

基于增益开关 LD 的高功率脉冲光纤激光器研究

朱 辰,王雄飞,张 昆,李 尧,张浩彬,张大勇,张利明
(固体激光技术重点实验室,北京 100015)

摘 要:进行了采用 1064 nm 增益开关 LD 全光纤高功率光纤放大的实验研究。采用三级级联光纤放大的方式,第一级放大为单包层光纤放大,第二、三级放大为双包层光纤放大。在第三级放大最大泵浦注入功率为 45.2 W 时,获得了 25.3 W 的脉冲激光输出,脉冲宽度 223 ps,三级放大的光-光效率为 55.9%。若后续进一步增大泵浦功率,则有望实现更高功率输出。

关键词:光纤光学;光纤放大器;皮秒脉冲;增益开关;全光纤

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.02.007

Experimental study of high power pulse fiber laser based on gain-switched LD

ZHU Chen, WANG Xiong-fei, ZHANG Kun, LI Yao, ZHANG Hao-bin, ZHANG Da-yong, ZHANG Li-ming
(Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: Experimental study on all-fiber high power pulse fiber laser based on 1064 nm gain-switched laser diode is reported. The method of tri-stage cascade amplification is employed in the experimental. The first stage amplification is single-mode ytterbium-doped fiber, and gain medium of the second and third stage amplification is double-cladding fiber. Average power of 25.3 W is obtained under a maximum 45.2 W pump power, and the optical-optical efficiency is 55.9%. The pulse width is 223 ps with center wavelength of 1064 nm. No nonlinear effect is observed by spectrometer, and the SNR is beyond 30 dB. A higher power laser output can be realized as the pump power is further enhanced.

Key words: fiber optics; fiber amplifier; picosecond pulse; gain-switched; all-fiber

1 引 言

皮秒激光脉冲在工业加工、光学测量、激光通讯、非线性光学、国防等很多领域都有着非常重要的应用。皮秒激光加工由于在加工工件上不会产生大量的热,对于热冲击或热应力敏感的材料来说加工处理面较为光滑平整,因此常常用于太阳能硅片切割、金属或非金属材料精细加工。此外利用高峰值功率激光的非线性光学效应,可以观察到超连续谱现象,从而获得输出光谱的极大展宽,特别是近红外的皮秒脉冲激光注入高非线性光子晶体光纤,可以获得 400~1700 nm 连续光谱的输出。

皮秒激光的产生手段主要有锁模激光器(包含光纤、固体、半导体等形式)、短腔调 Q 固体激光器、增益开关激光器等。其中增益开关技术是一种较为

简单的获得超短激光脉冲技术。该技术通过预先在半导体激光器出光阈值附近设置直流偏置,再叠加一个大振幅电流脉冲的电信号来驱动该激光器,从而使半导体激光器快速达到谐振状态,然后选择输出对应弛豫振荡第一个峰值的谐振光脉冲。通过这种方式可以得到比调制电脉冲的宽度要小的光信号脉冲。该技术的特点主要是使用调制电路就能产生超短激光脉冲。与锁模方式的激光器相比,增益开关激光器的输出特性主要取决于调制电路,因此输出激光的单脉冲能量和重复频率变化范围很大;而且可以通过调制电路电流波形来优化光脉冲的波形

作者简介:朱 辰(1977-),男,高工,硕士,从事高功率连续、脉冲光纤激光器及超连续谱技术研究。E-mail:zhuch@ sina. com
收稿日期:2013-07-10

和宽度。此外采用该技术的器件机械稳定性较高,适宜整机系统应用。但缺点是输出光脉冲平均功率很低,要获得高功率输出时需要的放大级数较多,系统相应会较复杂。

由于增益开关技术对于调制电路的技术要求很高,且输出激光功率较低,因此基于 1064 nm 增益开关激光器作为种子源的主振荡功率放大(MOPA)技术方案获得全光纤高功率光纤激光输出的报道还很少。本文基于上述研究方案,以增益开关半导体激光器作为种子源,采用三级光纤放大的方式,利用 30 μm 纤芯大模场高掺杂双包层光纤作为功率放大级增益介质,最终实现了 25.3 W 的全光纤输出。

