

全光纤结构线偏振高重复频率掺 Yb 脉冲光纤激光器

熊慧萍 陈滔 沈永行 刘伟

(浙江大学光电信息工程学系, 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 具有高光束质量的高重复频率、窄脉冲的光纤激光器种子源在主振荡功率放大(MOPA)型高功率脉冲光纤激光器中扮演着重要的角色。报道了一种基于高速激光二极管(LD)直接调制的、多级光纤放大的高重复频率线偏振 Yb 脉冲光纤激光器的种子源研制工作。通过自行研制重复频率和脉冲宽度可调、工作性能稳定的高速驱动电源,直接驱动工作波长为 1064 nm 的尾纤输出半导体激光器,并采用两级级联的 Yb 光纤放大器进行放大,实现了重复频率在 5 kHz~10 MHz 间可调、脉冲宽度在 20~200 ns 间可调、工作波长为 1064 nm 的线偏振激光输出。在重复频率 200 kHz、脉宽为 100 ns 时,获得平均输出功率 800 mW,偏振抑制比超过 25 dB,光束质量因子接近 1 的近衍射极限线偏振脉冲激光输出,可以作为高重复频率脉冲激光种子,经过后端放大能获得更高功率的脉冲激光输出。

关键词 激光器; Yb 光纤激光器; 主振荡功率放大; 线偏振; 脉冲

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100201

All Fiberized Linearly Polarized Pulsed Yb Fiber Laser with High Repetition Rate

Xiong Huiping Chen Tao Shen Yonghang Liu Wei

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract High repetition rate, narrow pulse, high beam quality and multi-watt level fiber laser seed plays an important role in the master-oscillator power amplifier (MOPA) structured high-power pulsed fiber laser. A high repetition rate linearly polarized pulsed Yb fiber laser seeder based on a directly modulated high-speed laser diode (LD) and a two-stage fiber amplifier is reported. A compact high-speed electric driver with tunable repetition rate and pulse width is developed for directly driving a laser diode operating at 1064 nm. The output from the LD is amplified by a two stage Yb fiber amplifier. A linearly polarized laser output at 1064 nm is achieved with a tunable repetition rate ranging from 5 kHz to 10 MHz and pulse duration time between 20 ns and 200 ns. Under the repetition rate of 200 kHz and pulse duration time of 100 ns, the pulsed fiber laser emits a near diffraction-limited linearly polarized pulse laser output with an average power of 800 mW, a polarization extinction ratio greater than 25 dB and a beam quality factor close to 1. It can be served as a seeder of high power linearly polarized fiber laser.

Key words lasers; Yb fiber laser; master-oscillator power amplifier; linear polarization; pulse

OCIS codes 060.2320; 060.3510; 140.3615

1 引言

高功率脉冲光纤激光器具有高峰值功率、高光束质量、高转换效率、极好的散热性、紧凑的结构、极好的抗震性等优势,已越来越多地应用于精密机械

加工、激光雷达、激光医疗和非线性光频转换等领域,并逐渐成为激光光电子技术领域的研究热点之一^[1]。目前,光纤激光器产生脉冲的方式主要有调 Q^[2~4]、锁模^[5] 和主振荡功率放大(MOPA)^[6,7] 三

收稿日期: 2011-02-21; **收到修改稿日期**: 2011-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61078015)资助课题。

作者简介: 熊慧萍(1986—),女,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: xiong23700@126.com

导师简介: 沈永行(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、中红外光参量振荡器、光纤传感和光纤光谱仪等方面的研究。E-mail: physyh@zju.edu.cn(通信联系人)

种。其中, MOPA 光纤激光器以参数性能优越的激光器作为主振荡器, 进行一级或多级功率放大, 从而获得高功率、脉冲特性可控、高光束质量的激光输出, 并易于实现全光纤化。

