

基于种子脉冲预整形的 130 μJ 线偏振单频 12 μm 纤芯铒镱共掺光纤激光器*

蒋沛恒^{1)2)#} 史朝督^{1)2)#} 付士杰^{1)2)†} 田浩¹⁾²⁾ 盛泉¹⁾²⁾
史伟^{1)2)‡} 沈琪皓³⁾ 周鼎富³⁾ 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) (天津大学, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

3) (西南技术物理研究所, 成都 610041)

(2024 年 9 月 29 日收到; 2024 年 11 月 15 日收到修改稿)

报道了基于种子脉冲预整形实现的百微焦 1550 nm 线偏振脉冲单频光纤激光器. 通过设计三角形脉冲种子波形, 优化其前沿上升趋势及低强度持续时间, 缓解脉冲激光在放大过程中因增益饱和效应引起的脉冲宽度压缩、激光峰值功率快速增长问题, 实现高能量脉冲单频激光放大. 实验中基于优化设计的脉冲种子波形, 在纤芯直径为 12 μm 的铒镱共掺光纤中, 实现了脉冲宽度 608 ns、能量 130 μJ 、光谱线宽 542 kHz 的 1550 nm 线偏振脉冲单频激光输出.

关键词: 高能量脉冲激光, 单频光纤激光器, 脉冲预整形, 受激布里渊散射效应

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.74.20241371

CSTR: 32037.14.aps.74.20241371

1 引言

1.5 μm 波段脉冲单频光纤激光源在激光测风雷达、大气遥感及空间态势感知等领域应用广泛^[1-5]. 以相干多普勒激光测风雷达为例, 高能量、窄线宽的脉冲激光源可以有力提升系统的探测距离和探测精度. 主振荡功率放大 (MOPA) 结构具有脉冲时域特性可调、激光光束质量优、系统结构紧凑等特点, 已成为实现高能量脉冲单频激光的主要技术方案. 但由于脉冲单频激光自身的窄线宽特

性, 激光功率放大往往受到受激布里渊散射 (SBS) 效应的严重制约^[6-8]. 特别是用于实现高能量激光输出的百纳秒脉冲单频激光, 脉冲持续时间远大于光纤玻璃基质的声子寿命 (约 10 ns), 光波场与声场的相互作用过程导致反向斯托克斯 (Stokes) 光增益快速积累, 激光的 SBS 阈值较低, 脉冲能量水平难以提升^[9,10].

针对这一问题, 研究人员一方面从脉冲放大系统所用增益光纤出发, 通过增加光纤的模场面积来降低激光功率密度, 实现脉冲单频激光能量的提升. 其中, 软玻璃光纤凭借高稀土离子掺杂浓度、

* 国家自然科学基金 (批准号: 62375201, 62275190, 62105240)、天津市自然科学基金 (批准号: 23JCQNJC01740)、天津大学自主创新基金 (批准号: 2023XPD-0020)、中国兵器工业集团有限公司激光器件技术重点实验室开放基金 (批准号: QT23120019)、泰山产业领军人才项目 (批准号: tscx202312163) 和光电信息技术教育重点实验室 (天津大学) 开放基金 (批准号: 2024KFKT007) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: shijie_fu@tju.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: shiwei@tju.edu.cn

低数值孔径等特点, 展现出明显的应用优势^[11-13]. 2021年, Akbulut等^[14]采用长度20—30 cm、模场面积达到1000 μm^2 的保偏掺铒磷酸盐光纤实现了脉冲能量为1.3 mJ的600 ns单频脉冲激光, 激光的光束质量(M^2)仅为1.33 $\times$ 1.18. 但考虑到软玻璃光纤与石英光纤在熔点、机械强度等方面存在的较大差异, 实现无源石英光纤与软玻璃光纤的低损耗、高强度熔接仍存在一定的难度^[15], 此外, 高掺杂软玻璃光纤尚无成熟的商用产品, 这些都在一定程度上限制了这一方案的实际应用. 另一方面, 考虑到SBS效应增益的积累主要来源于光波场与声波场的相互作用过程, 研究人员提出可通过对增益光纤施加轴向的温度或应力梯度来改变Stokes光频移量, 从而抑制信号光放大过程中反向Stokes光的增益积累^[16,17]. 2014年, Zhang等^[18]通过在纤芯直径为10 μm 的保偏铒镱共掺光纤上施加应力梯度将脉冲宽度200 ns的1540 nm脉冲单频光纤放大器的SBS阈值提高了3.4倍, 获得了脉冲能量72.3 μJ 、光谱线宽2.6 MHz的单频激光输出. 同年, Zhang等^[19]采用纤芯尺寸为25 μm 的大模场铒镱共掺光纤结合应力梯度技术进一步提高系统的SBS阈值, 将脉冲能量提高至540 μJ . 值得注意的是, 虽然温度和应力梯度能够在一定程度上抑制Stokes光增益, 提升脉冲单频激光放大系统的能量输出, 但仍存在对温度、振动较为敏感等环境适应性问题, 需要在实际应用中加以考虑.

