



·激光器件·

100 W 级全光纤化线偏振单频光纤放大器^{*}

张 昆, 房一涛, 余 洋, 李 尧, 宋奎岩, 张利明, 张大勇, 赵 鸿

(中国电子科技集团公司第十一研究所 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 报道了一种基于主振荡功率放大结构的全光纤化 1064 nm 线偏振单频光纤放大器。种子源是一个线宽约为 3 kHz 的单频光纤激光器。输出功率为 50 mW 的种子激光经两级掺 Yb 保偏双包层光纤(光纤纤芯直径分别为 10 μm 和 20 μm)和一级手性耦合纤芯增益光纤放大后, 最终获得了输出功率 138 W、光束质量 $M^2 \leq 1.2$ 、偏振消光比优于 18 dB 的高功率单频光纤激光输出。在脉冲调制模式下, 获得了峰值功率 465 W、脉宽宽度约为 500 μs 的线偏振单频光纤激光输出。

关键词: 单频; 光纤激光器; 手性耦合纤芯光纤; 全光纤化

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210281

100 W-level single-frequency fiber amplifier with all-fiber linear polarization

Zhang Kun, Fang Yitao, Yu Yang, Li Yao, Song Kuiyan, Zhang Liming, Zhang Dayong, Zhao Hong

(Key Laboratory of Solid State Laser, the 11th Research Institute of China Electronics Technology Group, Beijing 100015, China)

Abstract: An all-fiber 1064 nm linearly polarized single-frequency fiber laser based on the master oscillator-power amplifier structure is reported. The seed was a single-frequency fiber laser with a line width of about 3 kHz. The seed laser with an output power of 50 mW was amplified by two-stage Yb-doped polarization-maintaining double-cladding (the core diameters are 10 μm and 20 μm respectively) fiber and a stage chirally coupled core gain fiber, and the high power single frequency fiber laser output with an output power of 138 W, the beam quality $M^2 \leq 1.1$ and the polarization extinction ratio better than 18 dB was finally obtained. At the pulse modulation mode, a linearly-polarized single-frequency fiber laser output with a peak power of 465 W and a pulse duration of about 500 μs was obtained.

Key words: single frequency, fiber laser, chiral coupled core fiber, all fiber

单频激光器具有相干长度长等特点, 在引力波探测、冷原子科学、激光相干通信、探测和非线性频率变换等领域具有重要应用价值^[1-3]。与固态激光器相比, 高功率单频光纤激光器具有电光转换效率高、结构紧凑、可靠性高等特点^[4-5], 在实际工程应用中更具发展潜力, 已成为激光技术的重点研究方向之一。

由于单谐振腔的功率较小, 高功率单频光纤激光器一般采用主振荡功率放大器(MOPA)结构提升输出功率。2015年, 美国空军实验室采用纤芯直径 50 μm 的光子晶体光纤作为增益介质, 获得了输出功率大于 400 W 的单频光纤激光输出, 但受限于模式不稳定性(TMI)效应, 输出功率超过 450 W 时光束质量会大幅劣化^[6]。2014年, 美国空军实验室采用纤芯直径 100 μm 的光子晶体光纤作为增益介质, 将单频光纤激光器的输出功率提升至 811 W^[7]。由于具有较大的纤芯直径, 光子晶体光纤和光子带隙光纤可以有效抑制高功率单频激光放大过程中产生的非线性效应, 但由于无法实现全光纤化, 极大限制了上述激光器的发展。全光纤结构激光器在工程应用中具有独特的优势, 但受限于光纤材料, 全光纤化单频激光器的功率提升更具挑战性。2020年, 法国波尔多大学采用商用 30/250 μm 双包层光纤, 实现了 365 W 的线偏振单频光纤激光输出^[8]。2020年, 德国汉诺威激光中心采用 34/250 μm 手性耦合纤芯(3C)光纤实现了全光纤化高功率单频光纤激光输出, 由于受限于模场适配器的工艺水平, 仅实现了 100 W 级功率输出^[9]。2020年, 国防科技大学报道了一种基于大模场锥形光纤的线偏振单频光纤激光器, 该光纤的输入纤

