

基于半导体激光器调制技术的百瓦级线偏振 纳秒掺铥光纤激光器

师红星 刘江 刘昆 谭方舟 王璞

北京工业大学激光工程研究院, 国家产学研激光技术中心, 北京 100124

摘要 报道了基于半导体纳秒调制技术的百瓦级、线性偏振掺铥光纤激光器。该激光器采用调制半导体激光器作为种子源, 脉冲宽度为 20 ns, 重复频率在 200 kHz~1 MHz 范围内连续可调。当重复频率为 200 kHz 时, 经主功率振荡放大器(MOPA)得到 100 W 平均功率输出。最高输出功率时, 由于存在增益整形机制, 脉冲宽度由 20 ns 降低为 6 ns。相应的峰值功率达到 83 kW, 单脉冲能量为 0.5 mJ, 最高输出功率下系统输出偏振消光比达到 17 dB。据本文所知, 这是首次报道基于半导体调制技术的百瓦级、纳秒脉宽、线偏振的掺铥光纤激光器。

关键词 激光器; 光纤激光器; 半导体激光器调制; 纳秒脉冲; 线偏振

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0802005

Hundred-Watt-Level Linearly-Polarized Diode-Seeded Nanosecond Thulium-Doped Fiber Laser

Shi Hongxing Liu Jiang Liu Kun Tan Fangzhou Wang Pu

National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology,
Beijing 100124, China

Abstract High average power linearly-polarized nanosecond-pulsed, modulated diode seeded thulium-doped fiber laser based on master oscillator power amplifier (MOPA) system is reported. The modulated seed laser delivers 20 ns pulses with tunable repetition rate from 200 kHz to 1 MHz. The MOPA yields 100 W average output power at 200 kHz repetition rate. The pulse duration reduces to 6 ns during amplification due to gain reshaping effect, which lead to a higher peak power of 83 kW with pulse energy of 0.5 mJ. To the best of our knowledge, this is the first demonstration of average output power exceeding 100 W from a linear polarization, thulium doped fiber laser using modulated diode as a seed.

Key words lasers; fiber laser; modulated diode laser; nanosecond pulse width; linear polarization

OCIS codes 140.3510; 140.2020; 060.2420

1 引 言

高功率掺铥光纤激光器由于其光束质量好、系统结构紧凑可靠、波长位于人眼安全波段等优点, 在激光传感、光谱测量、材料加工、非线性转换等方面具有广阔的应用前景。近年, 随着高功率 793 nm 半导体抽运源的发展, 2 μm 高功率掺铥光纤激光器输出功率得到了迅速提高。2 μm 连续激光输出功率已经达到千瓦^[1], 皮秒与飞秒掺铥光纤激光器也达到了百瓦级功率输出^[2-3]。在纳秒脉冲掺铥光纤激光器方面, 高峰值功率与高脉冲能量脉冲已经得到报道, 但其平均功率还没有突破百瓦。例如 2014 年 Tang 等^[4]利用声光调制器(AOM)调 Q 经

收稿日期: 2015-01-20; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61235010)、国家自然科学基金面上项目(61177048)

作者简介: 师红星(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光器、高功率光纤放大器等方面的研究。

E-mail: shihongxingll@163.com

导师简介: 王璞(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

过主振荡功率放大(MOPA)结构放大后得到平均功率 52 W,脉冲宽度 822 ns 的激光脉冲输出,这也是目前报道的 2 μm 纳秒掺铥光纤激光器的最高平均功率。2013 年,Stutzki 等^[9]利用 AOM 进行腔内调 Q,振荡腔直接输出平均功率 33 W,75 ns 脉冲输出。然而上述实验采用自由空间 AOM 进行腔内调 Q,自由空间器件降低了系统可靠性与稳定性,同时 2 μm 波段 AOM 市场价格较昂贵。相比而言,直接调制半导体激光器技术具有成本低廉、系统容易集成特点,并且已经在 1 μm 与 1.5 μm 波段得到了较广泛的应用与报道^[6-8]。这驱使人们开始探索直接调制半导体技术在 2 μm 领域的应用。2013 年,Balliu 等^[9]使用直接调制 2 μm 半导体激光器得到 200 ns 脉冲输出,经 MOPA 放大后输出平均功率为 100 mW,单脉冲能量也只有 1 μJ。2014 年,南安普顿大学 Li 等^[10]报道了调制半导体掺铥光纤激光器,平均功率为 12.5 W,脉冲峰值功率为 12.5 kW。2 μm 波段半导体调制光纤激光器输出功率有待进一步提高以适应其在高功率激光测量、激光加工等方面的应用。