脉冲激光放大过程中由于增益饱和效应, 脉冲波形往往随着激光功率增加逐渐发生畸变, 脉冲前沿因提取较高的激光增益, 导致强度快速上升, 因而较早达到SBS阈值, 限制了脉冲能量的进一步提升. 研究人员提出针对脉冲波形的预整形技术,

通过对种子激光脉冲波形进行设计, 缓解激光放大过程中因增益饱和效应导致的脉冲前沿陡然增加、脉宽压窄限制脉冲能量放大的问题^[20-22]. 2023年, Zhang等^[23]实验分析方形脉冲、抛物线形脉冲及三角形脉冲在放大过程中的波形畸变程度, 结果表明具有低强度上升沿的三角形脉冲可以有效地缓解增益饱和效应导致的脉冲前沿强度畸高的现象, 实验中利用设计的三角形脉冲波形, 获得了脉冲宽度574 ns、脉冲能量353 μJ 的1548 nm单频脉冲激光输出. 但该工作未涉及三角形脉冲波形优化设计及不同参数下放大脉冲波形演化和SBS阈值等方面的讨论.

本文通过设计三角形种子脉冲波形, 优化脉冲前沿上升趋势及低强度上升部分持续时间, 缓解脉冲放大过程中因增益饱和和导致的脉宽压缩过程, 有效地提升脉冲单频光纤激光放大系统的能量水平. 实验中基于12 μm 纤芯的保偏铒镱共掺光纤, 获得了脉冲能量130 μJ 的1550 nm单频脉冲激光输出, 为该尺寸纤芯下, 脉冲单频激光的最高能量. 得益于放大后较长的激光脉冲宽度, 最高能量时的激光光谱线宽仅为542 kHz. 该工作为高能量脉冲单频光纤激光放大提供了种子脉冲波形的优化思路.

2 三角形脉冲放大波形仿真分析

基于包含Stokes光的脉冲单频铒镱共掺光纤激光器理论模型^[23], 针对三个具有不同上升趋势的三角形种子脉冲放大后波形演化规律进行数值模拟. 图1(a)—(c)中黑色曲线为具有不同上升趋势的脉冲全宽均为1500 ns、峰值功率均为

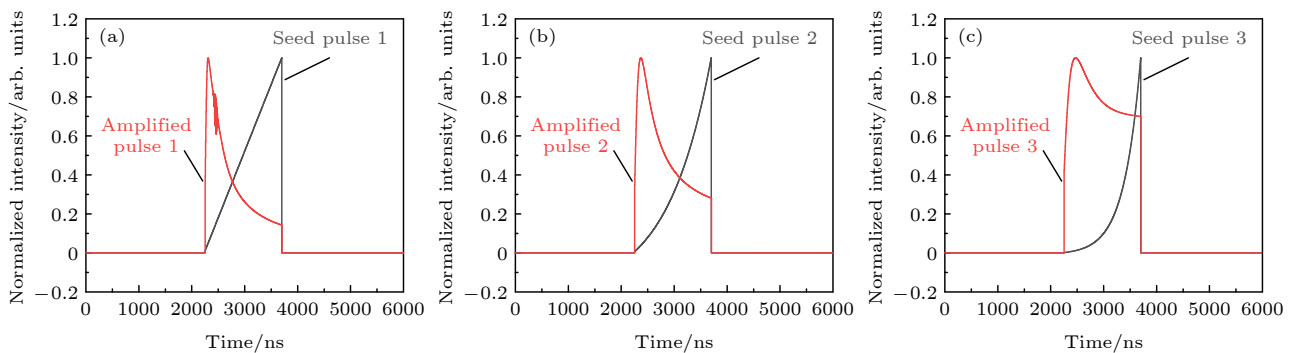


图1 (a)—(c) 不同上升趋势三角形种子脉冲(脉宽分别为732, 445, 215 ns)放大后波形特性仿真分析

Fig. 1. (a)–(c) Simulation analysis of the pulse shape characteristics of the three typical triangle seed pulses with different rising edge (pulse width are 732, 445, 215 ns) during the amplification.

