

# MOPA 结构的单频纳秒脉冲全光纤激光器

粟荣涛 周 朴 肖 虎 王小林 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 报道了一台主振荡功率放大(MOPA)结构的单频脉冲光纤激光器。对线宽为 20 kHz、工作波长为 1064 nm 的连续单频激光进行强度调制,得到了平均功率为 0.5 mW 的单频脉冲种子激光。首先,采用三级掺 Yb 光纤放大器将种子激光进行预放大,获得了 2.7 W 的平均功率。然后,以纤芯直径和内包层直径分别为 30  $\mu\text{m}$  和 250  $\mu\text{m}$  的双包层掺 Yb 光纤为主放大器,在抽运光功率为 87.1 W 时,获得了重复频率为 12 MHz、脉宽约 10 ns、峰值功率为 486.7 W 的单频脉冲激光输出,平均功率达 58.4 W。

**关键词** 激光器;脉冲激光;单频;主振荡功率放大器

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1102013

## MOPA Structured Single-Frequency Nanosecond Pulsed Laser in All Fiber Format

Su Rongtao Zhou Pu Xiao Hu Wang Xiaolin Xu Xiaojun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** A master oscillator power amplifier (MOPA) structured pulsed fiber laser is reported. The single-frequency pulse seed, with the average power of 0.5 mW, is obtained by externally modulating a continuous wave laser with linewidth of 20 kHz. The pulse seed is firstly pre-amplified to about 2.7 W of average power with three Yb-doped fiber (YDF) amplifiers. The main amplifier is based on a large-mode-area (LMA) double clad YDF with core diameter of 30  $\mu\text{m}$  and cladding diameter of 250  $\mu\text{m}$ . When the pump power of the main amplifier is 87.1 W, a single-frequency pulsed laser with pulse duration of 10 ns and peak power of 486.7 W is generated. The average output power is 58.4 W.

**Key words** lasers; pulsed laser; single-frequency; master oscillator power amplifier

**OCIS codes** 140.3510; 140.3538; 140.4480; 140.3480; 140.3615

## 1 引 言

高功率脉冲光纤激光器广泛应用于材料处理、激光加工、遥感、激光雷达和非线性光频转换等领域。光纤激光器具有散热性能好、系统结构紧凑、光束质量高等特点,在高功率激光应用领域比传统的固体激光器更具优势。与连续激光器相比,脉冲激光器具有高峰值功率,能够高效地与物质进行相互作用,尤其在激光加工、非线性光频转换等领域表现突出。一般可以通过强度调制<sup>[1]</sup>、调 Q<sup>[2~4]</sup>和锁模<sup>[5~7]</sup>等方法产生脉冲激光。主振荡功率放大

(MOPA)结构<sup>[8]</sup>通过将高品质、低功率的种子激光进行放大,可以得到高光束质量、高功率的激光输出,还能够通过调整种子激光器方便地改变激光参数。李尧等<sup>[9]</sup>研制的基于 MOPA 结构、声光调 Q 的掺 Yb 光纤放大器,得到了平均功率为 103 W 的激光输出,重复频率 50 kHz,脉宽 12.7 ns,峰值功率达 162 kW。周军等<sup>[10]</sup>采用 MOPA 方式,获得了平均功率 150 W 的脉冲放大激光输出。

