

文章编号: 0258-7025(2009)07-1861-05

全光纤结构主振荡功率放大大型掺镱脉冲光纤激光器

汪园香 姜培培 杨丁中 吴 波 沈永行

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

摘要 报道了一台全光纤结构主振荡功率放大(MOPA)型掺镱脉冲光纤激光器。种子源是工作波长为 1064 nm 的声光调 Q 光纤激光器, 可以获得重复频率在 20~50 kHz 间可调、平均输出功率约 2 W 的随机偏振脉冲种子激光。以大直径保偏(PM)光纤作为增益介质, 在 6 个单管功率 10 W, 波长为 915 nm 的半导体激光器抽运下, 种子激光经过一级放大最终获得平均输出功率 23.5 W, 脉冲宽度约为 30 ns, 偏振抑制比超过 10 dB, 光束质量因子 M^2 为 1.36 的线偏振单模脉冲激光输出。讨论了大直径保偏光纤与种子激光输出光纤的模场不匹配性对输出激光的光束质量和光谱特性的影响。

关键词 激光器; Yb 光纤激光器; 单模; 脉冲; 线偏振; 模场匹配

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1861

All-Fiberized Master Oscillator Power Amplifier Structured Pulsed Yb Fiber Laser

Wang Yuanxiang Jiang Peipei Yang Dingzhong Wu Bo Shen Yonghang

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

Abstract An all-fiberized master oscillator power amplifier(MOPA) structured pulsed Yb fiber laser is reported. The seed source was an acousto-optic(AO) Q-switched Yb fiber laser working at 1064 nm and emitting a random polarized pulsed emission with an average power of 2 W at repetition rates between 20 kHz and 50 kHz. Using a polarization maintaining(PM) large mode field double-cladding fiber as the gain medium and six LDs each with 10 W power output at 915 nm as the pump, the Yb fiber amplifier delivered a linearly polarized pulsed emission output at 1064 nm with an average power of 23.5 W, pulse duration about 30 ns, polarization extinction ratio greater than 10 dB, and a beam quality factor M^2 of 1.36. The effect of mode field mismatch between the output fiber of seed laser and the large mode field PM fiber, which influenced the beam quality and the spectral distribution of the laser output, was discussed.

Key words lasers; Yb fiber laser; single-mode; pulse; linearly polarization; mode field match

1 引 言

高功率脉冲光纤激光器在激光加工、材料处理、激光雷达、遥感和非线性光频转换领域都具有广泛的应用^[1~4]。由于光纤激光器具有良好的散热特性, 系统结构紧凑, 双包层光纤又能够传导高功率的抽运

光, 且对光束有良好的约束, 能产生高光束质量激光, 这都使得在高功率激光应用领域双包层光纤激光器比传统固体激光器具有更多优势^[5,6]。与连续光纤激光器相比, 脉冲光纤激光器具有更高的峰值功率, 与物质的作用效率更高。产生激光脉冲的方法主要有

收稿日期: 2009-03-30; 收到修改稿日期: 2009-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(60778001)和浙江省重大科技专项(2008C01052-4)资助项目。

作者简介: 汪园香(1980—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤光栅和光纤激光器等方面的研究。

E-mail: katewang@zju.edu.cn

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)

两种:一种是传统的声光(AO)调Q光纤激光器形式,采用谐振腔结构,通过Q开关技术,产生脉冲激光输出^[7];另一种是采用主振荡功率放大(MOPA)结构,通过放大较小功率、参数优越的种子激光器,得到纳秒级脉冲激光输出^[8]。传统的声光调Q光纤激光器结构简单,不需要使用光纤隔离器等相关光纤元件。但是其输出功率、脉冲输出稳定性以及脉冲宽度由谐振腔设计决定,脉冲宽度、光束质量和工作稳定性较难保证。与此相比,小功率种子激光器容易产生高品质激光输出,采用MOPA型结构可以获得品质的高功率激光输出,激光参数可以方便地通过调制种子激光器加以改变。