0.2 W 的三角形种子脉冲. 三个波形归一化脉冲强度从 0 增加至 0.1(本文将该强度作为衡量脉冲低强度持续时间的标准)的持续时间分别为 113, 405 和 815 ns, 脉冲宽度(半高全宽)分别为 732, 445 和 215 ns. 三个种子脉冲放大后的波形如图 1(a)—(c) 中红色曲线所示, 由于脉冲 1 具有快速上升的前沿, 对光纤中增益提取能力较强, 放大过程中脉冲波形发生严重畸变. 在泵浦功率为 5 W 的条件下, 脉冲 1 放大后的波形脉冲宽度压缩至 357 ns, 峰值功率为 406 W 达到系统 SBS 阈值, 限制了脉冲能量的进一步提升, 脉冲波形下降沿存在反向 Stokes 光与正向信号光相互作用引起的时域波动. 相比于脉冲 1, 脉冲 2 和脉冲 3 具有缓慢上升的前沿以及较长的低强度上升持续时间, 在相同泵浦功率条件下脉冲 2 和脉冲 3 放大后的波形脉冲宽度为 561 ns 和 1402 ns, 脉冲峰值功率分别为 303 W 和 131 W, 没有达到系统 SBS 阈值, 进一步增加泵浦功率能够获得更高的脉冲能量. 此外, 由于脉冲 3 前沿较长的低强度上升持续时间, 对光纤中增益提取能力较弱, 在泵浦功率增加至 5 W 的过程中脉冲宽度持续展宽. 因此, 我们考虑设计具有较长持续时间低强度上升沿的三角形种子脉冲开展实验研究, 通过减缓种子脉冲上升沿增长趋势, 抑制脉冲放大过程中的脉宽压缩现象, 在脉冲单频激光峰值功率达到 SBS 阈值前获得更高的脉冲激光能量.

3 实验装置

图 2 为 1550 nm 线偏振脉冲单频光纤激光 MOPA 光路示意图. 线宽为 700 Hz、输出功率为 3 mW 的连续波 DBR 型单频光纤激光器作为种子源, 经一级纤芯预放大和一级包层预放大将功率提升至 500 mW. 将设计的三角形脉冲输入到任意波形发生器 (AWG) 中获得电脉冲信号来控制声光

调制器 (AOM), 将连续波单频激光调制为重复频率 10 kHz 的脉冲信号光. 经过 AOM 调制后的脉冲信号光通过一级纤芯预放大和两级包层预放大将平均功率提升至 210 mW 后注入主放大级. 采用能量计 (Ophir PE10-C) 测得注入主放大级的激光脉冲能量为 20.8 μJ , 在重复频率 10 kHz 的条件下, 连续光成分占比较低.

主放大级采用纤芯/包层直径为 12 μm /130 μm 的保偏铒镱共掺光纤 (Coherent PM-EYDF-12/130-XPH) 作为增益介质, 光纤在 915 nm 处的包层吸收系数为 4.1 dB/m, 实验中将其长度优化为 1 m 以提高脉冲单频激光的 SBS 阈值. 整个 MOPA 系统均采用保偏光纤器件, 各放大级间加入带通滤波器 (BPF) 和隔离器 (ISO) 以滤除带内放大自发辐射 (ASE) 并防止反向光损坏前级器件. 主放大级后采用自制的包层模式滤除器 (CPS) 滤除剩余泵浦光, 光纤输出端斜切 8° 角以避免反射光损坏激光系统. 实验中通过主放大级泵浦/信号合束器空余泵浦端口对反向光谱进行监测, 以判断脉冲激光放大系统的 SBS 阈值.

4 结果与分析

实验中对比了三种具有不同脉冲前沿上升趋势的三角形种子脉冲的放大能力, 图 3 为在 AOM 后测得的归一化的种子脉冲波形, 三种波形的脉冲全宽均设置为 1500 ns. 如图 3 中黑色曲线所示的脉冲波形 1, 其前沿快速上升, 归一化脉冲强度从 0 增加至 0.1 的持续时间为 95 ns. 相比于波形 1, 在相同脉冲全宽下波形 2 和波形 3 的前沿强度较低且具有更长时间的低强度上升阶段, 归一化脉冲强度从 0 缓慢增加至 0.1 的持续时间分别为 401 ns 和 869 ns, 如图 3 中红色及蓝色曲线所示. 三种波形脉冲的半高全宽 (FWHM) 分别为 912, 520 和 239 ns. 由功率计 (Ophir PD300-IR) 测得经 AOM

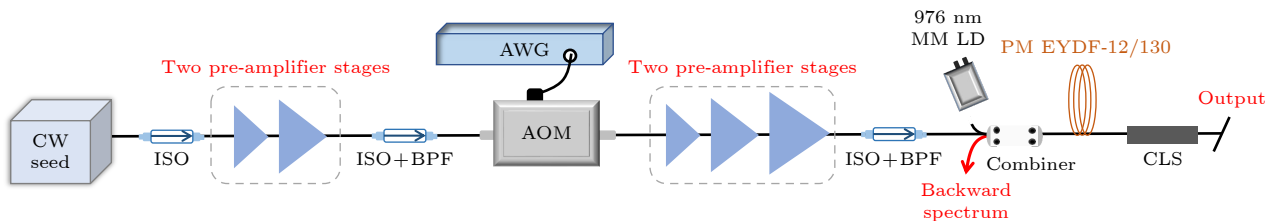


图 2 1550 nm 线偏振脉冲单频光纤激光 MOPA 光路示意图

Fig. 2. Schematic of the 1550 nm linear-polarized pulsed single-frequency fiber MOPA.

调制后的三种波形脉冲激光功率分别为 1.88, 1.19, 0.64 mW, 以此作为种子脉冲进行后续放大实验.

