

文章编号:1001-5078(2016)10-1234-04

· 激光器技术 ·

63.2 W 高峰值功率窄脉宽全光纤脉冲光纤激光器

张大勇, 张 昆, 朱 辰, 李 尧, 王雄飞, 张利明
(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结构的全光纤脉冲光纤激光器。种子光源是一个直接脉冲调制的 1064 nm 的外腔光纤布拉格光栅半导体激光器。峰值功率为 1000 mW 的种子 LD 经两级掺 Yb³⁺ 双包层光纤放大后, 在 100 kHz 重复频率下, 获得了平均功率 63.2 W、脉冲宽度 14.3 ns、光谱宽度(FWHM) 4.552 nm、光束质量 $M^2 = 1.09$ 的脉冲激光输出。在此实验基础上研制了光纤激光器样机。

关键词: 光纤激光器; 高重复频率; 窄脉宽; 全光纤化; 脉冲

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.013

All-fiber high peak power narrow pulse width fiber lasers with 63.2 W output

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

Abstract: An all-fiber high peak power laser based on master oscillator power amplifier structure is reported. The seed source is a directly pulse driven fiber Bragg grating laser diode at 1064 nm. The seed laser with peak power of 1000 mW is amplified by two stages Yb³⁺ doped double cladding fibers whose core diameters are 10 μm and 30 μm . The output pulse laser with average power of 63.2 W, pulse width of 14.3 ns, spectrum width(FWHM) of 4.552 nm and beam quality factor M^2 of 1.09 is obtained at repetition rate of 100 kHz. The prototype of fiber lasers is developed based on this experiment.

Key words: fiber lasers; high repetition rate; narrow pulse width; all-fiber; pulse

1 引言

光纤激光器由于其转换效率高、光束质量好、热管理简单、使用灵活等一系列优点近些年来发展非常迅速, 已经成为全固态激光技术中最热点的发展方向之一。光纤激光器技术的发展起步于 20 世纪 80 年代的光纤通信技术, 美国 Polariod 公司的研究人员提出了包层泵浦技术^[1], 奠定了光纤激光器技术快速发展的基础, 使之从光纤通信中分离出来, 呈现出日新月异的发展态势, 高重复窄脉冲光纤激光器是光纤激光器中重要的一类。高重复窄脉冲光纤激光器在工业加工、激光雷达、遥感探测和光电对抗

等领域有广泛的应用价值^[2], 特别是在激光雷达和光电对抗的军事应用领域, 高重频可以提高探测速度和对抗成功概率, 纳秒级窄脉宽可以提高探测精度、提高探测抗干扰能力, 因此高重频窄脉冲光纤激光器具有独特的应用优势。本文介绍了一种 1064 nm 高重频窄脉冲光纤激光器, 在频率 100 kHz 时输出功率 63.2 W; 在此基础上研制了一体化风冷样机。

2 技术方案

基于主振荡功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)结构的全光纤化激光器, 具有结构

作者简介: 张大勇(1975 -), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事固体激光和光纤激光器方面的研究。E-mail: zdy_75@sina.com

收稿日期: 2016-03-22

紧凑、工作稳定的特点,是实现高峰值功率纳秒级脉冲光纤激光器的主要方式之一。目前 MOPA 结构脉冲光纤激光器的种子光源主要有三种:一种是调 Q 固体激光器,2002 年, Limpert 等^[3]以调 Q 固体激光器作为种子光源,利用纤芯直径为 30 μm 的有源光纤进行放大,获得了平均功率 100 W、脉冲宽度 90 ns、重复频率 50 kHz 的脉冲激光输出;另一种是调 Q 光纤激光器,2007 年, Khitrov 等^[4]以调 Q 光纤激光器作为种子光源,利用纤芯直径为 30 μm 的掺 Yb^{3+} 光纤进行放大,获得了平均功率 21 W、脉冲宽度 45 ns、重复频率 20 kHz 的激光输出;最后一种是直接脉冲调制的激光二极管(LD),2008 年, Khitrov 等^[5]以 LD 作为种子光源,经过三级级联放大,获得了平均功率 50 W、脉冲宽度可调的脉冲激光输出。这三种种子光源在放大过程中各有特点:第一种调 Q 固体激光器结构简单,但其线宽较窄,非线性效应的阈值较低,为了抑制高峰值功率激光的非线性效应,放大过程中通常选用大纤芯直径光纤,不利于输出激光光束质量的控制,而且不能实现激光器整体的全光纤化;第二种调 Q 光纤激光器可以实现全光纤化,但其腔长较长,输出激光的脉宽较宽,且由于其输出的脉冲波形在放大过程中很难压窄,不易实现窄脉冲宽度激光输出;第三种直接脉冲调制的 LD 可以通过调制种子 LD 来灵活地控制最终的激光输出,但其输出平均功率很低,通常必须使用多级级联放大结构,使得系统比较复杂。

