRF of 20 kHz.

用光谱仪 Yokogawa 6370D (分辨率 0.02 nm) 记录的最高输出功率为 3.13 W 时的激光光谱, 得益于带通滤波器的使用, 实验中没有观察到明显的 ASE 现象, 仅在 BPF 的通光波段内有部分 ASE 成分, 激光输出与 ASE 成分之间的信噪比为 45 dB. 利用刀口法测得此时的激光光束质量因子 $M^2=1.2$.

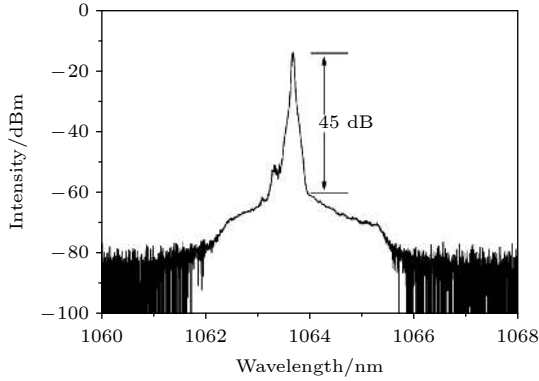


图 3 平均输出功率为 3.13 W、脉冲重复频率为 20 kHz 时的激光光谱
Fig. 3. Laser spectrum power recorded at the average output power of 3.13 W and the PRF of 20 kHz.

实验中使用高速光电探测器 (Thorlabs DET01CFC) 和示波器 (Tektronix TDS3052C) 记录激光脉冲时域波形, 图 4(a)–(c) 分别给出 AOM 调制后、经过 2 级包层泵浦预放大级后进入主放大器之前, 以及主放大器最高输出功率时的脉冲波形. 如图 4(a), 调制产生的种子源为上升沿陡、下降沿缓的锯齿波脉冲, 限于信号发生器的带宽, 上升沿宽度为 ~ 1 ns, 脉冲的半高全宽则为 7.5 ns; 种子光经历纤芯和包层预放大级时, 由于较低的种子光功率没有对有源光纤的增益造成明显的饱和, 因此从第二级包层预放大级输出、进入主放大器的脉冲

波形相比 AOM 调制后的波形并未发生明显变化, 脉冲宽度仍为 7.5 ns, 见图 4(b); 经过主放大器放大后, 由于较强的脉冲前沿对有源光纤的增益饱和, 输出激光脉冲波形发生一定变化, 脉冲半高全宽缩短至 6.5 ns, 但仍保持了锯齿波的波形, 如图 4(c) 所示. 此时对应前述 3.13 W 平均输出功率、20 kHz 脉冲重复频率、157 μ J 单脉冲能量的脉冲峰值功率为 24 kW.

SPM 会对激光引入非线性频移, 频率偏移量 $\delta\omega(t)$ 的表达式为

$$\delta\omega(t) = -\gamma P L_{\text{eff}} \partial I(t) / \partial t, \quad (1)$$

式中, $I(t)$ 为随时间变化的激光光强; P 和 L_{eff} 分别为激光脉冲峰值功率和有效光纤长度; γ 为非线性参量, $\gamma = n_2(\omega_0)\omega_0 / (cA_{\text{eff}})$, 其中, $n_2(\omega_0)$ 为非线性折射率系数, ω_0 为激光角频率, c 和 A_{eff} 分别为真空中的光速和光纤有效模场面积. 对于高斯型等常规脉冲波形, 其光强随时间的变化率 $\partial I(t) / \partial t$ 是时刻变化的, 这就导致时域上脉冲内不同时刻的激光频率相对其原有中心频率的偏移量不同, 即引起光谱展宽. 对于本实验中所用的锯齿波来说, 由于其下降沿光强随时间线性变化, 也即 (1) 式中 $\partial I(t) / \partial t$ 为常数, 因此忽略其很短的上升沿的作用后, 整个脉冲内所产生的非线性频移是一致的, 也就不会产生额外的频率分量, 能够抑制 SPM 引起的光谱展宽.