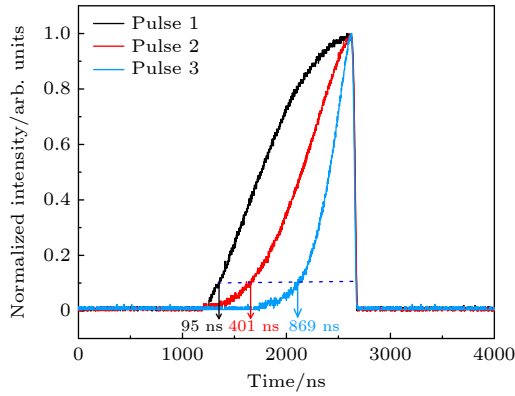


图 3 经 AOM 调制产生的三种脉冲种子波形
Fig. 3. Three pulse profiles for seed laser generated by AOM.

在脉冲放大过程中, 脉冲前沿率先通过有源光纤消耗大量上能级粒子获得激光增益, 脉冲后沿经过有源光纤时由于增益饱和无法提取足够的激光增益导致脉冲波形发生变化. 三种脉冲种子波形经主放大级后的脉冲形状如图 4(a)–(c) 所示. 三种脉冲波形前沿上升趋势的差异, 导致放大过程中脉冲信号光对增益的提取能力不同, 脉冲波形发生了不同程度的畸变. 在主放大级泵浦功率为 4.9 W 时, 种子脉冲 1 放大达到 SBS 阈值, 此时测得的激

光脉冲形状如图 4(a) 中红色曲线所示. 由于种子脉冲前沿较强的增益提取能力, 放大后的脉冲波形呈现前沿快速上升的特点, 前沿持续时间由种子脉冲时的 1400 ns 降低为 105 ns, 脉冲波形畸变严重. 由图 4(d) 所示的主放大级信号光脉冲宽度随泵浦功率变化曲线可知, 脉冲 1 在功率放大过程中由于增益饱和效应, 脉冲宽度持续压缩, 由注入主放大级前的 1141 ns 压缩至 320 ns. 且实验中由于脉冲畸变、脉宽压缩导致的较高峰值功率, 脉冲波形 1 较早出现了 SBS 现象. 需要指出的是, 在该泵浦功率下, 除了在合束器泵浦端口观察到反向 Stokes 光强度与瑞利散射的信号光强度相同, 正向信号光的脉冲后沿观察到明显的时域波动, 这一现象主要由反向 Stokes 光与正向传输的脉冲信号光相互作用导致.

相较于脉冲 1, 脉冲 2 在功率放大过程中表现出更高的 SBS 阈值, 图 4(b) 中红色曲线为泵浦功率为 9.4 W 时测得的激光脉冲波形. 此时信号光仍未达到 SBS 阈值, 仅因主放大级有源光纤增益有限, 激光脉冲能量出现饱和现象, 未对泵浦功率作进一步增加. 可以发现, 通过延长种子脉冲上升沿低强度部分的持续时间, 有效缓解了脉冲放大过程中波形畸变导致的脉冲宽度压缩, 放大后的

