

142 W 高峰值功率窄线宽线偏振脉冲光纤激光器

张 昆, 周寿桓, 李 尧, 张利明, 余 洋, 张浩彬, 朱 辰, 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 (MOPA) 结构工作的全光纤窄线宽线偏振纳秒脉冲光纤激光器。脉冲种子源是由一个分布反馈直腔型 (DFB) 单频光纤激光器被光电调制器进行强度调制后产生的。为了抑制受激布里渊散射 (SBS) 效应, 脉宽被调节为 3 ns, 并且种子源线宽被相位调制器展宽为 2.9 GHz。经两级保偏掺 Yb³⁺ 光纤放大器放大后, 获得了平均功率 142 W, 重复频率 1 MHz, 脉冲宽度 2.88 ns, 峰值功率 49.3 kW 的脉冲激光输出。在最大输出功率时, 激光光束质量因子 M^2 约为 1.15, 偏振消光比 (PER) 大于 15.4 dB。

关键词: 光纤激光器; 高峰值功率; 受激布里渊散射; 窄线宽

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0405003

142 W high peak power narrow-linewidth linearly polarized pulsed fiber laser

Zhang Kun, Zhou Shouhuan, Li Yao, Zhang Liming, Yu Yang, Zhang Haobin,
Zhu Chen, Zhang Dayong, Zhao Hong

(Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, No.11th Research Institute of China Electronics
Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: An all fiber linearly polarized narrow-linewidth nanosecond pulsed fiber laser based on master oscillator power amplifier (MOPA) structure was reported. The pulsed seed was generated by modulating a single-frequency distributed feedback (DFB) fiber laser using an electro-optic intensity modulator. In order to suppress stimulated Brillouin scattering (SBS), the pulse width was set to be 3 ns and the linewidth of seed was broadened to be 2.9 GHz by a phase modulator. After amplifying by two stages polarization maintaining Yb³⁺ doped fiber amplifier chain, the output pulse laser was obtained with an average power of 142 W, a repetition rate of 1 MHz, a pulse duration of 2.88 ns, corresponding to peak power of 49.3 kW. At maximum output power, the laser beam quality M^2 was ~ 1.15 and the polarization extinction ratio (PER) was >15.4 dB.

Key words: fiber laser; high peak power; stimulated Brillouin scattering; narrow linewidth

收稿日期: 2019-12-07; 修订日期: 2020-01-09

作者简介: 张昆 (1985-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光纤激光器方面的研究。Email: nukzhang@163.com

0 引言

高重频脉冲光纤激光器由于具有电光效率高、光束质量好、可靠性高等特点,在工业加工、光电干扰对抗等领域都有广阔的应用前景^[1-4]。与宽谱脉冲光纤激光器相比,窄线宽纳秒脉冲光纤激光器在激光雷达、遥感探测、非线性频率变换、激光光谱合成和相干合成等领域都更具应用价值^[5-7],已成为光纤激光器的热点研究方向之一。

由于高峰值功率脉冲振荡器输出激光的线宽通常较宽,目前大多采用 MOPA 结构实现窄线宽脉冲光纤激光输出。2011 年,美国 NP 公司 Shi 等人采用纤芯直径 25 μm 的掺 Tm 光纤作为增益介质,获得了峰值功率 63 kW,脉冲宽度 15 ns 的窄线宽激光输出,但由于掺杂浓度过高,输出功率仅为瓦级^[8]。2013 年,美国诺格公司 Teodoro 等人采用纤芯直径 100 μm 的光子晶体光纤作为增益介质,获得了峰值功率 1.5 MW,脉冲宽度 1.55 ns,线宽 60 GHz 的脉冲激光输出,但由于难以实现全光纤化,限制了激光器平均功率的提升和工程化应用^[9]。2018 年,西安电子科技大学的李川等人报道了一种脉冲宽度为 2.8 ns、峰值功率为 31 kW、重复频率为 1.59 MHz、偏振消光比为 14.5 dB 的保偏全光纤激光器,该激光器峰值功率的进一步提高受限于 SBS 效应^[10]。2015 年,国防科技大学 Su 等人采用相位调制技术,对 SBS 效应进行了有效抑制,当激光器重复频率工作在 100 MHz、脉冲宽度为 3.5 ns 时,