相干合成和非线性频率转换等应用领域对脉冲激光的频率等特性有特殊要求,研究人员针对此展

**收稿日期**: 2011-06-21; **收到修改稿日期**: 2011-08-23

**作者简介**: 粟荣涛(1984—),男,博士研究生,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: surongtao@126.com

**导师简介**: 许晓军(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事高能固体激光器、大气光学与自适应光学等方面的研究。

E-mail: xuxj@21cn.com

开了相关研究。Moskalev 等<sup>[11]</sup>基于空间结构,利用主动/被动调 Q 的方法,分别获得了平均功率为 11.5 W/2 W、脉宽 40 ns/63 ns、重复频率 10 kHz/7 kHz 的单频脉冲激光。Matthew 等<sup>[12]</sup>采用全光纤结构和主动调 Q 方法,获得了脉宽几十纳秒、平均功率约 100 mW 的单频脉冲激光输出。Carlson 等<sup>[13]</sup>利用掺镱光纤放大器对窄线宽半导体种子激光进行放大,得到脉宽 100  $\mu$ s、重复频率 1 kHz、平均功率 10 W 的脉冲激光输出。Shi 等<sup>[14]</sup>利用电光调 Q 种子激光器和 MOPA 结构获得了脉宽 153 ns、峰值功率为 332 W、重复频率为 20 kHz 左右的单模、单频脉冲激光输出。Geng 等<sup>[15]</sup>利用掺 Tm 光纤的 MOPA 结构,获得了峰值功率达千瓦级,平均功率约 200 mW 的单频脉冲激光输出。

本文基于强度调制和 MOPA 结构,获得了具有

较高平均功率和峰值功率的单频脉冲激光输出。该激光器可以作为非线性频率转换、相干合成等应用领域的理想光源。

## 2 实验系统与结果分析

图 1 为基于 MOPA 方式工作的脉冲光纤激光器结构示意图。种子脉冲激光是通过华南理工大学研制的连续单频激光器(S-F CW laser)进行腔外调制获得的,该激光器的输出功率为 50 mW、线宽为 20 kHz。实验采用的是电光调制器(EOM),调制器前面加入一个光隔离器保证激光单向传输。调制信号由 Tektronix 公司生产的 AFG3102 型信号发生器提供,将信号发生器设置为重复频率 12 MHz、占空比 96% 的脉冲信号输出。连续激光经过电光调制器后的平均功率约为 0.5 mW。

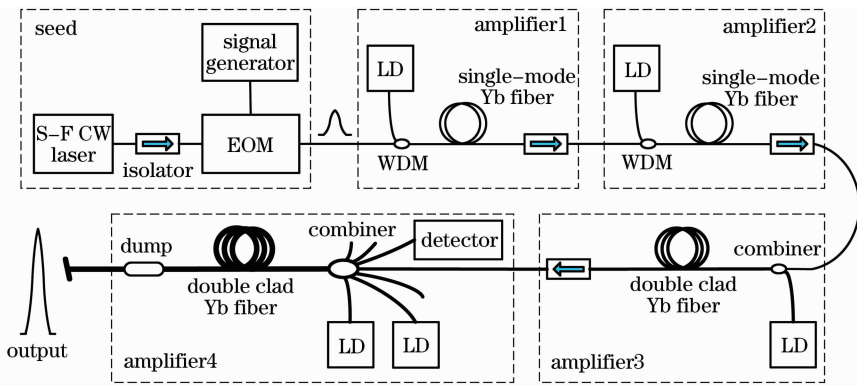


图 1 脉冲光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of pulsed fiber laser

为了防止吸收不完全的抽运光损坏前级器件,四级光纤放大均采用前向抽运方式,即信号光与抽运光从光纤的同一端耦合进掺 Yb 光纤。在前面三级放大器的输出端加入一个工作波长为 1064 nm 的光隔离器,保证信号光的单向传输。

前面两级放大器用于对弱种子激光器的弱信号光的预防大。第一、二级放大器的抽运光源是中心波长为 976 nm、最大功率为 480 mW 的单模尾纤输出激光二极管(LD),它们分别通过一个 980 nm/1064 nm 的波分复用器(WDM)耦合进增益光纤,增益光纤后面各加入一个光隔离器保证光路的单向运行。增益光纤(NUFERN: SM-YSF-HI)的纤芯直径为 6  $\mu$ m,数值孔径为 0.11。第一和第二级放大分别将信号光平均功率放大到 5 mW 和 98 mW。

第三级放大器进一步对信号光进行放大。增益光纤(NUFERN: LMA-YDF-15/130)为双包层掺 Yb 光纤,其纤芯直径和内包层直径分别为 15  $\mu$ m