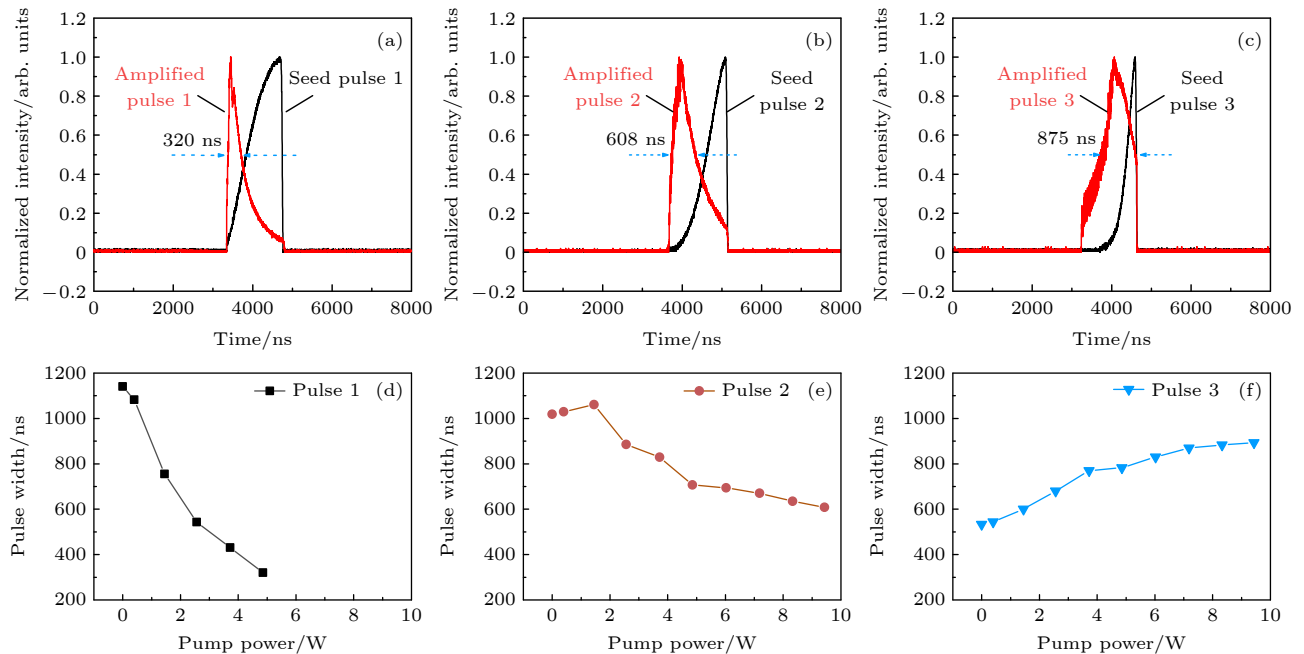


图 4 (a)–(c) 实验设计的三种种子脉冲波形及脉冲放大至最高能量时的波形对比; (d)–(f) 主放大级脉冲激光放大过程中脉冲宽度与泵浦功率的关系

Fig. 4. (a)–(c) Comparison of the designed three typical seed pulses and the pulses amplified to the maximum energy; (d)–(f) the pulse width as a function of pump power in main amplifier stage.

脉冲前沿持续时间为 319 ns, 远长于脉冲波形 1 在 4.9 W 泵浦功率时的 105 ns. 由图 4(e) 可以观察到, 随着主放大级泵浦功率的增加, 脉冲 2 的宽度从 1019 ns 先展宽到 1061 ns 后压缩至 608 ns, 与放大前种子脉冲的宽度接近. 脉冲 3 具有持续时间更长的低强度上升沿, 因此脉冲前沿的增益提取能力更弱, 导致其放大后的脉冲仍具有较长的上升沿. 如图 4(c) 所示, 在泵浦功率同为 9.4 W 时, 脉冲前沿的持续时间仍能达到 831 ns. 由于脉冲 3 较窄的初始脉冲宽度以及较长持续时间的低强度上升沿, 从图 4(f) 所示的脉冲宽度演化曲线可知, 随着主放大级泵浦功率的增加, 脉冲 3 的宽度呈现持续展宽的特点, 脉冲宽度从 533 ns 逐渐增加至 875 ns.

实验中采用能量计对三种波形脉冲在主放大级不同泵浦功率下的脉冲能量进行了测量, 结果如图 5(a) 所示. 结合图 4 所示的脉冲宽度, 计算得到图 5(b) 所示的脉冲激光峰值功率. 三种波形脉冲在低泵浦功率下表现出相近的能量放大趋势, 但由于脉冲 1 较为严重的波形畸变和脉宽压缩, 较早出现了 SBS 现象, 脉冲能量仅放大到 104.9 μJ , 此时的脉冲峰值功率约为 328 W. 而对于脉冲 2 和脉冲 3, 随着泵浦功率的增加, 脉冲能量均出现饱和趋势. 此外, 相比于脉冲 2, 脉冲 3 具有强度更低的上升沿, 对上能级粒子提取能力较差, 导致其放大后的脉冲能量较低. 在泵浦功率为 9.4 W 时, 脉冲 2 和脉冲 3 的能量分别达到 130.9 μJ 和 122.7 μJ . 相比于脉冲 1, 脉冲 2 和脉冲 3 功率放大过程中的脉宽压缩现象得到有效的缓解, 使得二者在高脉冲能量的条件下仍能保持较低的激光峰值功率. 如图 5(b) 所示, 在最高泵浦功率 9.4 W 时, 两脉冲的峰值功率仅为 215 W 和 137 W, 均未达到系统的 SBS 阈值, 反向光谱中所观察到的 Stokes 光强度仍较弱. 可以推断, 通过采用大模场的有源光纤, 可将两脉冲的能量进一步提升. 以上实验结果表明, 通过对三角形种子脉冲前沿进行预整形, 合理增加上升沿低强度持续时间, 能够有效地抑制脉冲放大过程中的脉宽压缩现象, 进而缓解峰值功率的增长趋势, 在脉冲单频激光达到 SBS 阈值前, 获得更高的激光能量. 相比于具有快速上升前沿的脉冲波形 1, 实验中采用脉冲波形 2 获得了约 25% 的脉冲能量提升, 同时, 脉冲波形 3 也表现出进一步实现高能量脉冲单频激光的应用潜力.