本文报道了基于半导体激光器调制技术的百瓦级线偏振纳秒掺铥光纤激光器,采用调制半导体激光器做种子源,通过 MOPA 系统,获得了 2 μm 百瓦级纳秒脉冲。系统输出脉冲宽度为 20 ns,重复频率在 200 kHz~1 MHz 范围内连续调节。当重复频率为 200 kHz 时,经 MOPA 结构得到 100 W 平均功率输出,最高功率输出时脉冲为 6 ns,单脉冲能量达 0.5 mJ,相应峰值功率达到 83 kW,最高功率输出时偏振消光比达 17 dB。

2 实验装置

实验装置图如图 1 所示,半导体激光器(Eblana 公司)中心波长为 1999.5 nm,输出调制脉冲宽度为 20 ns。该脉冲使用 1550 nm 波段激光抽运的铥-铈共掺光纤放大器进行功率放大,光纤(Coractive TH512)纤芯/包层的尺寸为 9/125 μm,纤芯的数值孔径为 0.16,1550 nm 处的吸收系数为 13 dB/m。光脉冲信号经过两级预放大后,输出功率可达到 40 mW。实验中采用由环形器与光纤布拉格光栅(FBG)组成的滤波器来移除放大过程中产生的放大自发辐射(ASE),FBG 的中心波长为 2000 nm,光谱半峰全宽为 1 nm,反射率为 80%。两级之间加入偏振无关隔离器来防止每级放大器之间产生的回馈光干扰放大器。经过由环形器与 FBG 组成的滤波器后,加入一个偏振相关隔离器作为起偏器。第三级与第四级保偏预放大器使用 793 nm 的多模半导体激光器作为抽运源,最大尾纤输出功率为 12 W,采用多模(2+1)×1 合束器将抽运光耦合进入增益光纤,增益光纤采用 Nufern 公司的双包层保偏(PM)掺铥光纤(TDF 10/130),光纤纤芯/包层尺寸为 10/130 μm,纤芯/包层的数值孔径为 0.15/0.46,增益光纤在 793 nm 的吸收为 4.7 dB/m,光纤长度为 3 m。两级预放大器之间通过熔接保偏隔离器来保证系统的偏振消光比,同时防止各级放大器之间反馈光影响放大效率。