和 130  $\mu$ m,内包层数值孔径为 0.46。多模尾纤输出激光二极管的中心波长为 976 nm、最大功率为 9 W,通过一个抽运合束器耦合进增益光纤。第三级放大器将信号光平均功率放大到 2.7 W。

第四级放大器为主放大器。增益光纤(NUFERN: LMA-YDF-30/250)为纤芯直径和内包层直径分别为 30  $\mu$ m 和 250  $\mu$ m 的双包层掺 Yb 光纤,其内包层数值孔径为 0.46,纤芯的数值孔径为 0.06。增益光纤以 30 cm 为直径绕在涂有导热硅胶的水冷板上,使放大器工作时保持在一定的温度。抽运源为 2 个工作波长为 976 nm 的多模尾纤输出二极管,其最大输出功率为 45 W。抽运光和信号光通过一个(6+1) $\times$ 1 的抽运合束器与增益光纤耦合。合束器的一个输入端接功率计,用于检测后向散射光,防止受激布里渊散射(SBS)损坏器件。系统进行了抽运倾泻处理,泄漏掉没有吸收完全的抽运光。输出端光纤研磨出 8°斜角,以避免端面反射

引起的干扰振荡。

在种子激光器和前三级放大器开启的情况下，运行主放大器。输出功率与主放大器抽运光功率的关系如图 2 所示，当抽运激光的功率达到 87.1 W 时，输出了平均功率为 58.4 W 的单频脉冲激光，光光转换效率为 74.8%。

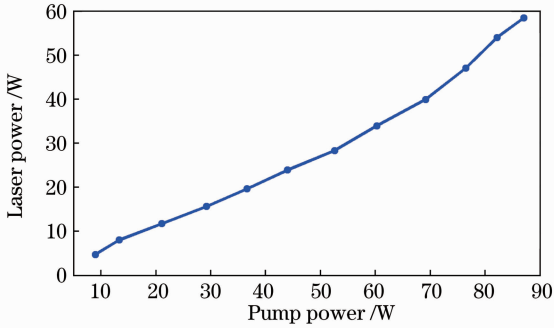


图 2 主放大器平均功率与抽运功率的关系

Fig. 2 Output power of the main amplifier as a function of the pump power

用 Agilent 公司生产的 86142B 型光谱仪对输出光进行光谱测试，输出平均功率为 58.4 W 时的光谱图如图 3 所示。从图 3(a)中可以看到信号光与放大自发辐射(ASE)的信噪比高于 40 dB, ASE 得到了很好的抑制。实验中未发现 SBS。考虑到实

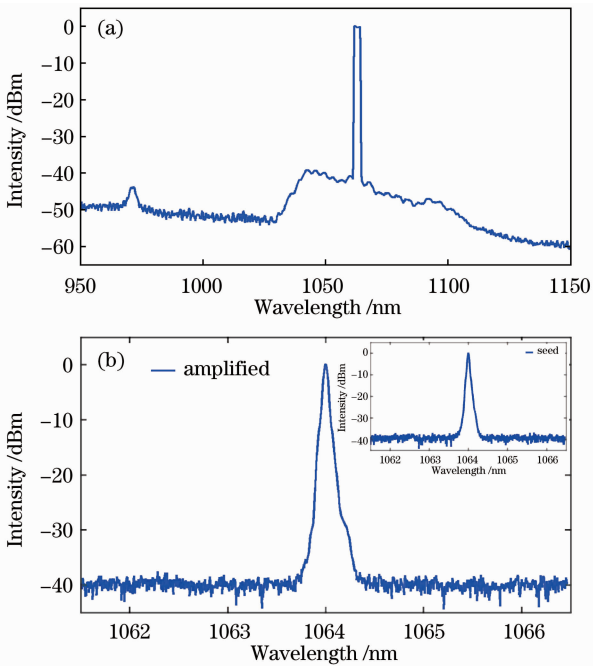


图 3 58.4 W 输出功率下激光的输出光谱。(a)扫描范围:950~1150 nm;(b)扫描范围:1061.5~1066.5 nm

Fig. 3 Spectrum of the fiber amplifier at the output power of 58.4 W. (a) Scan range: 950 ~ 1150 nm; (b) scan range: 1061.5 ~ 1066.5 nm