* 收稿日期: 2021-07-13; 修订日期: 2022-02-24

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(6142404200101)

联系方式: 张 昆, nukzhang@163.com。

芯直径为 35 μm 、输出纤芯直径为 56 μm ，由于模场面积较大，550 W 输出功率下光束质量 M^2 退化至约 1.5^[10]。总体上说，为了抑制 TMI 效应，商用全光纤化单频光纤激光器通常选用纤芯直径小于 30 μm 的光纤作为增益介质，锥形光纤等新型光纤可以突破这一限制，有望大幅提升全光纤化单频光纤激光器的功率水平。

本文报道了一种基于 3C 光纤的全光纤化高功率单频光纤放大器，由于对熔接工艺进行了优化，该放大器可在 138 W 输出功率下稳定工作。并且对光纤放大的脉冲特性进行了测试，获得了峰值功率 465 W，脉冲重复频率 100 Hz、脉冲宽度约为 500 μs 的高功率单频光纤激光输出。

1 实验装置

1064 nm 线偏振单频光纤放大器的光学结构如图 1 所示，采用了 MOPA 结构来实现高功率单频激光输出，主要由种子源、两级双包层光纤预放大器和一级 3C 光纤功率放大器组成。通过突破石英光纤和 3C 光纤的低损耗熔接技术，实现了高功率单频放大器的全光纤化。

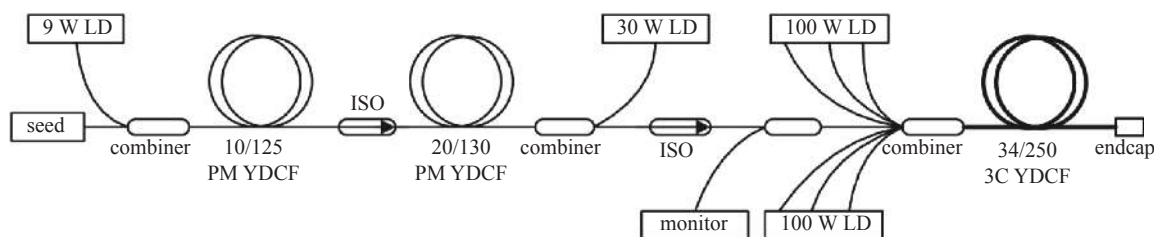


Fig. 1 Optical structure of 1064 nm linearly polarized single-frequency fiber amplifier

图 1 1064 nm 线偏振单频光纤放大器的光学结构图

种子源是一个中心波长为 1064 nm、最大输出功率为 50 mW 的 DFB 型单频光纤激光器，其输出尾纤为 6 μm 纤芯保偏单模光纤，线宽约为 3 kHz。

第一级预放大器采用了一只中心波长为 976 nm、最大功率为 9 W 的激光二极管作为泵浦源。泵浦光和种子源信号光通过一只 (1+1) \times 1 合束器耦合进纤芯直径为 10 μm 的双包层掺 Yb 保偏增益光纤。增益光纤后面熔接一个滤波带宽为 1 nm 的隔离器 (ISO)，起到 ASE 滤除和级间隔离的作用。为了降低熔接损耗，隔离器的输出尾纤与第二级预放大器的增益光纤纤芯尺寸完全一致。第一级预放大器的输出功率被设置为 600 mW，继续增大输出功率有出现增益饱和的趋势，会对后续放大产生不利的影响。

为了更有效地抑制放大自发辐射 (ASE) 的产生，第二级预放大器采用了后向泵浦结构。放大器中使用了长度为 3.3 m 的 20/125 μm 保偏双包层掺 Yb 光纤 ($NA=0.06$) 作为增益介质。由于采用了低数值孔径设计，该光纤对 976 nm 泵浦光的包层吸收系数约为 4.3 dB/m。中心波长为 976 nm 的泵浦光通过一个后向 (1+1) \times 1 合束器耦合进入增益光纤。与第一级预放大器相似，在合束器之后连接了一个滤波带宽为 3 nm 的滤波隔离器。为了对反向回光的光谱和功率进行监测，在滤波隔离器和功率放大级之间加入了一个分光比为 1/99 抽头耦合器。当泵浦注入功率超过 30 W 时，输出激光的 ASE 成分开始增加。因此泵浦注入功率被设置为 28 W，此时第二级预放大器后的输出功率为 7.2 W。