用法珀扫描干涉仪 (FPI, Thorlabs SA200-8B, 分辨率 7.5 MHz) 测量激光峰值功率为 24 kW 时的激光光谱线宽, 结果如图 5(a) 所示, 此时光谱的半高全宽为 83 MHz. 图中示波器记录的 FPI 波形是由诸多尖峰组成的包络, 这是由于几个 ns 的

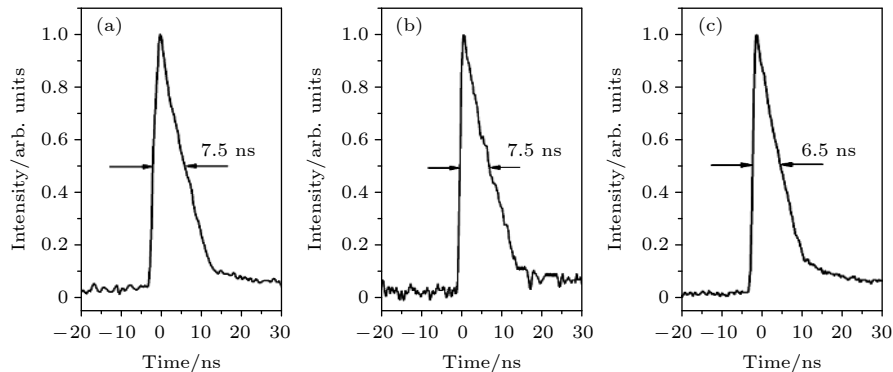


图 4 (a) 调制产生的脉冲种子源的波形; (b) 经过预放大进入主放大级之前的波形; (c) 主放大器最高输出功率时的波形
Fig. 4. Oscilloscope traces of the (a) modulated seed pulse, (b) pulse after being pre-amplified, and (c) main amplifier output at the maximum power.

激光脉宽远小于 ms 级的 FPI 扫描周期, 每个激光脉冲引起的响应在波形上体现为一个尖峰, 而包络体现了激光的光谱线宽. 激光脉宽与光谱的时间带宽积极限和激光脉冲的时域波形有关, 对于常见的高斯、方波和锯齿波等时域波形来说, 其数值各不相同. 对时域锯齿波信号进行傅里叶变换, 可知其时间带宽积极限为 0.491, 脉宽为 6.5 ns 的锯齿波对应变换极限光谱线宽为 76 MHz, 24 kW 峰值功率下测得的 83 MHz 的光谱线宽仅比其理论极限宽 10% 左右, 得益于锯齿波信号光强对时间的变化率为常数的性质, 实验中 SPM 效应导致的光谱展宽得到了显著的抑制. 而通过信号发生器控制 EOIM 使种子光脉冲为脉宽 7.5 ns 的高斯型脉冲时, 种子光经过第 2 级包层泵浦预放大级、峰值功率为 1.5 kW 时, 其光谱即发生了非常明显的展宽, 如图 5(b). 进一步改变锯齿波信号的脉冲宽度, 使放大器输出脉冲宽度为 5.9 ns 和 7.5 ns, 分别在

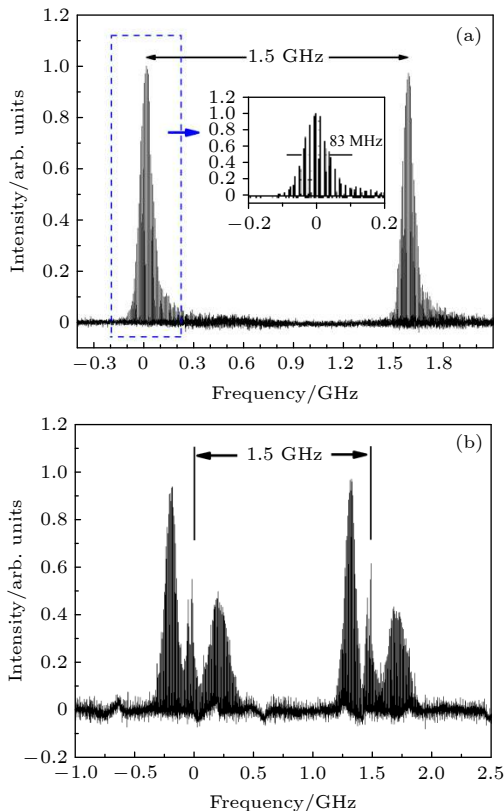


图 5 (a) 使用锯齿波形时主放大器最高输出功率为 24 kW 时的激光线宽; (b) 使用高斯波形时预放大级输出的激光线宽 (脉宽 7.5 ns, 峰值功率 1.5 kW)

Fig. 5. Measured spectral linewidths of (a) the sawtooth pulse at the maximum peak power of 24 kW and (b) the Gaussian-shaped pulse after being pre-amplified to a peak power of 1.5 kW with a pulse width of 7.5 ns.