本文报道的光纤激光器采用了直接调制的 LD 种子源加两级光纤级联放大的技术方案。MOPA 结构全光纤脉冲激光器的结构示意图如图 1 所示。该激光器中所有光纤及光纤元器件均通过光纤熔接技术连接,实现了激光器的全光纤化。种子光源是一个波长为 1064 nm 的单横模外腔光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG) 半导体激光器。在两级之间使用隔离器将放大级隔离开来,防止反馈光对前级系统造成干扰。

种子光源采用电脉冲信号进行调制,输出的脉冲激光最高峰值功率为 1000 mW, 重复频率 100 kHz, 光谱宽度(FWHM)约为 0.3 nm。为了增加预放大器的单级增益,需要对小信号放大过程中的(Amplified Spontaneous Emission, ASE) 进行抑制。对脉冲激光器而言,产生的 ASE 主要会产生以下影响和危害:(1)ASE 是双向传输的,反向传输的 ASE 会损伤种子光源;(2)ASE 会导致光谱宽度展宽;(3)ASE 是连续光,会降低脉冲放大的效率。为了

抑制 ASE 的产生,增加信号光注入功率是最有效的办法。为此研究了不同脉冲波形在放大过程中的演变过程,发现超高斯波形的脉冲信号能在放大过程中被迅速压窄。因此,最终将种子光源调制为超高斯波形,脉冲宽度调制为 40 ns,在峰值功率保持不变条件下信号光平均功率提升了近 3 倍(与高斯型脉冲相比)。

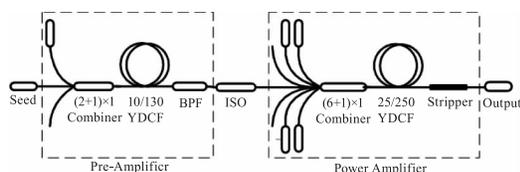


图 1 脉冲光纤激光器的方案原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the pulsed fiber laser

预放大级(Pre-Amplifier)为一个掺 Yb^{3+} 光纤放大器,信号光和泵浦光均通过一个 $(2+1) \times 1$ 合束器(Combiner)耦合进入双包层增益光纤。光纤合束器的信号输入和输出光纤均为 10 $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ 双包层光纤,纤芯的数值孔径为 0.075。泵浦源为 1 个中心波长在 915 nm 的 9 W 激光二极管,输出尾纤为 105 $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ 光纤,纤芯数值孔径为 0.22。增益光纤采用 10 $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ 双包层掺 Yb^{3+} 光纤,纤芯数值孔径为 0.075,内包层形状为八角形,数值孔径为 0.46,该光纤对 915 nm 的包层抽运光的吸收为 1.8 dB/m,光纤长度 5 m。用带通滤波器(BPF)滤除小信号放大中产生的放大的 ASE,以防止 ASE 对后级放大器信号光放大效率的影响。

由于经过预放大级放大后的激光功率已经足够大,功率放大级(Power Amplifier)也采用了一级放大结构。预放大级输出的信号光和泵浦光通过一个 $(6+1) \times 1$ 的光纤合束器耦合进入双包层增益光纤,合束器的信号光输入光纤为 10 $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ 双包层光纤,输出光纤为 25 $\mu\text{m}/250 \mu\text{m}$ 双包层光纤。泵浦源为 4 个 20 W 中心波长 976 nm 的激光二极管,输出尾纤为 105 $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ 光纤,纤芯数值孔径为 0.22。增益光纤为 25 $\mu\text{m}/250 \mu\text{m}$ 大模场双包层掺 Yb^{3+} 光纤,纤芯数值孔径 0.06,内包层数值孔径 0.47,在 976 nm 的吸收系数为 5 dB/m。采取了包层光剥离(Pump Dump)技术泄露掉内包层中的激光和剩余泵浦光。为避免端面反射引起的干扰振荡,光纤的输出端研磨成 8° 的斜角。