功率放大器采用了 6 支最大输出功率为 100 W 的波长锁定 976 nm 激光二极管作为泵浦源，通过脉冲调制泵浦源可实现放大器的长脉冲输出。泵浦光和预放大后的信号光均通过一个 (6+1) \times 1 合束器耦合进入增益光纤，该合束器对信号光和泵浦光的损耗均小于 8%。合束器的信号输入光纤为与预放大器相匹配的 20/130 无源光纤、输出光纤为长度 2.2 m 的 34/250 μm 双包层 3C 掺 Yb 光纤 (芬兰 nLight 公司生产)。这种增益光纤最大的特点是在主纤芯的周围环绕了一个直径为 10 μm 侧芯，可以保证放大器在高功率输出状态下仍可维持单横模运转，其端面如图 2 所示。该光纤的纤芯数值孔径为 0.065，内包层数值孔径为 0.48，对 976 nm 泵浦光的包层吸收系数约为 8.1 dB/m。考虑到实际工程应用的便利性，没有采用温度或应力梯度的方法提升放大器的 SBS 阈值功率，直接将增益光纤固定在直径为 35 cm 的散热盘上。在增益光纤输出端熔接了一个直径为 3.5 mm 的光纤端帽，以降低光纤端面反射引起的干扰振荡并提升端面的抗损伤阈值。

2 实验结果

放大器的斜效率曲线如图 3 所示，输出功率基本随着功率放大器注入泵浦功率线性增长，斜率效率约为 69%。受限于目前的熔接工艺，泵浦注入功率被限制在 200 W，继续增大注入功率会大大增加 (6+1) \times 1 合束器的损

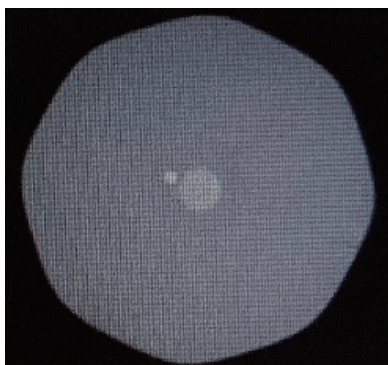


Fig. 2 End face of the 3C fiber
图 2 3C 光纤的端面图

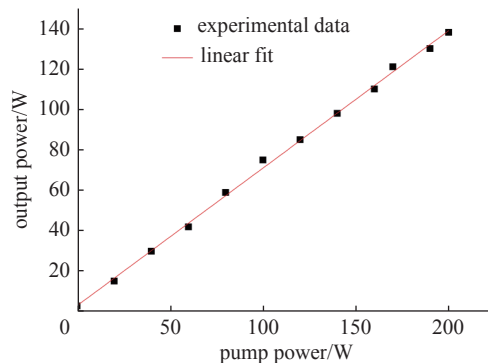


Fig. 3 Slop efficiency of the single-frequency fiber amplifier
图 3 单频光纤放大器的斜效率曲线

伤概率。当泵浦注入功率为 200 W 时,放大器的输出功率为 138 W,且没有出现效率下降的现象,说明该增益光纤具备实现更高功率单频激光输出的潜力。通过测量后向功率对 SBS 效应进行监测,在放大过程中后向监测功率没有出现非线性增长的情况,说明在最大输出功率下仍然未出现 SBS 效应。后续熔接工艺提升后,增加泵浦功率便可实现输出功率的提升。