激光输出功率近 293 W,但由于光纤放大器的纤芯较细,峰值功率仅为 3.9 kW^[11]。总体上看,为了实现高光束质量输出,全光纤化脉冲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。由于纤芯直径较细,放大过程中极易产生受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)和自相位调制(SPM)等非线性效应,这严重制约了窄线宽纳秒脉冲光纤激光峰值功率的提升^[12,13]。

文中报道的光纤激光器采用了 MOPA 结构,由于优化了光纤放大器结构并使用相位调制技术将单频激光进行了展宽,非线性效应和放大的自发辐射(ASE)都得到了高效抑制。在重复频率为 1 MHz 时,获得了平均功率 142 W,脉冲宽度 2.88 ns,光谱信噪比大于 45 dB,偏振消光比大于 15.4 dB 的高峰值功率近衍射极限窄线宽线偏振纳秒脉冲激光输出。

1 实验装置

MOPA 结构窄线宽线偏振纳秒脉冲光纤激光器的实验原理如图 1 所示,激光器由种子源(Seed),预放大器(Pre-amplifier)和功率放大器(Power amplifier)三部分组成。单频连续激光种子源是 NKT 公司生产的分布反馈直腔型单频光纤激光器,其最大输出功率为 100 mW、线宽小于 20 kHz、中心波长为 1 062.8 nm,短直腔的设计保证 GHz 量级的自由光谱范围,通过在增益光纤上刻写相移光栅实现单频输出。

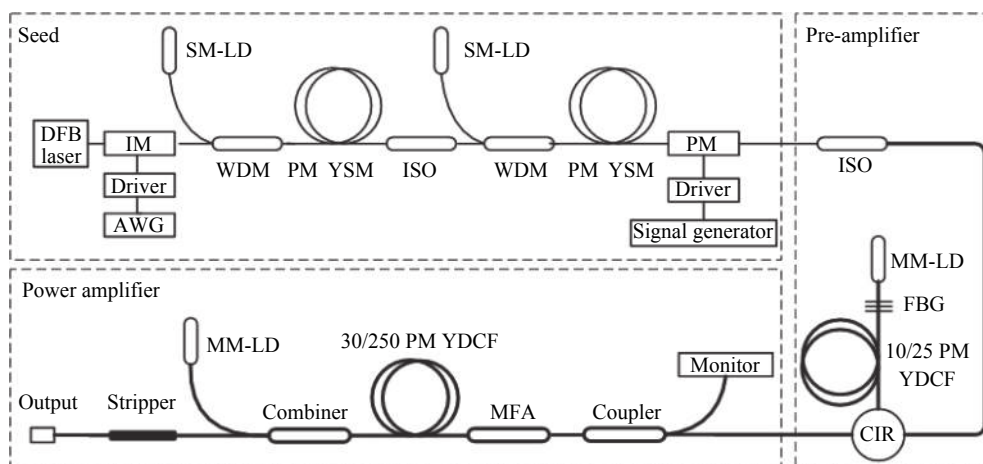


图 1 窄线宽脉冲光纤激光器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the pulsed narrow-linewidth fiber laser