近几年来, 连续光纤激光器的输出功率已经达到千瓦级^[8], 而脉冲光纤激光器由于受非线性效应的限制, 其输出平均功率远不及连续光纤激光器; 应用于非线性光频转换的线偏振脉冲光纤激光器, 由于产生非线性效应的阈值更低, 更难获得高功率输出。近几年, 许多研究小组在研制高功率线偏振脉冲光纤激光器方面开展了大量的工作^[9~12]。由于 MOPA 结构的脉冲光纤激光器输出激光的性能很大程度上依赖于种子源的性能, 因此研究一种高重复频率、窄脉宽、高光束质量的激光器种子源十分重要。

鉴于此, 本文通过研制高速 MOSFET 驱动电源, 直接调制宽光谱的激光二极管, 采用大模场双包层 Yb 保偏光纤作为主放大器的增益介质, 研制了一个全光纤结构的高重复频率、线偏振 Yb 脉冲激光器。所研制的全数字化高速 MOSFET 脉冲驱动电源, 抗干扰能力强、控制速度快、效率高, 实现了高重复、窄脉冲的稳定驱动信号输出等特点。

2 实验装置

研制的线偏振 Yb 脉冲光纤激光器结构如图 1 所示, 包括一个脉冲直接调制的带尾纤的 1064 nm 激光二极管 (LD) 和两级光纤放大器。作为种子的 LD 波长为 1064 nm, 是一个复合腔激光器, 除了本身的法布里-珀罗 (F-P) 腔外, 在输出端光纤上连接了一个光纤布拉格光栅 (FBG) 作为外腔进行模式选择, 以实现输出激光波长稳定和窄带光谱输出, 该激光器在连续工作时的最高输出功率为 300 mW。该 LD 由自行研制的高速 MOSFET 驱动电源直接驱动, 可以输出重复频率和脉宽均可调的 1064 nm 激光。

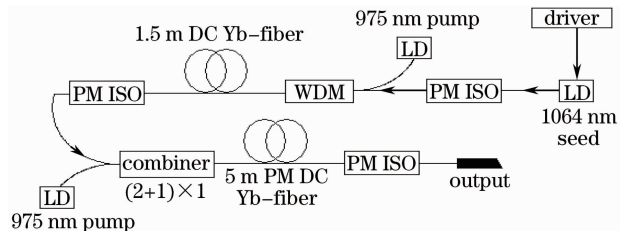


图 1 脉冲光纤激光器结构

Fig. 1 Structure of the pulsed fiber laser

所研制的高速 MOSFET 驱动电源原理框图如图 2 所示。以现场可编程门阵列 (FPGA) 芯片为控

制核心设计的驱动电源主要包括电源慢启动、LD 保护、温度控制、LD 脉冲驱动以及与上位机交互等功能模块电路。驱动电路直接驱动 LD, 在波长 1064 nm 处实现重复频率 5 kHz~10 MHz 可调、脉宽 20~200 ns 可调的线偏振激光输出, LD 工作温度稳定性优于 $\pm 0.1^\circ$ 。LD 后串接一保偏光纤隔离器, 既能保证线偏振的种子激光输出, 又能避免后向散射的布里渊散射光进入种子激光进行振荡放大。在频率 200 kHz、脉宽 100 ns 时, 该 LD 经过保偏隔离器后获得平均功率约为 7 mW 的线偏振激光输出。

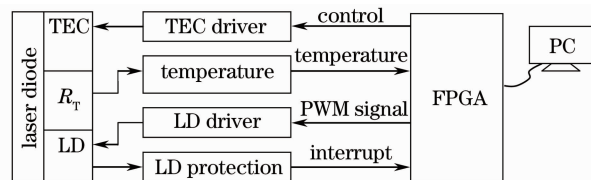


图 2 LD 脉冲驱动电源原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of the pulsed LD driver