采用光谱分析仪对输出光谱和回光光谱都进行了测量,光谱形态在不同功率下基本相同。图 4 为最大输出功率时的输出激光光谱图,激光的中心波长与种子源保持一致,输出激光光谱信噪比大于 40 dB, ASE 得到了有效的抑制。采用光束质量分析仪对不同功率下的光斑形态和光束质量进行了测量,光束质量基本不随着输出功率提升而劣化。如图 5 所示,在最大输出功率时,激光器仍能维持单模运转。光束质量 M^2 的测量结果 ≤ 1.2 ,其中 $M^2_x=1.122$, $M^2_y=1.142$ 。搭建了线宽测试系统对输出激光的线宽进行测量,图 6 为输出功率 138 W 时的线宽图,激光线宽约为 3 kHz,基本与种子光保持一致。采用消光比测试仪对输出激光的偏振消光(PER)比进行了测试,不同输出功率下的输出激光偏振消光比如图 7 所示,随着功率的增加,偏振消光的下降趋势并不明显。当输出功率达到 138 W 时,

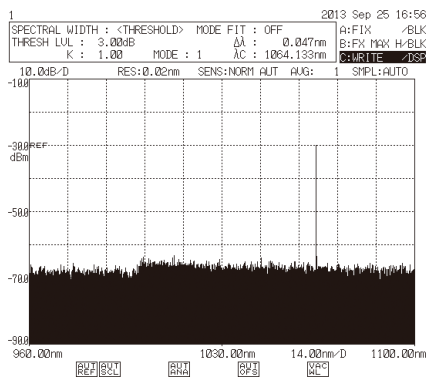


Fig. 4 Laser spectrum at the maximum output power
图 4 最大输出功率时的输出激光光谱图

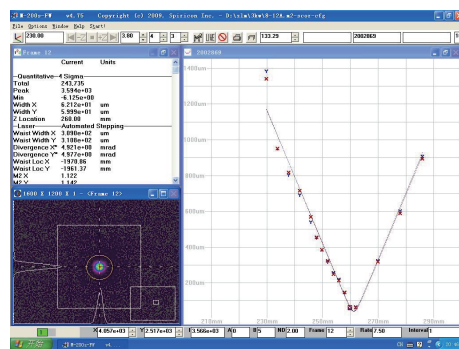


Fig. 5 Spot morphology and beam quality
图 5 最大功率下的光斑形态和光束质量

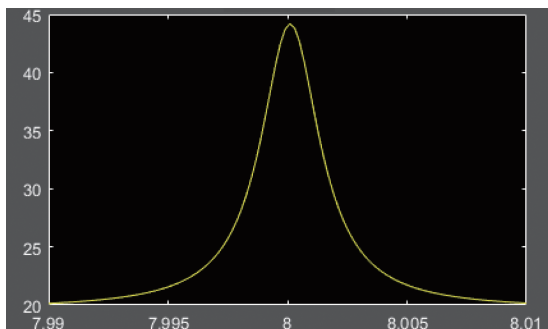


Fig. 6 Laser line-width at 138 W output power
图 6 输出功率 138 W 时的激光线宽

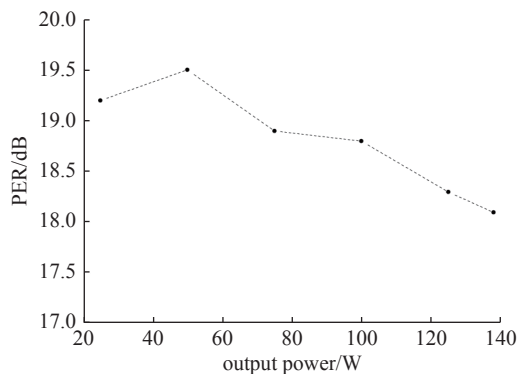


Fig. 7 Polarization extinction ratio at different output power
图 7 不同输出功率下的偏振消光比

偏振消光比仍能保持在 18 dB 以上。

最后, 结合相干探测系统的要求, 测试了脉冲泵浦条件下放大器的输出特性。采用示波器和光电探测器对输出激光的脉冲波形进行了测试, 脉冲波形与泵浦驱动的波形基本保持一致。图 8 为满功率工作状态下的激光脉冲波形图, 输出激光的重复频率为 100 Hz、脉冲宽度约为 500 μs , 上升沿约为 30 μs 。此时放大器的输出功率为 25.9 W, 对应的脉冲峰值功率约为 465 W, 输出功率的提升仅受限于泵浦功率。长脉冲状态时的线宽与连续状态基本相同, 可以说明该激光器在连续状态下的 SBS 阈值也大于 465 W。