为了得到纳秒脉冲激光信号,采用 1 个带宽大于 10 GHz 的电光强度调制器 (IM) 对单频连续激光种子源进行斩波。强度调制器的驱动信号为一个自研的任意波形发生器 (AFG), 通过调节任意波形发生器的参数可以对激光的脉冲宽度, 重复频率, 脉冲形状等进行精确控制。在电光强度调制器之后接入 2 个参数完全一致的保偏单模光纤放大器进行功率补偿。该放大器的泵浦源是中心波长为 976 nm、最大功率为 300 mW 的单模尾纤输出 LD, 通过波分复用器 (WDM) 耦合进纤芯直径为 6 μm 的单模掺 Yb^{3+} 保偏增益光纤, 增益光纤后面熔接一个带宽为 3 nm 的滤波光隔离器 (ISO) 进行级间隔离。放大后的激光平均功率增长至 25 mW, 可以为后续放大提供足够强的信号光。为了提升 SBS 阈值功率, 采用相位调制器 (PM) 对单频激光进行光谱展宽, 其带宽 150 MHz, 半波电压 2.5 V, 最大调制电压峰峰值为 40 V。强度调制器的驱动信号为一个自研的信号源, 可以输出频率范围 100 MHz ~ 5 GHz 的正弦射频信号。通过调节信号源频率和调制电压可以对输出激光的光谱宽度及纵模分布进行精确控制。

预放大器采用双程放大结构, 种子激光通过一个珠海光库公司生产的环形器 (Circulator) 耦合进入增益光纤。环形器的三根尾纤均为与增益光纤相匹配的保偏 10 μm /125 μm 双包层光纤。预放大器中使用了长度为 2.5 m 的保偏双包层掺 Yb^{3+} 光纤作为增益介质, 光纤纤芯直径为 10 μm , 值孔径为 0.075, 该光纤对 976 nm 包层泵浦光的吸收系数约为 5.3 dB/m。增益光纤后熔接了一个中心波长为 1 063 nm、带宽为 1 nm 的高反光纤布拉格光栅 (FBG), 实现了激光信号折返和 ASE 高效滤除。泵浦源为 1 个中心波长为 976 nm 的波长锁定 LD, 该 LD 的最大输出功率为 27 W, 输出尾纤为 105 μm /125 μm 光纤, 纤芯数值孔径为 0.22。在预放大器之后连接了一个分光比为 1/99 的抽头耦合器 (tap coupler) 监测反向功率, 当反向功率出现非线性增长时说明 SBS 效应开始出现。预放大器输出的信号光通过自制的模场匹配器 (MFA) 耦合进入功率放大器, 该模场匹配器的输入尾纤为保偏 10 μm /125 μm 双包层光纤、输出尾纤为保偏 30 μm /250 μm 双包层光纤。

功率放大器的增益光纤为 Nufern 公司生产的保

偏 30 μm /250 μm 双包层掺 Yb^{3+} 光纤, 纤芯数值孔径为 0.06, 内包层数值孔径为 0.47, 该光纤对 976 nm 包层泵浦光的吸收系数约为 6.8 dB/m。为了抑制功率放大器的高阶模输出, 将增益光纤盘绕在直径为 9.5 cm 的散热盘上来增大高阶模式的损耗。一个最大输出功率为 300 W 的 976 nm 波长锁定泵浦 LD 通过自制的后向 (1+1) \times 1 光纤合束器注入进增益光纤。光纤合束器的 2 端信号尾纤均为保偏 30 μm /250 μm 双包层光纤, 泵浦臂尾纤为 220 μm /242 μm 光纤。光纤合束器的输出端熔接一个剥除区域长度为 25 cm 的包层光剥离器 (Stripper), 用于滤除放大过程中泄露的部分高阶模式激光和 ASE。包层光剥离器的输出端熔接了一个镀有增透膜的光纤端帽, 以避免光纤端面反射引起的干扰振荡。

2 实验结果

通过调节任意波形发生器的参数, 将连续激光种子源调制为脉宽 3 ns、重复频率 1 MHz 的单频脉冲激光。调制后的激光功率衰减至 20 μW , 线宽约为 300 MHz。

当泵浦注入功率达到 6.5 W 时, 预放大器开始出现增益饱和现象, ASE 成分开始增加, 这对后续放大是极为不利的。因此预放大器的泵浦注入功率被设置为 6 W, 此时激光的输出功率为 2.3 W, 脉冲宽度仍然保持在 3 ns。