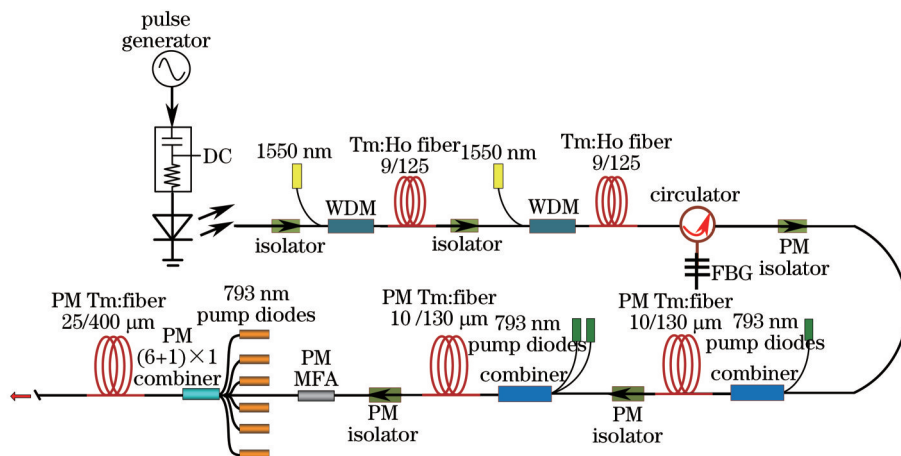


图 1 半导体激光器调制种子注入的 MOPA 放大系统实验装置图

Fig.1 Schematic diagram of diode-seeded fiber MOPA system

主功率放大级采用大模场面积保偏掺铥光纤作为增益光纤(Nufern),光纤的纤芯/包层直径为 25/400 μm,纤芯/包层数值孔径为 0.09/0.46。增益光纤在 790 nm 抽运波长处的吸收系数为 2.4 dB/m。保偏掺铥光纤长度为 5 m。在放大器之前熔接保偏模场匹配器,来降低光从小芯径光纤进入大模场光纤时模场失配造成的损耗,模场匹配器的偏振消光比能够保持在 17 dB 以上。抽运源为 6 个 790 nm 的多模半导体激光器,通过(6+1)×1 合束器将抽运功率合束到掺杂光纤中,总耦合抽运功率为 220 W。掺铥光纤输出端熔接了 0.5 m 的无源 25/

400 μm 光纤作为输出光纤, 光纤末端采用 8° 角切割, 避免光纤断面的菲涅耳反射产生激光寄生振荡^[11]。

3 实验数据及讨论

实验中的调制脉冲由任意波形发生器产生, 经过偏置电路后加载到半导体激光器上, 调制输出的光脉冲为 20 ns, 在固定的偏置电压下重复频率在 200 kHz~1MHz 连续可调谐。图 2 为脉冲宽度为 20 ns 时的脉冲宽度示意图, 图 3 为重复频率为 200 kHz 的脉冲序列图。从图 3 中可看出调制的脉冲序列具有良好的稳定性, 实验中采用的示波器带宽为 1 GHz, 2 μm 光电探头的带宽为 7.5 GHz。

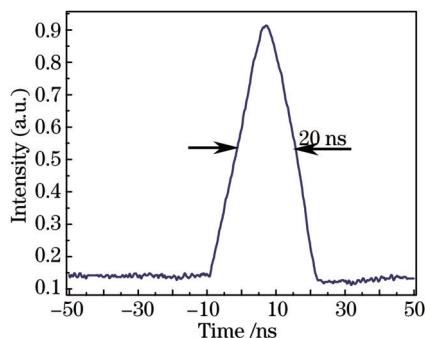


图 2 纳秒脉冲半导体调制种子源脉冲宽度

Fig.2 Pulse width of nanosecond diode-modulated seed

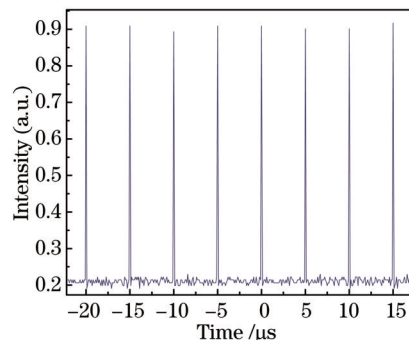


图 3 纳秒脉冲半导体调制种子源脉冲序列

Fig.3 Pulse train of nanosecond modulated diode-seed

重复频率为 200 kHz 时, 调制半导体激光器输出的光脉冲平均功率为 10 μW 。种子光功率较低, 在放大过程中比较容易容易出现 ASE 光。如图 4 所示, 调制信号光经过两级纤芯放大后, 输出激光光谱中存在很强的 ASE, 其峰值在 1900 nm 处(如黑色曲线所示)。放大器中 ASE 的存在, 不仅会降低系统的光学信噪比, 而且会影响放大器的放大效率。为了滤除激光中的 ASE, 实验中采用由光纤环形器与光纤布拉格光栅组成光谱滤波器, 光纤布拉格光栅的中心波长为 2000 nm, 光谱半峰全宽为 1 nm。经过滤波器后的光谱如红色曲线所示, 光谱中的 ASE 被移除后, 输出激光的光学信噪比得到加强, 以利于后级放大器的功率放大。由于光纤环形器具有较高的插入损耗, 同时随着 ASE 的滤除, 经过滤波器后激光功率由 33 mW 降低为 0.5 mW。