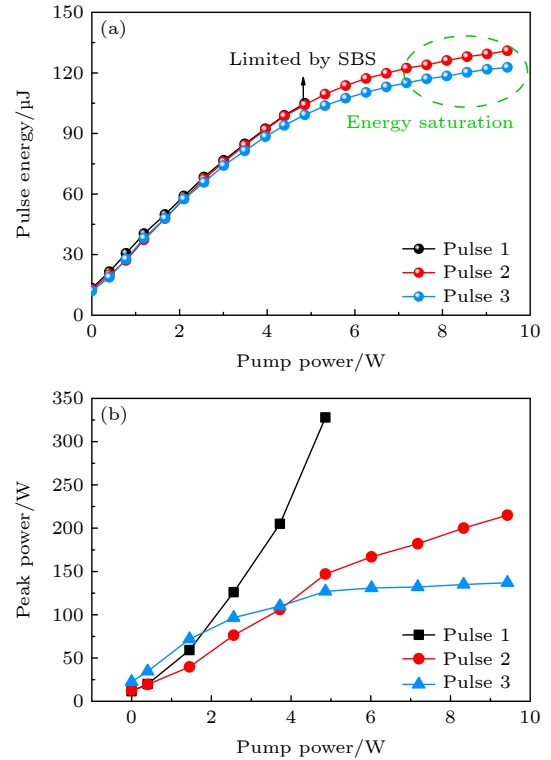


图 5 三种波形脉冲的 (a) 脉冲能量和 (b) 峰值功率与主放大级泵浦功率的关系

Fig. 5. (a) Pulse energy and (b) peak power of the three pulses as a function of pump power in main amplifier stage.

采用延迟自外差法对主放大级不同泵浦功率下脉冲信号光线宽测量的结果如图 6 所示. 脉冲 1 在功率放大过程中线宽呈现持续展宽的趋势, 由 293 kHz 展宽到 616 kHz; 脉冲 2 的激光线宽由 286 kHz 先降低至 213 kHz 后展宽至最大功率下的 542 kHz; 脉冲 3 在放大过程中激光线宽由放大前的 441 kHz 持续压缩至最大功率下的 335 kHz. 三种波形脉冲在放大过程中线宽与图 4 所示的脉冲宽度呈现相反的变化趋势, 反映了脉冲信号时域脉冲宽度和光谱域激光线宽之间的反比关系.

图 7(a) 为脉冲 2 放大至最高能量 130.9 μJ 时测得的激光光谱. 激光中心波长为 1550.1 nm, 光谱在 976 nm 附近可以观察到部分剩余泵浦光. 插图在 1525—1565 nm 范围内的激光光谱, 在 1530—1548 nm 波段存在一定的铒离子 ASE 成分, 信号光相对于 ASE 的光学信噪比为 42 dB. 图 7(b) 为使用半波片和偏振分束镜测得的输出激光偏振特性, 最高能量 130.9 μJ 时激光偏振消光比 (PER) 为 16 dB, 相比于种子源 23 dB 的 PER 出现了一定的劣化, 主要源于主放大级较高泵浦功率产生了一定的连续光成分.

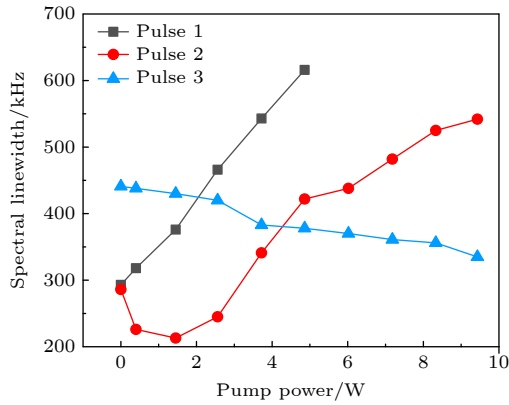


图6 三种波形脉冲放大过程中激光线宽与主放大级泵功率的关系

Fig. 6. Spectral linewidth evolution of the three pulses as a function of pump power in main amplifier.

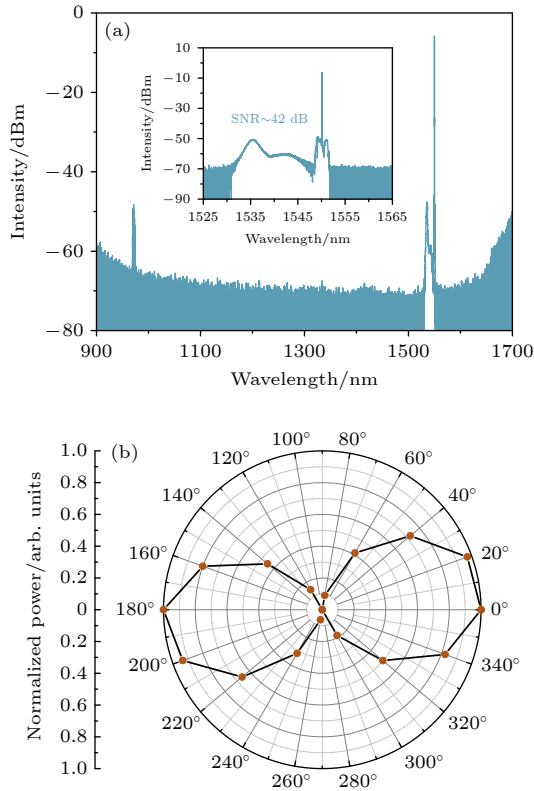


图7 脉冲2放大至最高能量130.9 μJ 时 (a) 光谱和 (b) 偏振消光比

Fig. 7. (a) Spectrum and (b) PER of pulse 2 at the maximum pulse energy of 130.9 μJ .