光纤放大器为两级级联的掺 Yb 光纤放大器。第一级为一个芯泵浦的 Yb 光纤放大器, 抽运源为波长在 975 nm 的单模输出的半导体激光器, 功率 130 mW, 通过 980/1060 nm 波分复用器 (WDM) 耦合进入 Yb 光纤进行初级预放, 放大后获得功率约为 36 mW 的线偏振激光输出, 经保偏隔离器后传入下一级放大。增益光纤采用实验室自制的双包层掺 Yb 光纤, 长度为 1.5 m。第二级是一个大模场保偏双包层掺 Yb 光纤放大器。经第一级预放大后的信号光和多模抽运光通过一个 $(2+1) \times 1$ 的多模保偏光纤合束器耦合进大模场保偏双包层掺 Yb 光纤, 经放大在保偏隔离器尾纤输出端获得功率约 800 mW 的近衍射极限的线偏振激光输出, 此时抽运光功率为 5.8 W。增益光纤为 Nufern 公司生产的型号为 PLMA-YDF-15/130 的大模场保偏双包层掺 Yb 光纤。纤芯和内包层直径分别为 15 μm 和 130 μm , 内包层数值孔径为 0.08, 在 915 nm 的吸收系数为 1.8 dB/m, 光纤长度 5 m。抽运光源为一个多模光纤耦合输出的波长约 970 nm 的半导体激光器。放大器的输出端面磨成 8° 斜面, 以抑制光纤端面的菲涅耳反射, 防止放大自发辐射 (ASE) 光的自生振荡。各级间采用保偏光纤隔离器, 既可以保证信号光的偏振特性, 也可以抑制增益光纤产生的 ASE, 并减少 SBS 的影响。

实验中分别采用 FSU975 型光纤熔接机和 FSM-45PM-LDF 保偏光纤熔接机将信号光光纤、抽

运光纤、增益光纤以及 WDM 和 $(2+1) \times 1$ 合束器的相应光纤熔接在一起。采用 Tektronix 的 TDS220 型示波器和 DET01CFC 型光电探测器测量激光的时域波形, Nanoscan HP-NS-PYR0/9/5 型光束质量分析仪测量激光光束形状, 用 AQ6317C 光谱仪测量激光器的输出光谱, 激光脉冲的输出功率由 OPHIR 光功率计测量。

3 实验结果与讨论

当注入种子激光的重复频率为 2 MHz 时, 放大前后的脉冲激光时域脉冲形状如图 3 所示, 脉冲宽度约 100 ns, 可见放大后的脉冲比未放大前略有压缩。图 4 为注入种子激光重复频率为 200 kHz、脉宽为 100 ns 时, 种子激光器放大前后输出光谱图。此时, 放大后经隔离器输出的激光平均功率为 450 mW, 两级放大器的抽运光功率分别为 130 mW 和 4.4 W。图 4 中种子激光器光谱图的线宽约为 0.1 nm。当 LD 工作温度控制为 25.6 °C 时, 其尾纤输出端测得的 ASE 位置移至 1064 nm 激光峰正下方, 边模抑制比约为 37 dB。放大后的激光光谱线宽基本不变, 没有明显的光谱展宽现象, 也没有观测到受激拉曼散射和受激布里渊散射, 边模抑制比超过 25 dB。但在 100 kHz 重复频率、100 ns 脉宽时 (此时 LD 输出功率为 6 mW), 在第二级光纤放大器抽运光功率大于 4.5 W 时出现受激拉曼散射峰。