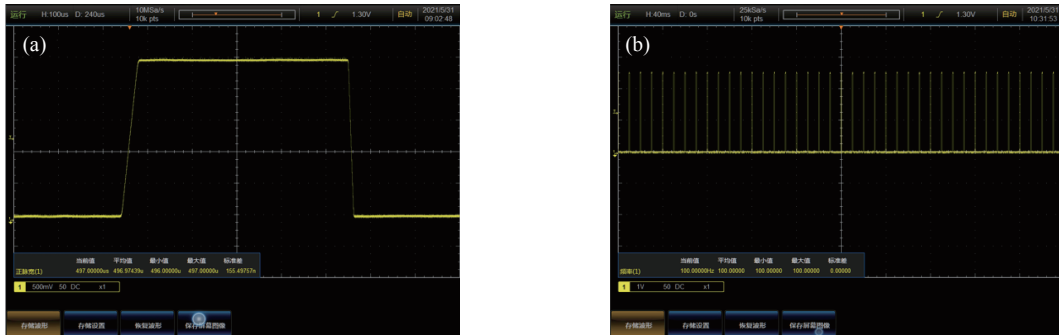


Fig. 8 Laser pulse waveform and repetition of the pulsed laser

图 8 激光脉冲波形及输出激光的重复频率

3 结 论

报道了一种以 DFB 单频光纤激光器为种子光的高功率单频线偏振光纤放大器。由于采用 3C 光纤作为功率放大器的增益光纤, SBS 效应和 TMI 效应都得到了有效抑制。受限于熔接点的热效应, 放大器的稳定工作功率被限制在 138 W。在长脉冲调制模式下, 峰值功率达到 465 W 时仍未出现 SBS 效应, 通过提升泵浦功率便可提升输出峰值功率, 说明了该光纤放大器具有输出 500 W 级单频激光的潜力。下一步的工作重点是通过提升熔接工艺, 提升全光纤化 3C 光纤放大器的输出功率, 并对噪声等参数进行详细测试。

参考文献:

- [1] Winkelmann L, Puncken O, Kluzik R, et al. Injection-locked single-frequency laser with an output power of 220 W[J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(3): 529-538.
- [2] Fu Shijie, Shi Wei, Feng Yan, et al. Review of recent progress on single-frequency fiber lasers [Invited][J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A49-A62.
- [3] Hu Jimeng, Zhang Lei, Liu Hongli, et al. High power room temperature 1014.8 nm Yb fiber amplifier and frequency quadrupling to 253.7 nm for laser cooling of mercury atoms[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30958-30963.
- [4] Carlson C G, Dragic P D, Price R K, et al. A narrow-linewidth, Yb fiber-amplifier-based upper atmospheric Doppler temperature lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 451-461.
- [5] 张昆, 周寿桓, 李尧, 等. 142 W 高峰值功率窄线宽线偏振脉冲光纤激光器[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49: 0405003. (Zhang Kun, Zhou Shouhuan, Li Yao, et al. 142 W high peak power narrow-linewidth linearly polarized pulsed fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49: 0405003)
- [6] Gu Guancheng, Kong Fanting, Hawkins T, et al. Ytterbium-doped large-mode-area all-solid photonic bandgap fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13962-13968.
- [7] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.
- [8] Dixneuf C, Guiraud G, Bardin Y V, et al. Ultra-low intensity noise, all fiber 365 W linearly polarized single frequency laser at 1064 nm[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 10960-10969.
- [9] Hochheim S, Steinke M, Wessels P, et al. Single-frequency chirally coupled-core all-fiber amplifier with 100 W in a linearly polarized TEM₀₀ mode[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 939-942.
- [10] 来文昌, 马鹏飞, 刘伟, 等. 全光纤单频光纤放大器实现 550 W 近衍射极限输出[J]. *中国激光*, 2020, 47: 0415001. (Lai Wenchang, Ma Pengfei, Liu Wei, et al. 550-W single-frequency all-fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47: 0415001)