由于许多应用领域(如作为光频转换的抽运源)需要线偏振激光输出,因此研究线偏振脉冲光纤放大器具有现实意义。近几年来,许多研究小组陆续报道了高功率线偏振脉冲光纤激光器和放大器的研究工作^[9,10]。线偏振脉冲光纤激光器在高功率运行时,峰值功率较高,容易产生如受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)等破坏性非线性现象而导致光纤损坏^[11],其中受激布里渊散射作用尤为明显。种子激光器的光谱线宽、脉冲宽度、输出功率以及偏振特性是影响光纤放大器中非线性效应的重要因素^[12]。其中最重要的是种子激光器的光谱线宽,一旦其工作光谱线宽大于布里渊散射的增益线宽时,光纤中的布里渊散射增益就会急剧下降,相应地提高受激布里渊散射的阈值。固体激光器输出线宽较窄,以其作为种子源的光纤放大器在运行过程中,可以观察到较明显的非线性现象。使用固体激光器作为种子源,清华大学的巩马理小组研制的基于MOPA结构、声光调Q的Yb光纤放大器,得到了平均功率为50W的线偏振脉冲激光输出^[13],并对如何抑制非线性效应进行了详细描述。因为半导体激光器的宽带光谱,使用半导体激光器作为种子源可以有效抑制非线性效应。文献^[14]报道了基于MOPA结构、以激光二极管(LD)为种子激光的、多级放大的高功率线偏振Yb光纤激光器,输出功

化的PPMgLN的光学参量振荡器,获得了高效的参量激光输出。2008年,Khitrov等^[15]报道了用调制的半导体激光二极管作为种子源的、输出功率50W的全光纤线偏振脉冲Yb光纤放大器。由于作为种子的LD输出平均功率很低,必须使用三级放大结构,使得系统比较复杂。

本文报道我们近期研制的以声光调Q光纤激光器作为种子源的、一级放大的全光纤线偏振脉冲Yb光纤激光器,工作波长为1064nm。作为种子的声光调Q光纤激光器,输出重复频率在20~50kHz间可调、平均功率约为2W的随机偏振激光。种子激光器经过一个偏振光纤隔离器之后,其输出的线偏振激光功率仍然大于0.6W,这一功率可以保证后续的激光放大器处于饱和工作状态,得到足够大的输出功率。在6个单管功率为10W,波长为915nm的半导体激光器抽运下,在重复频率为40kHz时,光纤放大器获得了平均功率23.5W,脉冲宽度约为30ns,偏振抑制比超过10dB,光束质量因子 M^2 为1.36的线偏振单模脉冲激光输出。

2 实验系统与结果分析

MOPA型脉冲光纤激光器的结构示意图如图1所示。种子激光器是一个商用的全光纤结构的声光调Q掺Yb光纤激光器,输出光纤纤芯和内包层直径分别为7 μm 和125 μm 。种子激光器最大可以得到平均功率为2W的随机偏振激光输出。通过在输出端熔接一个偏振相关的光纤隔离器,既可以得到线偏振的种子激光,同时又可以避免放大级激光反射回种子激光器引起破坏。种子激光输出经过偏振隔离器后,得到平均功率大于0.6W的线偏振激光输出,这一功率已经可以保证后续放大级的饱和和放大。受激拉曼散射随着激光输出功率的增大而明显增大;随着重复频率增大,激光峰值功率减小,种子激光器输出光谱线宽略有减小,SRS逐渐变小直至40kHz以后消失。因此,为得到高的峰值功率并避免SRS现象,后续实验都采用重复频率40kHz。