功率放大级的功率提升主要受限于增益光纤中

的各种非线性效应, 高峰值功率的脉冲光纤激光器中的受激拉曼散射 (SRS)、受激布里渊散射 (SBS)、自相位调制 (SPM) 等的非线性效应阈值较低, 会影响激光放大效率、劣化激光光谱, 严重时甚至会破坏光纤和器件。光纤中主要的非线性效应随光纤长度的增加变得严重, 但缩短光纤长度会带来对泵浦光的吸收不够、效率下降的问题, 如图 2 所示。为此, 在较少的牺牲吸收效率的情况下, 最大限度的缩短光纤长度, 来保证光谱质量。实验中, 功率放大级的增益光纤长度优化选取为 3 m, 剩余泵浦光由高效的包层光剥除器去除。

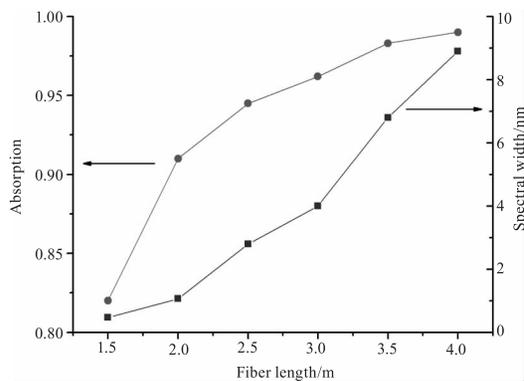


图 2 泵浦光的吸收和激光光谱随光纤长度的变化
Fig. 2 Absorption of pumping light and spectral width as function of fiber length

3 实验结果

当预放大器的泵浦注入功率超过 7 W 时, 预放大器的斜效率明显降低, 说明 ASE 没有得到有效抑制, 因此预放大器的泵浦注入功率被限定在 7 W。此时, 预放大器的输出平均功率 2.5 W, 重复频率 100 kHz, 脉冲宽度 38.7 ns, 光谱宽度 (FWHM) 展宽为 0.5 nm, 中心波长与种子光源波长相同。

将预放大器输出的激光耦合进功率放大器进行放大, 经过功率放大器后功率衰减为 1.9 W。功率放大器的最终输出功率与泵浦注入功率的关系如图 3 所示, 当抽运激光的功率达到 80 W 时, 获得了平均功率为 63.2 W 的脉冲激光输出, 其斜率效率达到 78%, 光-光转换效率接近 77%, 且没有出现增益饱和现象, 若进一步增加泵浦功率, 输出激光功率有可能继续提高。

为了控制输出激光的光束质量, 采取了多种措施。首先, 为了抑制大芯径光纤的高阶模输出, 采用盘绕增益光纤的弯曲损耗滤波技术来抑制高阶模式。其次, 由于包层光剥离的效率有限, 过小的光纤缠绕直径会使过多的高阶模式激光泄露到包层中

去, 光纤缠绕直径折衷选择为 10 cm, 最终实验证明继续缩小光纤盘绕直径并不能明显改善输出激光的光束质量。最后, 由于光纤熔接引入的模场失配会引起急剧的劣化激光光束质量, 光纤熔接必须保证模场的匹配。

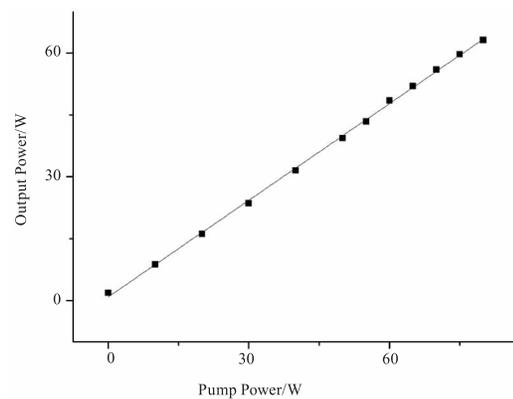


图 3 功率放大器光输出功率与抽运功率的关系

Fig. 3 Output power of the power amplifier as function of the pump power

当激光输出功率达到 63.2 W 时, 用 Photon 公司的光束质量测试仪 ModeScan 1780 对输出激光的光束质量进行测量, 其二维光束质量 M^2 分别为 1.08 和 1.09, 为近衍射极限输出, 其光斑三维分布如图 4 所示。