验中仅用到 2 个抽运 LD, 进一步增加抽运光的路数、提高抽运功率, 有望进一步提升脉冲激光的输出功率。图 3(b)为激光放大前后的光谱图, 两者基本保持一致。但是, 由于光谱仪分辨率只有 0.06 nm, 不能测量出输出脉冲激光的具体线宽。在本文所述的各种放大条件下, 所测激光光谱受光谱仪分辨率所限, 并未出现明显展宽, 因此放大后的光谱宽度应该远小于 18 GHz。如果要测量光谱展宽的精确值, 需要更高的分辨率的光谱测量方法, 如采用外差法等。

光纤放大器输出波形如图 4 所示, 脉冲激光的重复频率为 12 MHz, 脉宽约 10 ns, 峰值功率为 486.7 W, 单脉冲能量为 4.9 μJ。

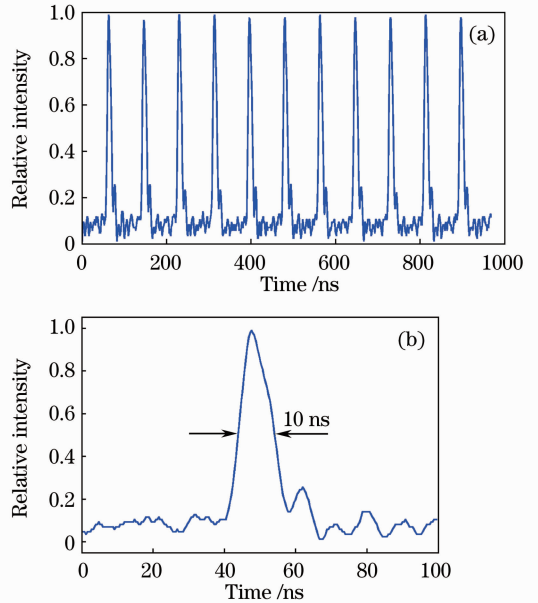


图 4 放大激光输出脉冲波形。(a) 6 个周期; (b) 1 个周期

Fig. 4 Output pulse shape of the fiber amplifier. (a) 6 periods; (b) 1 period

用 Electro Physics 公司生产的 MicronViewer 7290A 型光斑分析仪对输出激光进行测量, 输出平均功率为 58.4 W 时的光斑形态如图 5 所示。由于