5 结论

本文研究了采用预整形种子脉冲获得高能量脉冲单频激光的方法, 通过对三角形脉冲的前沿进行预整形, 优化脉冲前沿上升趋势及低强度上升部分的持续时间, 缓解增益饱和效应导致的脉冲宽度

压缩, 为脉冲单频激光的高能量放大提供提升空间. 实验中基于上升沿低强度持续时间为 401 ns、脉冲全宽为 1.5 μs 的三角形脉冲种子, 在纤芯直径为 12 μm 的保偏铒镱共掺光纤中实现了脉冲宽度 608 ns、能量 130 μJ 的 1550 nm 脉冲单频激光输出. 进一步优化脉冲波形设计, 采用大模场增益光纤, 可实现更高能量脉冲单频激光输出.

参考文献

- [1] Kotov L V, Likhachev M E, Bubnov M M, Paramonov V M, Belovolov M I, Lipatov D S, Guryanov A N 2014 *Lasers Phys. Lett.* **11** 095102
- [2] Pichugina Y L, Banta R M, Alan Brewer W, Sandberg S P, Michael Hardesty R 2012 *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **51** 327
- [3] Fu S J, Shi W, Feng Y, et al. 2017 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **34** A49
- [4] Wan P, Liu J, Yang L M, Amzajerjian F 2011 *Opt. Express* **19** 18067
- [5] Khudyakov M M, Lipatov D S, Gur'yanov A N, Bubnov M M, Likhachev M E 2020 *Opt. Lett.* **45** 1782
- [6] Nikles M, Thevenaz L, Robert P A 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1842
- [7] Li Y, Wang Y P, Zhang D M, Xiong C, Li P X 2024 *Infrared Phys. Technol.* **136** 105007
- [8] Liu C, Leng J Y, Qi Y F, Zhou J, Ding Y X, Dong J X, Wei Y R, Lou Q H 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 0502001 (in Chinese) [刘驰, 冷进勇, 漆云凤, 周军, 丁亚茜, 董景星, 魏运荣, 楼祺洪 2011 中国激光 **38** 0502001]
- [9] Tian H, Shi C D, Fu S J, Sheng Q, Sun S, Zhang S, Zhang J X, Shi Z, Jiang P H, Shi W, Yao J Q 2021 *Chin. J. Lasers* **49** 1301005 (in Chinese) [田浩, 史朝督, 付士杰, 盛泉, 孙帅, 张帅, 张钧翔, 石争, 蒋沛恒, 史伟, 姚建铨 2021 中国激光 **49** 1301005]
- [10] Nicholson J W, DeSantolo A, Yan M F, Wisk P, Mangan B, Puc G, Yu A W, Stephen M A 2016 *Opt. Express* **24** 19961
- [11] Wu J F, Jiang S B, Luo T, Geng J H, Peyghambarian N, Barnes N P 2006 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **18** 334
- [12] Fang Q, Shi W, Kieu K, Petersen E, Chavez-Pirson A, Peyghambarian N 2012 *Opt. Express* **20** 16410
- [13] Lee W, Geng J, Jiang S, Yu A W 2018 *Opt. Lett.* **43** 2264
- [14] Akbulut M, Kotov L, Wiersma K, Zong J, Li M, Miller A, Chavez-Pirson A, Peyghambarian N 2021 *Photonics* **8** 15
- [15] Qin G S, Guo X H, Jia Z X, Qin W P CN202111465449.1 [2022-01-21] (in Chinese) [秦冠仕, 郭晓慧, 贾志旭, 秦伟平 CN202111465449.1 [2022-01-21]]
- [16] Robin C, Dajani I 2011 *Opt. Lett.* **36** 2641
- [17] Zhang L, Cui S Z, Liu C, Zhou J, Feng Y 2013 *Opt. Express* **21** 5456
- [18] Zhang X, Diao W F, Liu Y, Zhu X P, Yang Y, Liu J Q, Hou X, Chen W B 2014 *Appl. Opt.* **53** 2465
- [19] Zhang X, Diao W F, Liu Y, Liu J Q, Hou X, Chen W B 2014 *Appl. Phys. B-Lasers Opt.* **115** 123
- [20] Michalska M, Swiderski J, Mamajek M 2014 *Opt. Laser Technol.* **60** 8
- [21] Malinowski A, Vu K T, Chen K K, Nilsson J, Jeong Y, Alam S, Lin D, J. Richardson D 2009 *Opt. Express* **17** 20927
- [22] Wang Y P, Li Y, Zhang D M, Xiong C, Li P X 2023 *Front. Phys.* **11** 1330573
- [23] Zhang H, Li G Z, Qiao W C, Xu R, Huan H W, Li T, Zhao X, Wang A M, Liu Y Z 2023 *J. Lightwave Technol.* **41** 4822