2 实验原理与装置

2.1 原理

由于工作在增益开关状态下的半导体激光器输出功率很低,如果要达到精细加工或非线性变换等应用对高平均功率(峰值功率)光源的需要,采用 MOPA 方式对其进行后续放大是不可避免的。双包层光纤形式 MOPA 的基本原理是:信号光由耦合器件耦合到双包层光纤的纤芯;泵浦光由耦合器件耦合到双包层光纤的内包层,在波导传输过程中多次经过纤芯并被掺杂离子吸收,形成粒子数反转,在信号光的激发下,实现对信号光的功率放大。

如前所述,由于实验中采用的种子源输出功率要比被动锁模激光器输出功率低很多,信号光容易被增益光纤大部分或完全吸收,在放大过程中无法实现高功率或高倍率放大,能量反而会以自发辐射(ASE)的形式耗散掉,降低输出激光的信噪比,因此设计时的关键点在于对放大器的优化,使之能有效地抑制 ASE。此外在高功率工作条件下,还需要着重考虑光纤传输过程中的非线性效应抑制以及光纤器件、增益介质的热管理,以保证激光器系统的可靠工作。

2.2 实验装置

Yb^{3+} 离子的 975 nm 吸收波长接近 1064 nm 发

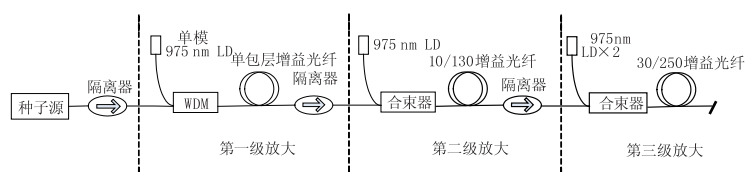


图1 实验装置示意图

射波长,具有较高的量子效率和较低的废热,容易实现高功率输出,因此考虑采用掺 Yb^{3+} 的光纤作为各级放大器的增益介质。

从应用角度出发,为了提高系统的可靠性,减少光学失调的风险,实验装置采用全光纤化设计,通过掌握低损耗光纤熔接工艺连接各个光纤器件,从而保证了激光器的稳定可靠工作。

本文涉及的实验装置示意图如图1所示。

种子源为光纤耦合输出的增益开关半导体激光器,输出中心波长 1064.6 nm,平均功率 0.573 mW,脉冲宽度 300 ps,重复频率 100 MHz。为了保护 LD 不被回光损坏,在种子源后面串联了一个隔离器加以保护。

第一级放大的设计输出功率较小,因此采用了单包层掺 Yb^{3+} 光纤放大的方式,由单模输出的 975 nm LD 泵浦源、975/1060 nm 波分复用器(WDM)、2 m 单包层增益光纤和单模隔离器构成。

第二级放大采用了双包层光纤放大的方式。光学器件包含有:一支 Oclaro 公司生产的 975 nm 半导体激光二极管作为泵浦源,其额定输出功率 25 W,输出光纤 105/125,NA 为 0.22;一支 $(2+1) \times 1$ 的合束器作为耦合器,信号纤为 10/130 双包层 GDF 光纤,泵浦单臂最大承受功率 50 W;3 m 长的 Nufern 公司 10/130 掺 Yb^{3+} 双包层光纤作为增益介质,其对 975 nm 的泵浦光吸收系数为 3.9 dB/m;隔离器的最大承受功率为 5 W。

第三级放大同样采用了双包层光纤放大的方式,出于抑制非线性效应的考虑采用了较粗纤芯的双包层光纤作为增益、传输介质。泵浦源为两只 Oclaro 公司 975 nm LD,合束器为 ITF 公司 $(6+1) \times 1$ 产品,信号纤为 10/130 双包层光纤,输出光纤为 30/250 双包层光纤,单臂最大承受功率 50 W,增益光纤为 Nufern 公司的掺 Yb 双包层光纤,纤芯和内包层的直径分别为 30 μm 和 250 μm ,纤芯 NA 为 0.08,内包层 NA 为 0.46,975 nm 的泵浦吸收系数为 4 dB/m,选取长度 3 m。为了防止回光损伤器件,将输出光纤切成斜 8° 角。