功率放大器增益光纤长度与 SBS 阈值功率、光-光转换效率的关系如图 2 所示, 缩短光纤长度可以有效地抑制 SBS 效应, 但会造成激光器效率的下降。最终, 增益光纤的长度选择为 2 m, 约有近 8% 的泵浦光未被吸收利用, 对转换效率的影响较小。

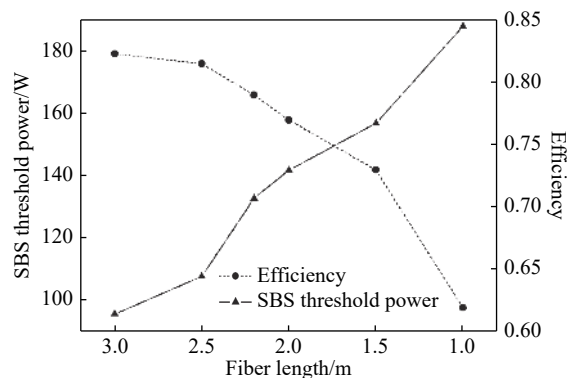


图 2 效率和 SBS 阈值功率随光纤长度的变化

Fig.2 Efficiency and SBS threshold power as a function of fiber length

后向监测功率随输出功率变化曲线如图 3 所示, 当 SBS 效应未发生时, 后向监测功率会随着输出功率线性增长。当相位调制器不工作时, 输出功率超过 106 W 时, 后向功率开始出现非线性增长, 此时输出激光的脉冲宽度为 2.91 ns, 对应的峰值功率为 36.4 kW。当相位调制器工作时, 将射频驱动频率调节至 150 MHz, 并加载合适的电压将种子的线宽展宽至 2.9 GHz, SBS 阈值功率超过了 142 W。继续增加电压可以进一步展宽光谱, 从而提升 SBS 阈值功率, 但考虑到相位调制器的负载能力和激光器的稳定性, 没有进行深度相位调制。

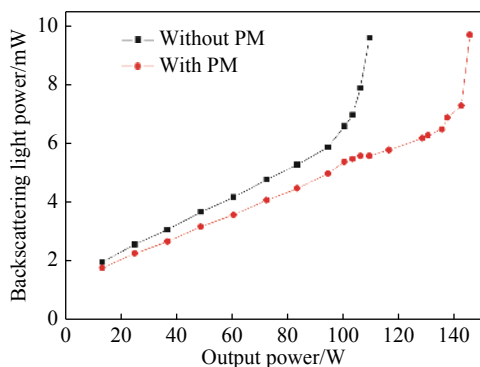


图 3 后向光功率随激光输出功率的变化

Fig.3 Backscattering light power varies with output power

如图 4 所示, 激光输出功率基本随着泵浦功率线性增长, 斜率效率约为 77%。当泵浦注入激光功率达到 182 W 时, 获得了平均功率为 142 W 的脉冲激光输出, 且没有出现效率下降情况, 若进一步增加泵浦功率, 输出激光功率可以继续提高。

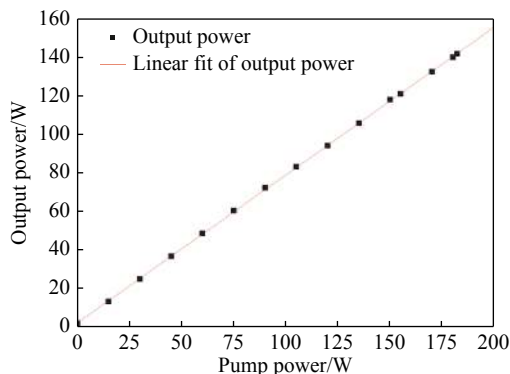


图 4 激光输出功率与泵浦功率的关系

Fig.4 Laser output power as a function of the pump power

采用光谱分析仪对激光光谱进行了测量, 光谱宽度在不同功率下基本维持不变。图 5 为输出功率为

142 W 时的激光光谱图, 激光的中心波长仍然为 1 062.8 nm, 3 dB 光谱宽度为 0.068 nm, 没有观察到 SBS 和 SRS 等非线性效应。而且由于采用了双程预放大结构, ASE 也得到了更有效的抑制, 输出激光光谱信噪比大于 45 dB。