经过滤波器后, 偏振相关隔离器被用作起偏器使激光起偏后进入全保偏放大器, 隔离器的偏振消光比为 20 dB。第三级预放大器采用全保偏器件, 合束器采用的信号输入光纤为 6/125 μm 双包层光纤, 增益光纤纤芯/包层直径为 10/130 μm , 抽运采用尾纤 105/125 μm 的多模半导体激光器, 抽运功率为 3 W 时, 该级输出激光功率为 100 mW, 输出信号消光比大于 20 dB。为了进一步提高种子光功率以便于为主功率放大器提供足够的信号光功率, 实验中采用第四级全保偏光纤预放大器。当抽运功率 12 W 时, 此级的输出激光功率达 3 W。随后, 实验中采用偏振相关隔离器来防止反馈光扰动前级放大器, 同时可以保持系统偏振消光比达到 20 dB。同时, 在信号光进入大模场保偏光纤放大器之前, 熔接了保偏模场匹配器以降低小芯径光纤与大芯径光纤之间的传

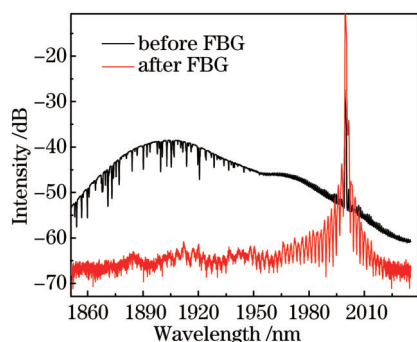


图 4 重复频率为 200 kHz 下两级预放大后产生的 ASE 与经过 FBG 后的光谱图

Fig.4 Optical spectra of amplified seed and spectra after FBG at 200 kHz repetition

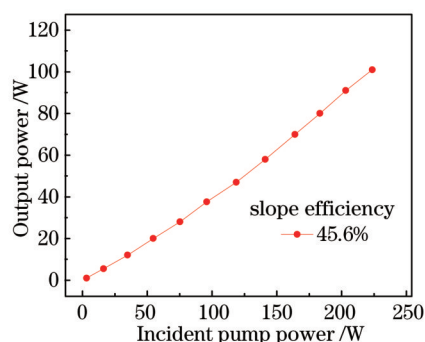


图 5 200 kHz 重复频率下输入功率与输出功率的关系图

Fig.5 Average output power at 200 kHz repetition versus incident pump power

输损耗。模场匹配器损耗为0.37 dB,偏振消光比大于17 dB。放大的信号光经过模场匹配器后进入主功率放大器。主功率放大器采用6个40 W多模半导体抽运源,通过(6+1)×1合束器合束后总抽运功率达到220 W。图5为主放大级抽运功率与输出功率关系图,从图中可看出,输出功率随着抽运功率的增加而增加,在最高抽运功率下,得到最高输出功率为100 W,相应的单脉冲能量为0.5 mJ,放大器的斜效率为45.6%。

图6为百瓦输出时脉冲宽度与种子光脉冲宽度的对比图,可以看出,平均功率达到100 W时脉冲前沿被放大,后沿功率密度较低,这使得脉冲宽度变窄,脉冲宽度为6 ns。这是由于脉冲在放大过程中存在脉冲增益整形机制,由于放大器的增益饱和,在放大过程中脉冲前沿相对于后沿具有更高的增益,这就导致了脉冲前沿会得到更充分的放大,前沿会逐渐增高,后沿会出现塌陷的现象。脉冲窄化导致了脉冲峰值功率的提高,在200 kHz情况下,100 W输出时,脉冲峰值功率达到83 kW。

最大功率输出时光谱如图7所示,图中为重复频率200 kHz、100 W功率输出时的光谱图,从图中可以看出放大过程中由于峰值功率的提高,出现了较强的非线性效应。激光器百瓦输出时偏振消光比为17 dB,光谱宽度增宽到0.4 nm。