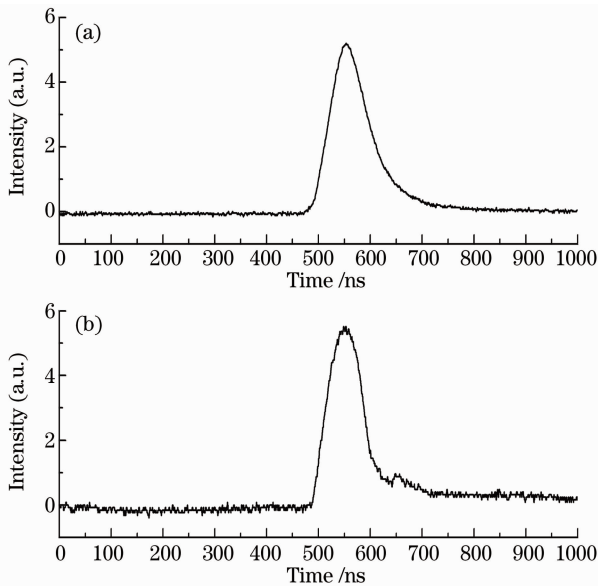


图 3 放大前(a)和放大后(b)的脉冲激光波形

Fig. 3 Pulse shapes of the fiber laser before (a) and after (b) amplification

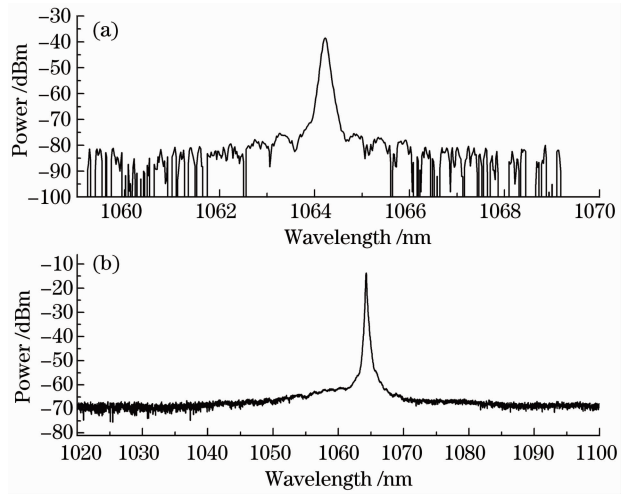


图 4 光纤激光器放大前(a)和放大后(b)的激光光谱
Fig. 4 Output spectra of the fiber laser before (a) and after (b) amplification

当 LD 重复频率为 200 kHz, 脉宽为 100 ns 时, 光纤激光器输出激光的平均功率随抽运功率变化的曲线如图 5 所示。在抽运功率为 5.8 W 时, 全光纤激光器种子源获得了平均功率为 800 mW 的线偏振单模脉冲输出, 偏振抑制比大于 25 dB, 相应的峰值功率为 40 W。由于没有对第二级光纤放大器的半导体激光抽运源进行很好的温控处理, 抽运光的工作波长并不是标称的 975 nm, 因而增益光纤对抽运光并没达到最有效的吸收, 很多抽运光从输出端泄漏。可以采取相应措施使半导体激光器的工作波长稳定在 975 nm, 从而进一步提高效率。同时通过进一步增大抽运光功率, 也可使放大输出激光功率达到瓦级。

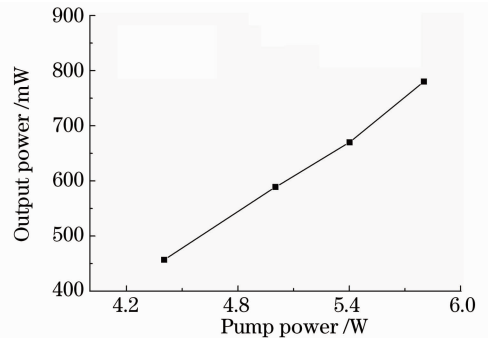


图 5 输出平均功率随抽运功率的变化

Fig. 5 Output average power versus pump power

保持种子光的脉宽 100 ns 不变, 改变重复频率, 各级输出激光的平均功率将产生如图 6 所示的相应改变, 其中两级光纤放大器的抽运功率分别为 130 mW 和 4.4 W。可以看出作为种子光的调制半导体激光器的输出平均功率和重复频率成正比, 而