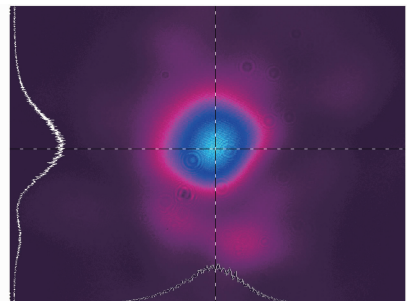


图 5 放大激光输出光斑图样

Fig. 5 Laser pattern of the fiber amplifier

增益光纤纤芯的数值孔径为 0.06,属于少模光纤而非严格的单模光纤,所以难以严格保证单模运行。光斑中出现了一些旁瓣,中央主瓣所占能量约为 63%。

### 3 结 论

利用电光调制器对单频连续激光进行强制调制度来产生单频脉冲种子激光,采用四级光纤放大器对种子激光进行放大,获得了平均功率为 58.4 W,重复频率为 12 MHz,脉宽约 10 ns,峰值功率为 486.7 W 的单频脉冲激光输出。其输出功率受限于抽运光功率,有望通过增加抽运功率得到进一步提升。该激光器可广泛应用于非线性频率转换、相干合成等对激光频率特性有特殊要求的应用领域,具有较高的实用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Xiaolin, Xu Xiaojun, Zhou Pu *et al.*. Adjustable all fiber pulse laser based on coherent combination[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 87~91  
王小林,许晓军,周朴等.基于相干合成的可调全光纤脉冲激光光源[J].*中国激光*,2009,**36**(1):87~91
- 2 Guo Wengang, Li Enbang, Lü Fuyun. A novel electrooptic ceramics Q-switched fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 276~279  
郭文刚,李恩邦,吕福云.新型电光陶瓷调Q光纤激光器[J].*光学学报*,2008,**28**(4):276~279
- 3 Gao Cunxiao, Zhao Wei, Wang Yishan *et al.*. Actively Q-switch Yb<sup>3+</sup>-doped all fiber ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 651~654  
高存孝,赵卫,王屹山等.掺Yb<sup>3+</sup>全光纤环形腔主动调Q光纤激光器[J].*中国激光*,2008,**35**(5):651~654
- 4 Jie Zhou, Ping Yan, Shupeng Yin *et al.*. All-fiber cascaded ytterbium-doped nanosecond pulsed amplifier[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(5): 457~459
- 5 Zhang Wei, Li Zhe, Chen Guofu *et al.*. Study on high extinction ratio ytterbium-doped mode-locked fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1297~1300  
张伟,李喆,陈国夫等.高消光比掺Yb<sup>3+</sup>锁模脉冲光纤激光器研究[J].*光子学报*,2008,**37**(7):1297~1300
- 6 Song Fang, Xu Wencheng, Shen Minchang *et al.*. Actively mode-locked femtosecond pulse fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 347~350  
宋方,徐文成,申民常等.主动锁模飞秒光纤激光器[J].*中国激光*,2008,**35**(3):347~350
- 7 Chen Shengping, Lin Dongfeng, Hou Jing *et al.*. Passively mode locked Yb-doped fiber laser with nearly 2 W average output power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2817~2821  
陈胜平,林东风,侯静等.平均功率近2W的被动锁模皮秒掺镱光纤激光器[J].*中国激光*,2009,**36**(11):2817~2821
- 8 Feng Yutong, Du Songtao, Yang Yan *et al.*. All-fiber laser based on LD pulse-modulated MOPA architecture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1932~1936  
冯宇彤,杜松涛,杨燕等.基于LD脉冲调制的全光纤MOPA结构激光器[J].*中国激光*,2009,**36**(8):1932~1936
- 9 Li Yao, Zhu Chen, Wang Xiongfei *et al.*. Experimental study on hundred-watt output power high repetition rate narrow pulse duration fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 281~284  
李尧,朱辰,王雄飞等.百瓦级高重复频率窄脉宽光纤激光器实验研究[J].*中国激光*,2009,**36**(2):281~284
- 10 Zhou Jun, Du Songtao, Liu Fei *et al.*. Based on MOPA方式的150 W高重复频率、窄脉宽光纤激光器[J].*中国激光*,2009,**36**(4):861
- 11 Igor S. Moskalev, Vladimir V. Fedorov, Valentin P. Gapontsev *et al.*. Highly efficient, narrow-linewidth, and single-frequency actively and passively Q-switched fiber-bulk hybrid Er:YAG lasers operating at 1645 nm[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(24): 19427~19433
- 12 Leigh Matthew, Shi Wei, Zong Jie *et al.*. Compact, single-frequency all-fiber Q-switched laser at 1 μm[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(8): 897~899
- 13 Chad G. Carlson, Peter D. Dragic, Price R. Kirk *et al.*. A narrow-linewidth, Yb fiber-amplifier-based upper atmospheric Doppler temperature lidar[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 451~461
- 14 Shi Wei, Eliot B. Petersen, Leigh Matthew *et al.*. High SBS-threshold single-mode single-frequency monolithic pulsed fiber laser in the C-band[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 8237~8245
- 15 Geng Jihong, Wang Qing, Jiang Zack *et al.*. Kilowatt-peak-power, single-frequency, pulsed fiber laser near 2 μm[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(12): 2293~2295

栏目编辑:宋梅梅