3 实验结果与分析

当种子源注入到第一级放大后,通过调节第一级泵浦 LD 电流,在泵浦电流达到 1000 mA 时,获得了第一级放大输出 54 mW。激光功率与泵浦功率的关系如图 2。由于信号光的输出功率小,为小信号功率提取模式;且使用的增益光纤较长,导致信号光被后续增益光纤吸收,因此光-光提

取效率较低。

维持第一级放大泵浦功率 700 mW, 增加第二级放大泵浦 LD 的工作电流, 当泵浦 LD 的工作电流为 5 A (此时泵浦功率为 10.7 W) 时, 第二级放大的输出功率为 4.3 W, 光-光提取效率 40.2%。激光功率与泵浦功率的关系如图 3。

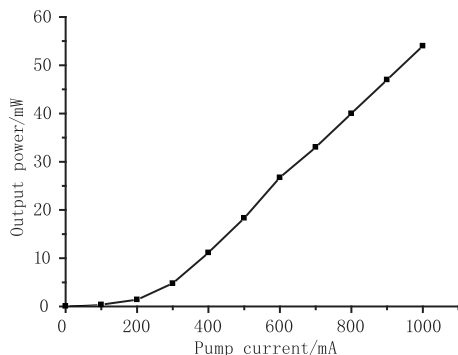


图2 第一级放大泵浦电流与输出功率的关系

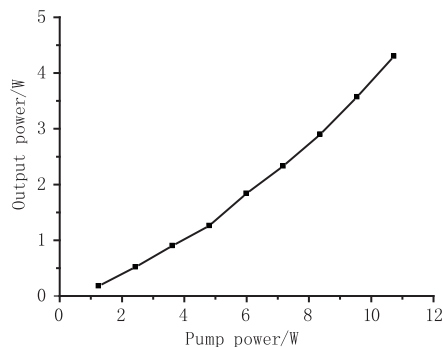
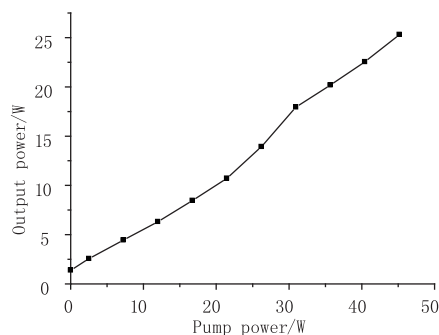
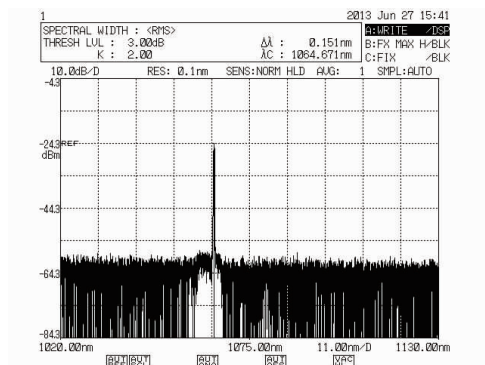


图3 第二级放大泵浦功率与输出功率的关系

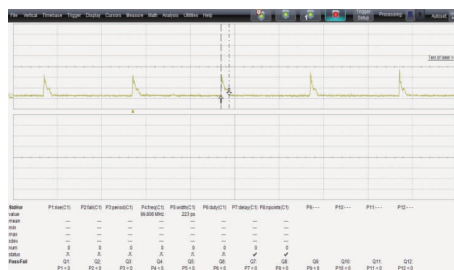
结合对双包层光纤放大器的理论计算和实际经验, 考虑到第三级放大器工作的稳定可靠, 选择第二级放大级的泵浦工作电流为 3.5 A, 此时二级放大的输出功率为 2.33 W。将该信号光注入至三级放大器的纤芯中, 逐步增加两支第三级放大器泵浦 LD 的工作电流, 最终在泵浦电流为 10 A 时, 获得了 25.3 W 的激光输出, 其输出功率特性曲线、输出光谱、脉冲宽度如图 4 所示。通过光谱仪测试输出光谱, 未发现有非线性现象, 且输出激光的信噪比大 30 dB。