一二级光纤放大器的输出平均功率并非随着重复频率成正比地增加,而是低频段迅速增加,随着重复频率的增加逐步趋于稳定,这种现象在第二级放大中尤为明显,原因是当激光器在低重复频率工作时,种子激光器的注入平均功率较低,不能完全消耗放大级中增益光纤提供的反转粒子数,随着重复频率的增加,种子光注入的平均功率变大,消耗的反转粒子数增加,在放大器中获得的增益相应变大,输出激光的平均功率增加,当重复频率高到一定程度后,就基本上消耗完所有的反转粒子数,输出激光脉冲的平均功率趋于稳定。重复频率大于 400 kHz 时,激光器获得平均功率为 480 mW 的稳定输出,此时第二级放大器处于饱和放大区。

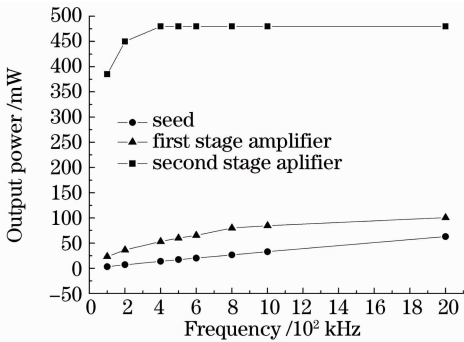


图 6 各级输出平均功率随重复频率的变化

Fig. 6 Output average power after each stage versus repetition frequency

在激光输出功率为 480 mW 时,测量了经光纤隔离器后输出的激光光束形状,显示其光束质量因子 $M_{x,y}^2$ 分别为 1.03 和 1.07(图 7),其中,光斑直径在光强下降为中心最大光强的 $1/e^2 \approx 0.135$ 处获得。

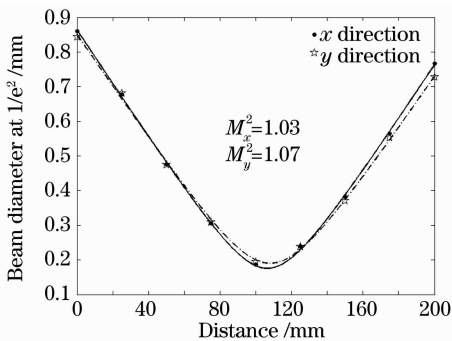


图 7 输出激光束的光束质量测试结果

Fig. 7 Measured beam quality factor

图 8 为注入种子激光重复频率 200 kHz,脉宽 100 ns,一二级抽运功率分别为 130 mW 和 4.4 W 时,各级输出激光的光谱对照图,线宽基本保持在 0.1 nm 左右。图 9 为注入种子激光重复频率为