峰值功率为 24 kW 和 20 kW 时测得了 88 MHz 和 70 MHz 的光谱线宽. 图 6 给出上述锯齿波形高功率光纤 MOPA 输出光谱线宽与其理论变换极限的对比, 可以看到其光谱线宽都接近理论变换极限, 充分验证了采用锯齿波形脉冲是抑制高功率光纤激光 MOPA 中 SPM 导致的光谱展宽、获得窄线宽单频激光输出的有效技术途径.

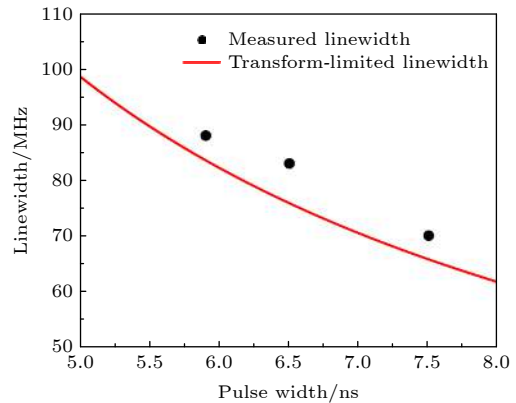


图 6 锯齿波脉冲理论时间带宽积极限 (实线) 和实验中测得的不同脉宽锯齿波形光谱线宽 (圆点)

Fig. 6. Theoretical transform-limited spectral linewidth of the sawtooth pulses (line) and the measured spectral linewidths at different pulse widths (solid circle).

4 结 论

本文研究了采用时域波形为锯齿波的脉冲种子光对高功率光纤激光放大器中 SPM 导致的光谱展宽现象进行抑制的方法, 结合有源光纤长度的优化抑制 SBS 效应, 实验实现了 1064 nm 掺 Yb 光纤激光 MOPA 的高功率窄线宽输出. 获得了平均功率为 3.13 W、脉冲重复频率为 20 kHz、脉冲宽度为 6.5 ns、峰值功率为 24 kW 的单频激光输出, 测得最高输出功率时激光光谱线宽仅为 83 MHz, 接近变换极限; 而对照实验结果显示高斯波形脉冲种子光在放大至峰值功率为 1.5 kW 时就已经发生明显的光谱展宽现象, 说明通过锯齿波形脉冲抑制光谱展宽是实现高功率窄线宽单频光纤激光输出的有效方法.

参考文献

- [1] Qi Y F, Liu C, Zhou J, Chen W B, Dong J X, Wei Y R, Lou Q H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3942 (in Chinese) [漆云凤, 刘驰, 周军, 陈卫标, 董景星, 魏运荣, 楼祺洪 2010 *物理学报* **59** 3942]
- [2] Wang X L, Zhou P, Leng J Y, Du W B, Xu X J 2013 *Chin.*

Phys. B **22** 044205

- [3] Fu S J, Shi W, Feng Y, Zhang L, Yang Z M, Xu S H, Zhu X S, Norwood A R, Peyghambarian N 2017 *J. Opt. Soc. Am. B* **34** A49
- [4] Malinowski A, Vu T K, Chen K K, Nilsson J, Jeong Y, Alam S, Lin D J, Richardson J D 2009 *Opt. Express* **17** 20927
- [5] Steinhausser B, Brignon A, Lallier E, Huignard P J, Georges P 2007 *Opt. Express* **15** 6464
- [6] Lai W C, Ma P F, Xiao H, Liu W, Li C, Jiang M, Xu J M, Su R T, Leng J Y, Ma Y X, Zhou P 2020 *High Power Laser and Particle Beams* **32** 121001 (in Chinese) [来文昌, 马鹏飞, 肖虎, 刘伟, 李灿, 姜曼, 许将明, 粟荣涛, 冷进勇, 马阎星, 周朴 2020 *强激光与粒子束* **32** 121001]
- [7] Petersen E, Shi W, Chavez-Pirson A, Peyghambarian N 2012 *Appl. Opt.* **51** 531
- [8] Broderick R G N, Offerhaus L H, Richardson J D, Sammut A R, Caplen J, Dong L 1999 *Opt. Fiber Technol.* **5** 185
- [9] Shi W, Petersen B E, Leigh M, Zong J, Yao Z D, Chavez-Pirson A, Peyghambarian N 2009 *Opt. Express* **17** 8237
- [10] Yang C, Chen D, Xu S, Deng H, Lin W, Zhao Q, Zhang Y, Zhou K, Feng Z, Qian Q, Yang Z 2016 *Opt. Express* **24** 10956
- [11] Robin C, Dajani I 2011 *Opt. Lett.* **36** 2641
- [12] Tino E, Christian W, Cesar J, Fabian S, Florian J, Hans-Jürgen O, Oliver S, Thomas S, Jens L, Andreas T 2011 *Opt. Express* **19** 13218
- [13] Boggio C M J, Marconi D J, Fragnito L H 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 3808
- [14] Zhang L, Hu J M, Wang J H, Feng Y 2012 *Opt. Lett.* **37** 4796
- [15] Shi C, Zhang H W, Wang X L, Zhou P, Xu X J 2018 *High Power Laser Sci.* **6** e16
- [16] Fang Q, Shi W, Kieu K, Petersen E, Chavez-Pirson A, Peyghambarian N 2012 *Opt. Express* **20** 16410
- [17] Su R T, Zhou P, Ma P F, Lü H B, Xu X J 2013 *Appl. Opt.* **52** 7331
- [18] Zhou P, Huang L, Xu J M, Ma P F, Su R T, Wu J, Liu Z J 2017 *Sci. China Technol. Sci.* **60** 1784
- [19] Agrawal P G 2001 *Nonlinear Fiber Optics* (New York: Academic Press) pp329–334
- [20] Su R T, Ma P F, Zhou P, Chen Z L, Wang X L, Ma Y X, Wu J, Xu X J 2019 *High Power Laser Sci. Eng.* **7** 51
- [21] Huang L, Ma P F, Su R T, Lai W C, Ma Y X, Zhou P 2021 *Opt. Express* **29** 761