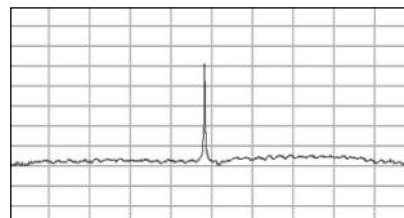


图 5 142 W 输出功率下的激光光谱

Fig.5 Spectrum of the laser at the output power of 142 W

当激光功率达到最大值时, 用光束质量分析仪对输出激光的光束质量进行了测量, 图 6 为实际测试曲线。图中, 蓝色曲线表示 X 方向的光束质量 M_x^2 , 结果为 1.14, 红色曲线为 Y 方向的光束质量 M_y^2 , 结果为 1.15。

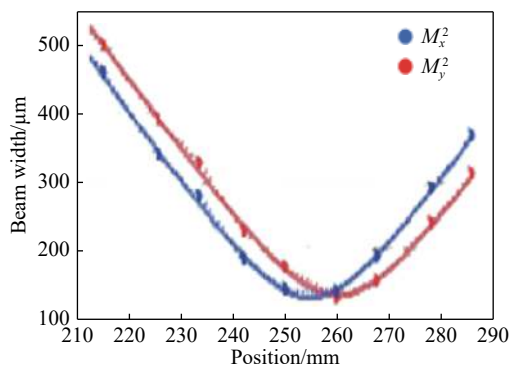


图 6 输出激光的光束质量

Fig.6 Beam quality of output laser

采用高速示波器和光电探测器对输出激光的脉冲波形进行了测试, 随着输出功率的增加, 脉冲宽度会逐渐减小。图 7 为满功率工作状态下的激光脉冲波形图。如图 7(a) 所示, 脉冲波形在放大过程中基本维持不变, 前沿略有压窄, 平均脉冲宽度压缩至 2.88 ns, 脉宽的标准差约为 35.4 ps。如图 7(b) 所示, 激光器输出的脉冲重复频率仍然维持在 1 MHz, 没有出现次脉冲等不稳定现象。

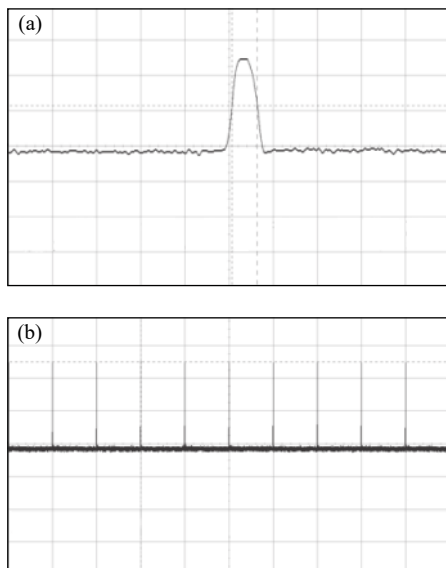


图 7 最大功率输出状态下的脉冲波形 (a) 脉冲宽度; (b) 脉冲重频
Fig.7 Pulse shape at the maximum output power(a)pulse width; (b)pulse repetition

采用消光比测试仪对输出激光的偏振消光比进行了测试, 偏振消光比与输出功率的对应关系如图 8 所示, 随着功率的增加, 偏振消光比会逐渐下降, 且起伏波动加剧, 这是由于高功率激光产生的感应双折射会对保偏光纤的快轴产生扰动。当输出功率为 142 W 时, 偏振消光比的均值为 15.7 dB, 最小值为 15.4 dB。