5 MHz,脉宽为 50 ns 时,放大器输出激光的脉冲时域波形。可以发现存在少量的脉冲畸变。

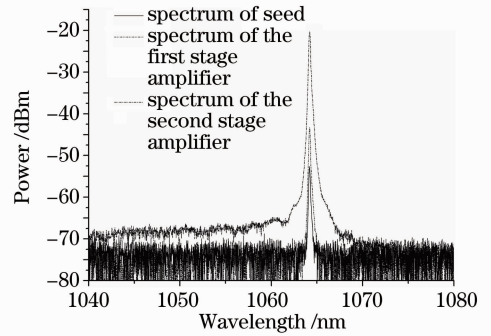


图 8 各级输出光谱

Fig. 8 Output spectra of each stage

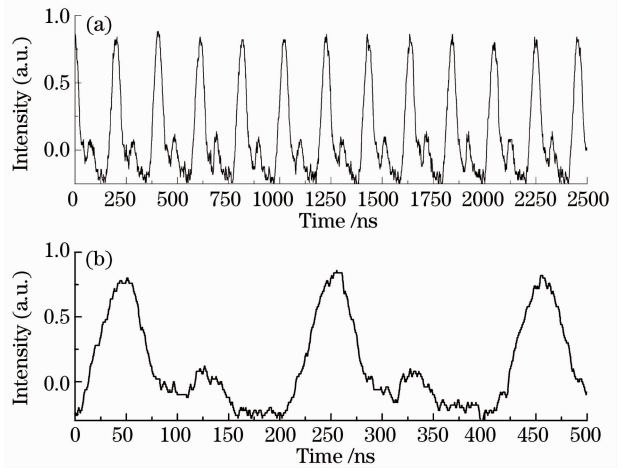


图 9 激光输出波形

Fig. 9 Temporal trace of the output pulse

4 结 论

基于 MOPA 结构,通过直接调制驱动单模输出的 LD,并经两级光纤放大器级联放大,实现了一个重复频率在 5 kHz~10 MHz 间可调、脉冲宽度在 20~200 ns 间可调、工作波长为 1064 nm 的线偏振激光输出。在重复频率 200 kHz、脉宽为 100 ns 时,获得平均输出功率 800 mW,偏振抑制比超过 25 dB、光束质量因子接近 1 的近衍射极限线偏振脉冲激光输出。通过对主放大器的抽运激光器进行有效的温度控制并增加其输出激光功率,可获得更高功率的光纤激光输出。将所研制的光纤激光器应用于后端的高功率线偏振脉冲光纤激光器种子,可望获得高平均功率的线偏振脉冲激光输出,并应用于光学参量振荡器等非线性激光频率变换领域。

参 考 文 献

1 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
- 2 Ning Jiping, Zhang Weiyi, Shang Lianju *et al.*. All-fiber Q switched ytterbium-doped double-clad laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 483~487
- 宁继平, 张伟毅, 尚连聚等. 掺镱包层光纤激光器的全光纤调 Q 技术[J]. 中国激光, 2008, **35**(4): 483~487
- 3 Gao Cunxiao, Zhao Wei, Wang Yishan *et al.*. Actively Q switched Yb³⁺-doped all fiber ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 651~654
- 高存孝, 赵 卫, 王屹山等. 掺 Yb³⁺ 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 Filippov V. N., Starodumov A. N., Kir' Yanov A. V.. All-fiber passively Q-switched low-threshold erbium laser[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(6): 343~345
- 5 Zhang Wei, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Experimental study of figure-of eight fiber lasers based on nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1808~1811
- 张 伟, 陈国夫, 赵 卫等. 非线性放大环环境“8”字腔光纤激光器的实验研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(12): 1808~1811
- 6 K. T. Vu, A. Malinowski, D. J. Richardson *et al.*. Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond fiber MOPA system[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(23): 10996~11001
- 7 Gao Cunxiao, Zhu Shaolan, Cao Zongying *et al.*. High repetition, single mode nanosecond all fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2481~2484
- 高存孝, 朱少岚, 曹宗英等. 高重复频率、单模纳秒脉冲全光纤激光器[J]. 光子学报, 2009, **38**(10): 2481~2484
- 8 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 9 C. Ye, M. Gong, P. Yan *et al.*. Linearly polarized single-transverse-mode high-energy multi-ten nanosecond fiber amplifier with 50 W average power[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(17): 7604~7609
- 10 V. Khitrov, B. Samson, D. Machewirth *et al.*. 50 W single mode linearly polarized high peak power pulsed fiber laser with tunable ns-ps durations and kHz-MHz repetition rates [C]. *SPIE*, 2006, **6873**: 68730C
- 11 P. P. Jiang, D. Z. Yang, Y. X. Wang *et al.*. All-fiberized MOPA structured single-mode pulse Yb fiber laser with a linearly polarized output power of 30 W[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(5): 384~387
- 12 K. K. Chen, J. H. V. Price, S. Alam *et al.*. Polarization maintaining 100 W Yb-fiber MOPA producing μ J pulses tunable in duration from 1 to 21 ps[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(14): 14385~14394