(a) 注入与输出功率的关系曲线



(b) 输出光谱



(c) 激光脉冲波形

图4 输出特性图

由于第三级放大采用了 $(6+1) \times 1$ 的合束器, 有六支泵浦单臂, 而实验中实际只用了两支泵浦 LD; 从图 4(a) 中线性增长的输出曲线可以推断: 进一步增大泵浦注入功率, 则有望获得更高功率的激光输出。

4 结论与展望

报道了基于 1064 nm 增益开关的全光纤高功率脉冲光纤激光器的实验研究, 采用三级级联放大的方式, 在最大注入泵浦功率 45.2 W 时, 实现了 25.3 W 的激光输出, 光-光转换效率为 55.9%, 激光器的输出功率与泵浦功率保持线性。结果预示: 若后期进一步增大泵浦功率, 有望获得更高功率的激光输出。

该实验结果可用于高非线性光纤中的非线性光谱展宽实验研究, 也可以用于太阳能硅晶体的切割、金属或非金属材料表面去除等方面的应用。

参考文献:

- [1] J Limpert, S Hofer, A Liemet, et al. 100 - W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. Appl. Phys. B, 2002, 75 (4): 477 - 479.
- [2] O Schmidt, C Wirth, I Tsybin, et al. Average power of 1.1 kW from spectrally combined, fiber amplified, nanosecond pulsed sources [J]. Opt. Lett., 2009, 34 (10): 1567 - 1569.
- [3] A Tunnermann, T Schreiber, J Limpert. Fiber lasers and amplifiers: an ultrafast performance evolution [J]. Appl.

- Opt., 2010, 49(25): F71 – F78.
- [4] Simonette Pierrot, Flavien Liegeois, Julien Saby, et al. All fibre high repetition rate, high power picosecond laser and UV generation[J]. Fiber Laser Applications, 2011, OSA/FILAS.
- [5] K K Chen, J H V Price, D J Richardson, et al. Polarisation maintaining 100W Yb-fiber MPOA producing μ J pulses tunable in duration from 1 to 21ps[J]. Opt. Express, 2010, 18(14): 14385 – 14394.
- [6] Fan Ji, Lixin Xu, Hai Ming. Passively mode-locked fiber laser using SESAM[J]. Proc. of Spie, 2007, 6838(7): 1 – 5.
- [7] Wang Yuanxiang, Jiang Peipei, Shen Yanghang, et al. All fiberized master oscillator power amplifier structured pulsed Yb fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1861 – 1865. (in Chinese)
汪圆香, 姜培培, 沈永行, 等. 全光纤结构主振荡功率放大大型掺镱脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1861 – 1865.
- [8] 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 Journal of Lasers, 2009, 36(2): 281 – 284. (in Chinese)
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.
- [9] Liu Wei, Chen Tao, Dai Jianing, et al. All-fiberized Yb fiber laser with passively generated sub-nanosecond pulse output[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1214003. (in Chinese)
刘伟, 陈滔, 戴建宁, 等. 全光纤化的被动式亚纳秒脉冲 Yb 光纤激光器研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1214003.
- [10] Lin Dongfeng, Chen Shengping, Hou Jing, et al. Ultrashort pulsed fiber sources in MOPA configurations[J]. Optoelectronic Technology, 2008, 28(4): 277 – 282. (in Chinese)
林东风, 陈胜平, 侯静, 等. MOPA 结构的超短脉冲光纤光源[J]. 光电子技术, 2008, 28(12): 277 – 282.
- [11] Chen Shengping, Chen Hongwei, Hou Jing, et al. 30W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 1943 – 1949. (in Chinese)
陈胜平, 谌鸿伟, 侯静, 等. 30W 皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 1943 – 1949.
- [12] Xue Yuhao, Zhou Jun, Lei Siyuan, et al. The research development of fiber based high average power ultrashort pulse amplification[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(11): 28 – 34. (in Chinese)
薛宇豪, 周军, 雷思远等. 高平均功率超短脉冲激光光纤放大研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(11): 28 – 34.