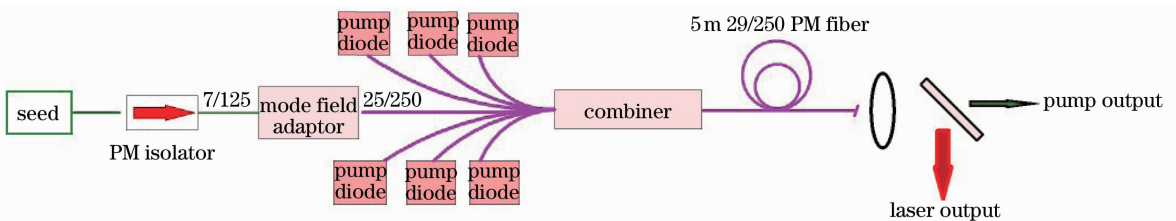


图1 脉冲光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the pulsed fiber laser

图 2 给出了在重复频率为 40 kHz 时种子激光器的输出光谱图,其线宽约为 0.9 nm。在重复频率 40 kHz,输出激光功率为 2 W 时,测得光纤激光器输出脉冲波形如图 3 所示,脉冲宽度约为 36 ns。

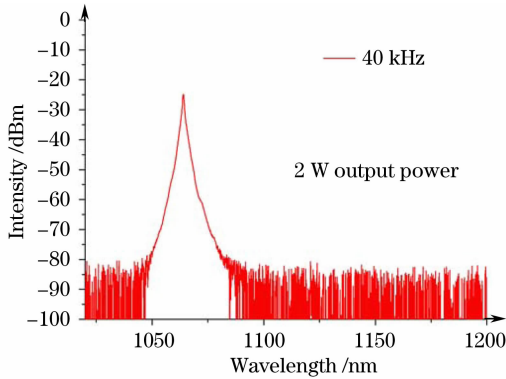


图 2 种子激光器输出光谱图
Fig. 2 Spectrum of the seed laser

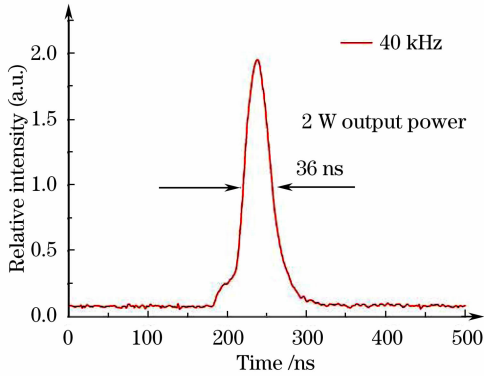


图 3 种子激光器输出脉冲波形图
Fig. 3 Output pulse shape of the seed laser

因为种子激光器输出功率足够大,光纤放大器采用一级放大结构。增益光纤为 Nufern 公司的大模场保偏双包层掺 Yb 光纤,其纤芯和内包层直径分别为 29 μm 和 250 μm ,内包层数值孔径为 0.47,在 915 nm 的吸收系数为 2.2 dB/m,光纤长度 5 m,光纤被绕成直径为 11 cm 的圈以控制激光模式质量。为避免端面反射引起的干扰振荡,光纤的输出端研磨出 8° 的倾角。放大器抽运源为 6 个工作波长在 915 nm 的尾纤输出激光二极管,单管最大输出功率为 10 W。它们通过一个 (6+1) \times 1 的保偏光纤耦合器直接与种子激光器和增益光纤熔接。

由于保偏光纤合束器信号光输入端的光纤芯径和内包层直径与增益光纤相当,而保偏光纤隔离器输出光纤与种子激光输出光纤相同,因此保偏光纤隔离器输出光纤与合束器输入光纤的模场差异较大,不能很好匹配。在合束器之后未接增益光纤时,仔细研究了模场失配对经过合束器后种子激光的影

响。首先,采用光纤拉锥熔接方式,使得大直径光纤与小直径光纤之间能够形成一个过渡锥形区。通过测试输出激光光谱,发现未能很好解决问题,锥形区之间损耗较大,形成 F-P 腔结构,使得输出光谱表现为干涉特征,如图 4 所示。在这时熔接增益光纤,测试放大后输出激光的光束质量,发现光束质量因子为 4.3 左右。因此,认为模场失配已经严重影响光纤放大器的性能。鉴于此问题,改为采用商品化的模场适配器进行耦合,证实能够很好地解决模场失配问题,得到的光束质量很好。