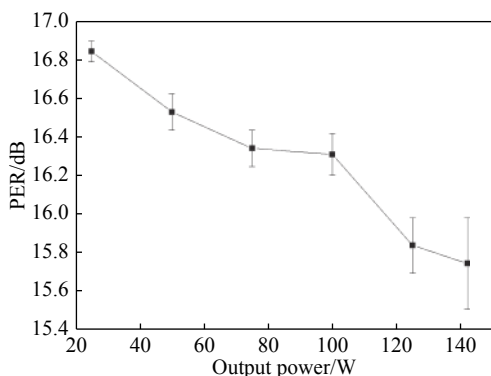


图 8 不同输出功率下的偏振消光比
Fig.8 PER at different output power

3 结 论

报道了一种以电光调制斩波的分布反馈直腔型单频光纤激光器为种子光源的高峰值功率窄线宽线偏振纳秒脉冲光纤激光器。由于使用相位调制器将种子激光的线宽展宽为 GHz 量级, SBS 阈值功率大幅提升。当种子被调制为脉宽 3 ns、重复频率 1 MHz

的单频脉冲激光时, 激光器的峰值功率可达 49.3 kW。

下一步的工作重点是通过提高光谱展宽能力以进一步提升 SBS 阈值功率, 主要手段包括优化相位调制信号种类和提升相位调制器电压负载能力。由于激光器的峰值功率高、线宽窄和高可靠性, 这种全光纤窄线宽纳秒脉冲激光器在相干探测、相干合成以及光谱合成等领域具有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] Wang Lixin, Cai Jun, Jiang Peipei, et al. All fiberized high power linear polarized pulsed ytterbium-doped fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 350-354. (in Chinese)
- [2] Lin Dejiao, Alam Shaif-ul, Shen Yonghang, et al. Large aperture PPMg:LN based high-power optical parametric oscillator at 3.8 μm pumped by a nanosecond linearly polarized fiber MOPA [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15008-15014.
- [3] Salleo A, Sands T, Génin F Y. Machining of transparent materials using an IR and UV nanosecond pulsed laser [J]. *Applied Physics A*, 2000, 71(6): 601-608.
- [4] Deng Yongli, Li Qing, Huang Xuejie. Analysis of laser cutting of lithium-ion power battery pole piece [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 103-111. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] Chen Tao, Wei Kaihua, Jiang Peipei, et al. High-power multichannel PPMg:LN-based optical parametric oscillator pumped by a master oscillation power amplification-structured Q-switched fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(28): 6881-6885.
- [7] Su Rongtao, Zhou Pu, Ma Yanxing, et al. 1.2 kW average power from coherently combined single-frequency nanosecond all-fiber amplifier array [J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(12): 122702.
- [8] Shi Wei, Petersen Eliot B, Nguyen Dan T, et al. 220 μJ monolithic single-frequency Q-switched fiber laser at 2 μm by using highly Tm-doped germanate fibers [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3575.
- [9] Teodoro F D, Morais J, McComb T S, et al. SBS-managed high-peak-power nanosecond-pulse fiber-based master oscillator power amplifier [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2162-2164.
- [10] Li Chuan, Han Yiping, Zhao Wenjuan. 31 kW narrow-linewidth

- linearly polarized nanosecond polarization-maintaining all-fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 126–130. (in Chinese)
- [11] Ran Yang, Su Rongtao, Ma Pengfei, et al. 293 W, GHz narrow-linewidth, polarization maintaining nanosecond fiber amplifier with SBS suppression employing simultaneous phase and intensity modulation [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25896.
- [12] Zhao Lijuan, Li Yongqian, Xu Zhiniu. Theoretical calculation of Brillouin scattering spectrum and SBS threshold in multimode fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 93–98. (in Chinese)
- [13] S Vu K T, Malinowski A, Richardson D J, et al. Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond fiber MOPA system [J]. *Optics Express*, 2006, 14(23): 10996–11001.