130 μ J linear-polarized single-frequency 12- μ m-core Er/Yb co-doped fiber amplifier based on pre-shaped seed pulse*

JIANG Peiheng^{1)2)#} SHI Chaodu^{1)2)#} FU Shijie^{1)2)†} TIAN Hao¹⁾²⁾

SHENG Quan¹⁾²⁾ SHI Wei^{1)2)‡} SHEN Qihao³⁾

ZHOU Dingfu³⁾ YAO Jianquan¹⁾²⁾

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

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

3) (Southwest Institute of Technical and Physics, Chengdu 610041, China)

(Received 29 September 2024; revised manuscript received 15 November 2024)

Abstract

Stimulated Brillouin scattering (SBS) is the major barrier in the process of energy scaling for pulsed single-frequency fiber master oscillator power amplifier (MOPA). Due to gain saturation effect, the laser pulse profile will be gradually distorted with the increase of pump power, which induces steep leading edge and narrower width for the amplified pulses. The resulting laser peak power would increase rapidly and thus the SBS threshold is reached earlier to limit the amplification of pulse energy.

A method to obtain high-energy pulsed single-frequency laser by pulse pre-shaping is demonstrated in this work. By designing the leading edge of the triangular pulse, optimizing its rising trend and the duration of the low-intensity rising part, the pulse width compression phenomenon caused by gain saturation is alleviated effectively. Thereafter, the laser peak power increase process can be retarded to reach the SBS threshold so that higher energy can be amplified for the pulsed single-frequency fiber laser. In the experiment, when the seed pulse is optimized to be a triangular pulse with a low-intensity rising edge of 401 ns and a pulse width of 520 ns, a linear-polarized pulse single-frequency fiber laser of 130.9 μ J is obtained in a 12- μ m-core Er/Yb co-doped polarization-maintaining fiber. The pulse width is broadened to 608 ns at the maximum energy. When it is compared with the triangular pulse seed with a rapidly rising leading edge, its maximum energy is increased by about 25%. The optical signal-to-noise ratio and polarization extinction ratio are measured to be 42 dB and 16 dB at the maximum pulse energy, respectively. The corresponding spectral linewidth measured by a delayed self-heterodyne system is 542 kHz. Higher pulse energy can be anticipated by further optimizing the pulse profile and using large-mode-area gain fibers.

Keywords: high energy pulsed laser, single-frequency fiber laser, pulse pre-shaping, stimulated Brillouin scattering

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.74.20241371

CSTR: 32037.14.aps.74.20241371

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62375201, 62275190, 62105240), the National Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 23JCQNJC01740), the Seed Foundation of Tianjin University, China (Grant No. 2023XPD-0020), the Open Foundation of Key Laboratory of Laser Devices and Technology of China North Industries Group Co., LTD (Grant No. QT23120019), the Taishan Industry Leading Talent Project, China (Grant No. tscx202312163), and the Open Foundation of Key laboratory of Opto-electronic Information Technology, Ministry of Education (Tianjin University), China (Grant No. 2024KFKT007).

These authors contributed equally.

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

‡ Corresponding author. E-mail: shiwei@tju.edu.cn



基于种子脉冲预整形的130 μ J线偏振单频12 μ m纤芯铒镱共掺光纤激光器

蒋沛恒 史朝督 付士杰 田浩 盛泉 史伟 沈琪皓 周鼎富 姚建铨

130 μ J linear-polarized single-frequency 12- μ m-core Er/Yb co-doped fiber amplifier based on pre-shaped seed pulse

JIANG Peiheng SHI Chaodu FU Shijie TIAN Hao SHENG Quan SHI Wei SHEN Qihao ZHOU Dingfu YAO Jianquan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 024201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241371

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241371>

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

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

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

物理学报. 2021, 70(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210496>

增益开关线偏振单频脉冲光纤激光器

Gain switched linearly polarized single-frequency pulsed fiber laser

物理学报. 2022, 71(19): 194204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220829>

国产长锥形光纤实现400 W单频单模激光输出

400-W single-mode single-frequency laser output from homemade tapered fiber

物理学报. 2021, 70(20): 204204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210682>

高功率全光纤1.6微米类噪声方形脉冲激光器

High-power 1.6 μ m noise-like square pulse generation in an all-fiber mode-locked laser

物理学报. 2020, 69(16): 164202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200245>

面向空间引力波探测的毫赫兹频段低强度噪声单频激光器

Millihertz band low-intensity-noise single-frequency laser for space gravitational wave detection

物理学报. 2023, 72(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222127>

皮秒激光驱动下的背向受激布里渊散射的光谱结构

Spectral structures of backward stimulated Brillouin scattering driven by a picosecond laser

物理学报. 2021, 70(19): 195202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210568>