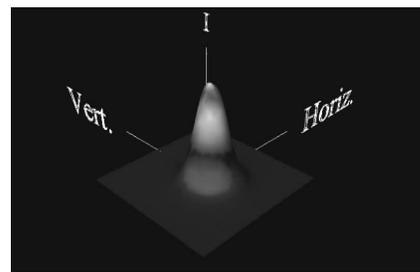


图 4 预放单元后输出激光的光斑分布

Fig. 4 Beam quality of output laser after Pre-Amplifier

用 YOKOGAWA 公司的光谱分析仪 AQ6317C 对输出激光的光谱进行了测量, 输出功率为 63.2 W 时的光谱如图 5 所示, 由于在放大过程中存在的自相位调制效应 (SPM), 光谱宽度 (FWHM) 展宽为 4.552 nm, 但没有观察到受激拉曼散射 (SBS)、受激布里渊散射 (SRS) 以及中心波长为 1030 nm 的 ASE。

由于对种子光源输出的光脉冲形状进行了特别的调制, 随着抽运功率的增加, 脉宽会逐渐变窄。使用 PIN 管探测器和数字示波器监控输出激光的脉冲波形, 图 6 为激光脉冲宽度随抽运功率的变化曲线。当总泵浦功率为 80 W 时, 输出激光的平均功率为 63.2 W, 脉冲宽度为 14.3 ns。

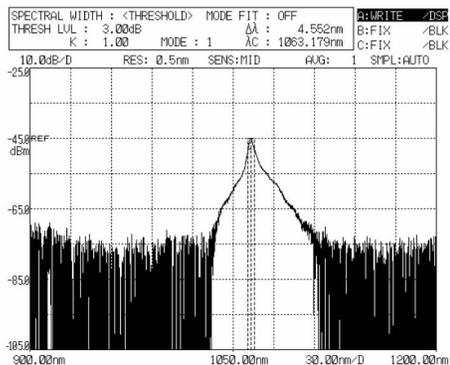


图 5 63.2 W 输出功率下激光的输出光谱

Fig.5 Spectrum of the fiber laser at the output power of 63.2 W

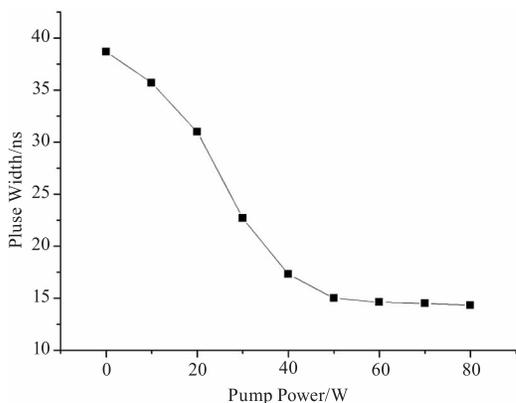


图 6 输出激光脉冲宽度随抽运功率的变化

Fig.6 Pulsed width as function of the pump power

4 激光器样机

在本实验基础上,研制了 50 W 样机,样机采用光电一体、全风冷化设计,如图 7 所示。由于激光器的高峰值功率高、结构紧凑和高可靠性,这种全光纤单模脉冲激光器在光电对抗、激光雷达等领域具有实际应用价值。



图 7 50 W 脉冲光纤激光器

Fig.7 Pulsed fiber lasers of 50 W output power

5 结 论

报道了一种采用 MOPA 结构,以脉冲调制的 LD 为种子光源进行两级放大的高功率单模脉冲光纤激光器,其输出峰值功率可达 44 kW,脉冲宽度 14.3 ns,光束质量因子 M^2 约为 1.09,整机光-光转换效率 72.6%。

参考文献:

- [1] E Snitzer, et al. Double-clad offset core Nd fiber laser [C]. Optical Fiber Sensors,1988:PD5.
- [2] Koroshetz J E. Fiber lasers for lidar [C]. Optical Fiber-Communication Conference,2005:OFJ4.
- [3] Limpert J,Zellme H, et al. High average power millijoule fiber amplifier system [C].//Conference on Lasers and Electro-Optics, Lasers and Electro-Optics. LongBeach: CLEO,2002:591-592.
- [4] V Khitrov, B Samson, D Machewirth, et al. High peak power pulsed single mode linearly polarized LMA Fiber amplifier and Q-switch laser [J]. SPIE, 2007, 6453:645305.
- [5] V Khitrov, B Samson, D Machewirth, et al. 50 W single-mode linearly polarized high peak power pulsed fiber laser with tunable ns durations and kHz - MHz repetition rates [C]. SPIE,2008,6873:68730C.