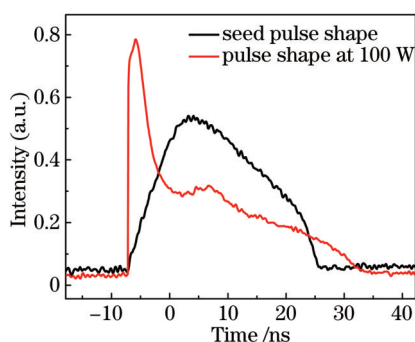


图6 100 W输出时脉冲形状与种子形状对比
Fig.6 Contrast between seed pulse shape and pulse at 100 W output

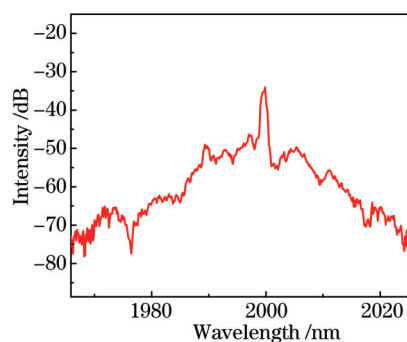


图7 20 ns 200 kHz脉冲100 W输出时的光谱
Fig.7 Optical spectrum at maximum output power with 20 ns pulse width and 200 kHz repetition rate

4 结 论

报道了利用调制半导体激光器作为种子源,经主振荡功率放大器,得到百瓦量级、线偏振2 μm激光输出。在重复频率200 kHz,20 ns时得到100 W功率输出,相应的单脉冲能量达到0.5 mJ,最大功率输出时脉冲窄化为6 ns,相应峰值功率达到83 kW,最大功率时输出偏振消光比达到17 dB。据本文所知,这是首次报道基于半导体激光器调制技术的百瓦、纳秒、线偏振掺铥光纤激光器。

参 考 文 献

- 1 S D Jackson. Toward high-power mid-infrared emission from a fiber laser[J]. Natphoton, 2012, 6: 423-431.
- 2 J Liu, J Xu, K Liu, *et al.*. High average power picosecond pulse and supercontinuum generation from a thulium-doped, all-fiber amplifier[J]. Opt Lett, 2013, 38(201): 4150-4153.
- 3 F Stutzki, C Gaida, M Gebhardt, *et al.*. 152 W average power Tm-doped fiber CPA system[J]. Opt Lett, 2014, 39(16): 4671-4674.
- 4 Y Tang, X Li, Z Yang, *et al.*. 50-W 2-μm nanosecond all-fiber-based thulium-doped fiber amplifier[J]. IEEE J Quantum Electron, 2014, 20(5): 3100707.
- 5 F Stutzki, F Jansen, C Jauregui, *et al.*. 2.4 mJ, 33 W Q-switched Tm-doped fiber laser with near diffraction-limited beam quality[J]. Opt Lett, 2013, 38(2): 97-99.
- 6 A Malinowski, P Gorman, C A Codemard, *et al.*. High-peak-power, high-energy, high average power pulsed fiber laser system with versatile pulse duration and shape[J]. Opt Lett, 2013, 38(22): 4686-4689.
- 7 Damian N Schimpf, Clemens Ruchert, Dirk Nodop, *et al.*. Compensation of pulse-distortion in saturated laser amplifiers[J]. Opt Express, 2008, 16(22): 17637-17646.
- 8 G Sobon, P Kaczmarek, A Antonczak, *et al.*. Pulsed dual-stage fiber MOPA source operating at 1550 nm with arbitrarily shaped output pulses[J]. Appl Phys B, 2011, 105(4): 721-727.

- 9 E Balliu, M Olivero, A Braglia, *et al.*. Pulse thulium doped fiber laser at 1.94 μm based on a seed diode[C]. SPIE, 2013, 8601: 860133.
- 10 Z Li, A M Heidt, P S Teh, *et al.*. High-energy diode-seeded nanosecond 2 μm fiber MOPA systems incorporating active pulse shaping[J]. Opt Lett, 2014, 39(6): 1569–1572.
- 11 Liu Jiang, Liu kun, Tan Fangzhou, *et al.*. Hundred watt level all fiber thulium-doped fiber laser and superfluorescent source[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0402005.
- 刘 江, 刘 昆, 谭方舟, 等. 百瓦级全光纤掺铥光纤激光器及超荧光光源[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402005.

栏目编辑: 宋梅梅