High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses^{*}

Sheng Quan¹⁾²⁾ Wang Meng¹⁾²⁾ Shi Chao-Du¹⁾²⁾ Tian Hao¹⁾²⁾
 Zhang Jun-Xiang¹⁾²⁾ Liu Jun-Jie¹⁾³⁾ Shi Wei^{1)2)†} Yao Jian-Quan¹⁾²⁾

1) (*School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

2) (*Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology
(Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

3) (*Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China*)

(Received 14 March 2021; revised manuscript received 16 May 2021)

Abstract

Fiber laser system in master oscillator power amplifier (MOPA) scheme is a promising technique for high-power narrow-linewidth laser output. With modulation-generated pulsed seed laser, the fiber MOPA benefits the flexible temporal behavior. However, the spectral linewidth broadening induced by self-phase modulation (SPM) is the main obstacle to achieving high-power single-frequency laser output with narrow spectral linewidth, especially for pulsed fiber MOPA in which the kilowatts level peak power results in strong nonlinearity. The SPM induced linewidth broadening is related to the derivative of light intensity with respect to time (dI/dt). Theoretically, if the dI/dt of the laser pulse is a constant, the SPM process will not generate any new frequency components. Hence, the linewidth broadening can be suppressed. In this work, we demonstrate a high-power single-frequency Yb fiber amplifier at 1064 nm, in which a sawtooth laser pulse is employed to suppress the SPM induced linewidth broadening, for obtaining the output with near-transform-limited narrow linewidth. The sawtooth-shaped seed pulse train is generated through using an electro-optic intensity modulator to modulate the continuous-wave (CW) output of a single-frequency fiber laser. After being pre-amplified, the seed laser with a pulse repetition rate of 20 kHz is coupled into the main amplifier, in which a piece of 0.9-m-long Yb-doped silica fiber with core and clad diameters of 35 μm and 250 μm , respectively, is used as a gain medium. The seed laser is enhanced to an average power value of 3.13 W under a launched 976-nm pump power value of 11.3 W before the onset of stimulate Brillouin scattering. The pulse energy 157 μJ and the pulse width 6.5 ns give a peak power of 24 kW. The spectral linewidth measured using a scanning Fabry-Perot interferometer at the maximum power is only 83 MHz, which is quite close to the 76-MHz transform-limited linewidth of the 6.5-ns sawtooth-shaped pulse. For comparison, we also conduct an experiment with a common Gaussian-shaped seed laser, in which the spectral linewidth is broadened significantly with a peak power value of only 1.5 kW. The results here reveal that the using of the sawtooth-shaped pulse is a promising technique to suppress the SPM induced spectral linewidth broadening in high-peak-power fiber amplifiers and acquire near-transform-limited narrow-linewidth laser output.

Keywords: single-frequency fiber laser, pulsed fiber laser, self-phase modulation, narrow-linewidth laser

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

DOI: 10.7498/aps.70.20210496

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFF0104603), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975146, 62075159), and the Key Research and Development Program of Shandong Province, China (Grant No. 2019JZZY020206).

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