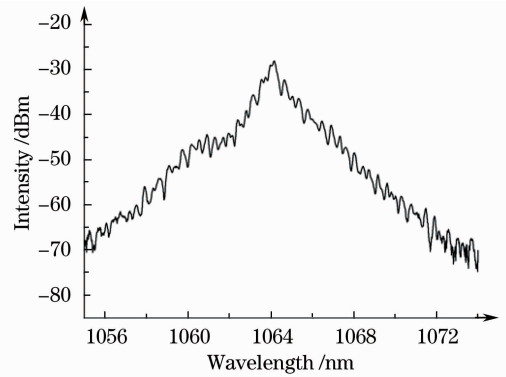


图 4 光纤模场失配引起的多峰激光光谱图
Fig. 4 Multi-peak spectrum of the laser caused by the mode field mismatch between fibers

利用模场适配器,运行光纤放大器,在种子激光输出为 0.6 W,重复频率为 40 kHz 时,光纤放大器的输出功率与抽运光功率的关系如图 5 所示,当抽运激光的功率达到 34.8 W 时,可以获得平均功率为 23.5 W 的线偏振单模脉冲激光输出(已滤除泄漏抽运光),其斜率效率达到 70.4%,偏振抑制比达到 10.3 dB。因为没有对抽运激光器进行特别的控温处理,抽运激光器输出波长与标称的 915 nm 有一定偏离,仅为 904 nm 左右,使得增益光纤对抽运

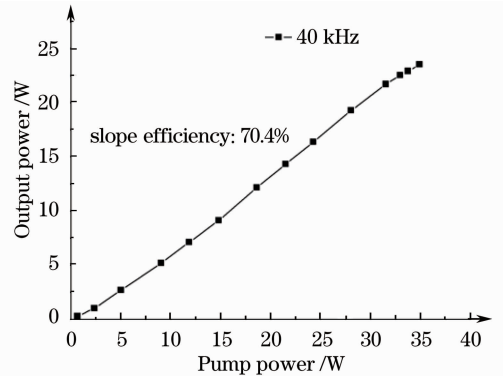


图 5 放大激光平均功率与抽运功率的关系
Fig. 5 Output powers of the fiber amplifier as a function of the pump power

光吸收较小,有很多抽运激光从输出端泄露。为进一步提高效率,可以控制半导体激光器工作温度,对抽运光波长进行控制。输出激光的光束质量用刀口法测量,在激光输出功率 22 W 时,显示其光束质量因子 M^2 达到 1.36,图 6 给出了测量的光斑大小。光纤放大器的输出脉冲波形如图 7 所示,脉冲宽度约为 30 ns,比未放大前略有压缩。在最高输出功率下,激光输出的光谱如图 8 所示,没有观测到受激拉曼散射和受激布里渊散射。

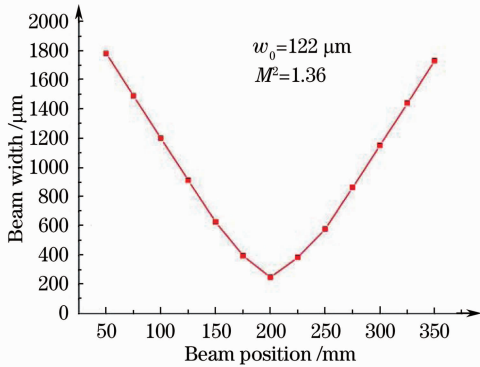


图 6 光束质量测试结果

Fig. 6 Measured beam quality factor

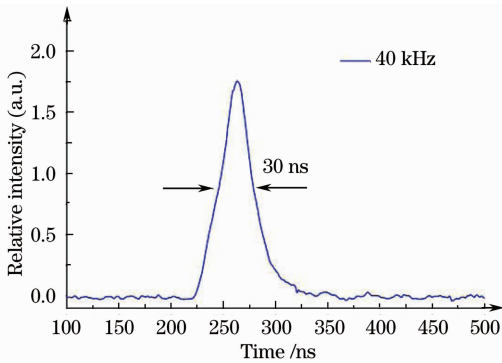


图 7 放大激光输出脉冲波形

Fig. 7 Output pulse shape of the fiber amplifier

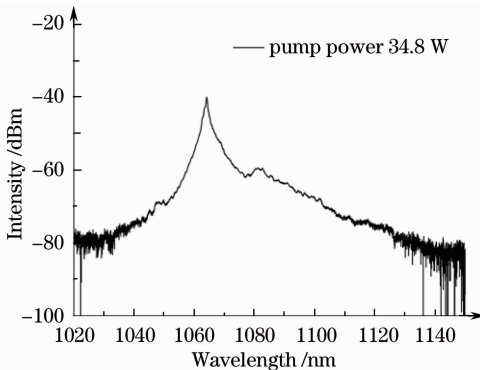


图 8 23.5 W 输出功率下激光的输出光谱

Fig. 8 Spectrum of the fiber amplifier at the output power of 23.5 W

3 结 论

报道了一台利用声光调 Q 的掺 Yb 光纤激光器为种子源和大模场 Yb 双包层保偏光纤为放大介质的、采用 MOPA 结构的高功率线偏振单模脉冲光纤激光器,其输出功率可达 23.5 W。在重复频率为 40 kHz 时,它的偏振抑制比大于 10 dB,脉冲宽度约为 30 ns。输出光的光束质量因子可达 1.36。因其大的峰值功率、结构紧凑性和高抗震性,这种全光纤线偏振单模脉冲激光器在光学参量振荡器等非线性频率变换领域具有实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 W. R. Bosenberg, A. Drobshoff, J. I. Alexander *et al.*. 93% pump depletion, 3.5-W continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1336~1338
- 2 L. E. Myers, W. R. Bosenberg. Periodically poled lithium niobate and quasi-phase-matched optical parametric oscillators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(10): 1663~1672
- 3 M. Nakamura, S. Higuchi, S. Takekawa *et al.*. Optical damage resistance and refractive indices in near-stoichiometric MgO-doped LiNbO₃[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **41**(1): 49~51
- 4 Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulsed [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1603~1606
王清月,胡明列,宋有建等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1603~1606
- 5 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. Recent progress of high-power fiber lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 135~138
楼祺洪,周 军,朱健强等. 高功率光纤激光器研究进展[J], *红外与激光工程*, 2006, **35**(2): 135~138
- 6 Chang Liping, Fan Wei, Wang Li *et al.*. Amplification performance of large- and small-mode-area ytterbium-doped double-clad fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1492~1497
常丽萍,范 薇,王 利等. 掺镱双包层光纤放大器的放大特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1492~1497
- 7 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
- 8 P. Roy, D. Pagnoux, L. Mouneu, *et al.*. High efficiency 1.53 μm all-fiber pulsed source based on a Q-switched erbium doped fibre ring laser[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(15): 1317~1318
- 9 A. Liu, M. Norsen, R. Mead. 60 W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(1): 67~69
- 10 A. Babushkin, D. Gapontsev, N. Platonov *et al.*. Pulsed fiber laser with 30 W output power at 532 nm[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 334~338
- 11 C. Ye, P. Yan, L. Huang *et al.*. Stimulated Brillouin scattering phenomena in a nanosecond linearly polarized Yb-doped double-clad fiber amplifier[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **45**: 376~381
- 12 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* (third edition) [M]. USA: Academic Press, 2001. 320~333
- 13 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
- 14 Y. H. Shen, S. Alam, K. K. Chen *et al.*. PPMgLN based high power optical parametric oscillator pumped by Yb³⁺-doped fiber amplifier incorporates active pulse shaping[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 385~392
- 15 V. Khitrov, B. Samson, D. Machewirth *et al.*. 50 W single-mode linearly polarized high peak power pulsed fiber laser with tunable ns- μ s durations and kHz-MHz repetition rates [C]. *SPIE*, 2006, **6873**: 68730C