

高功率被动调 Q 纳秒脉冲掺铥光纤激光器

刘 江 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 报道了高功率全光纤 MOPA 结构的纳秒脉冲掺铥光纤激光器, 其包括低功率被动调 Q 掺铥光纤激光器种子源, 以及两级全光纤结构 790 nm 半导体抽运的高功率掺铥光纤放大器。随抽运功率的改变, 激光种子源产生的脉冲重复频率在 77~240 kHz 可调, 最窄激光脉冲宽度为 250 ns, 最大平均输出功率为 73 mW。经过两级全光纤掺铥光纤放大器放大之后, 最高平均输出功率达到了 20 W, 相应的单脉冲能量为 100 μ J, 激光脉冲宽度为 270 ns, 中心波长为 1966 nm。

关键词 激光器; 光纤放大器; 掺铥光纤; 被动调 Q; 中红外激光

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1202006

High-Power Passively Q-Switched Nanosecond-Pulsed Thulium-Doped Fiber Laser

Liu Jiang Wang Pu

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

Abstract A high power all-fiber nanosecond-pulsed thulium-doped fiber master oscillator power amplifier (MOPA) system that consists of low power passively Q-switched thulium-doped fiber laser seed and two-stage thulium-doped double-clad all-fiber amplifiers pumped by high power multimode diodes at 790 nm is studied. The repetition rate of the thulium-doped fiber laser seeder is tunable from 77 kHz to 240 kHz with the increase of pump power, the minimum pulse width is measured to be 250 ns and the maximum average output power is 73 mW. Two-stage double-clad thulium-doped all-fiber amplifiers are used to boost average power to 20 W, corresponding to single pulse energy of 100 μ J. The pulse width is 270 ns, and laser center wavelength is 1966 nm.

Key words lasers; fiber amplifier; thulium-doped fiber; passively Q-switched; mid-infrared lasers

OCIS codes 140.3510; 140.3280; 140.3070; 140.3540

1 引 言

近年来,随着高功率多模半导体激光器输出功率的提高以及大芯径双包层掺铥增益光纤制作工艺水平的进步,基于主振荡功率放大(MOPA)结构的连续掺铥光纤激光器的输出功率已达千瓦量级^[1-2]。与连续掺铥光纤激光器相比,纳秒脉冲掺铥光纤激光器在保持光纤激光器高光束质量、高系

统稳定性以及高转换效率等优点的同时,具有更高的激光峰值功率,更利于掺铥光纤激光器在激光材料加工、激光医疗、激光雷达等领域的应用。目前,实现纳秒脉冲掺铥光纤激光输出主要采用的技术手段包括:主动调 Q 技术、增益开关技术以及被动调 Q 技术等。尽管主动调 Q 技术采用空间结构的元器件,具有价格昂贵、结构复杂、环境稳定性差等不足,然

收稿日期: 2013-06-03; **收到修改稿日期**: 2013-07-22

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)、北京市自然科学基金 B 类重点项目(KZ2011100050011)

作者简介: 刘 江(1982—),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: liujiang@emails.bjut.edu.cn

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)

而主动调 Q 开关具有损伤阈值高,更易实现高功率激光脉冲输出。2007 年, Eichhorn 等^[3]采用声光调制器(AOM)作为调 Q 开关,得到了脉冲宽度为 41 ns 的掺铊脉冲光纤激光器,最大平均输出功率为 30 W,相应的激光单脉冲能量为 270 μJ 。最近, Stutzki 等^[4]也报道了高功率 AOM 主动调 Q 的纳秒脉冲掺铊光纤激光器,实验采用了大芯径掺铊光子晶体光纤作为增益介质,实现了 33 W 高平均功率输出,激光单脉冲能量达到了 2.4 mJ,脉冲宽度为 15 ns,激光峰值功率为 150 kW。在增益开关技术方面,2007 年, Jiang 等^[5]采用增益开关技术以及较短的掺铊增益光纤,得到了脉冲宽度为 10 ns 的掺铊脉冲光纤激光器,最高重复频率为 500 kHz。2010 年, Tang 等^[6]报道了基于增益开关技术空间结构的高功率纳秒脉冲掺铊光纤放大器,该光纤放大器产生了百瓦量级的平均输出功率,然而该光纤放大器采用了非全光纤结构设计,可能存在环境稳定性差等不足。与主动调 Q 技术所使用的声光开关(AOM)相比,基于半导体材料或晶体材料的可饱和吸收体的被动调 Q 技术具有结构简单、成本低廉等优点,也广泛应用于 2.0 μm 波段掺铊光纤激光器被动调 Q。2005 年, Qamar 等^[7]利用 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体作为可饱和吸收体实现了被动调 Q 掺铊光纤激光脉冲输出,激光脉冲宽度为 330 ns。2008 年, Kivistö 等^[8]利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为被动调 Q 开关,得到了脉冲宽度为 20 ns 的掺铊激光脉冲输出,实验所用的 SESAM 调制深度高达 70%,最大平均输出功率为 800 mW,激光单脉冲能量为 15 μJ 。该脉冲宽度也为目前 SESAM 被动调 Q 掺铊光纤激光器所得到的最窄激光脉宽。2011 年,本课题组也首次报道了包层抽运环形腔结构的石墨烯被动调 Q 掺铊光纤激光器^[9-10],其最大平均输出功率为 4.5 mW,最高脉冲能量为 85 nJ。由于整个激光谐振腔的长度较长,得到的最窄激光脉冲宽度为 1.4 μs 。

本文采用 SESAM 作为可饱和吸收体,通过缩短激光谐振腔的长度,得到了稳定的重复频率为几十千赫兹的纳秒激光脉冲输出,激光最大平均输出功率为 73 mW,最窄脉冲宽度为 250 ns。利用该被动调 Q 掺铊脉冲光纤激光作为种子源,经过两级全光纤结构掺铊光纤放大器后,平均输出功率达到了 20 W,相应的激光单脉冲能量为 100 μJ ,激光脉冲宽度为 270 ns,中心波长为 1966 nm。

2 实验装置

如图 1 所示,高功率全光纤结构被动调 Q 纳秒脉冲掺铊光纤振荡器采用了线形腔结构设计,该实验结构与以前报道的被动锁模掺铊飞秒脉冲光纤激光器的结构相似^[11]。激光谐振腔主要包括:1550 nm 的连续掺铊光纤激光器、商用的单包层掺铊光纤、分数比为 30/70 的激光分束器、1550/2000 nm 的波分复用器(WDM)以及半导体可饱和吸收镜。其中自制的 1550 nm 连续掺铊光纤激光器作为激光抽运源,其最大平均输出功率为 900 mW,激光中心波长为 1550 nm,3 dB 光谱带宽为 0.15 nm。商用的单包层掺铊光纤作为激光增益介质,该增益光纤的纤芯直径为 9.0 μm ,包层直径为 125 μm ,纤芯抽运吸收率约为 20 dB/m,实验中掺铊光纤的长度为 1.3 m。由于被动调 Q 激光脉冲的脉宽与光子在激光谐振腔内往返运行的时间成反比^[12],为了实现更窄的调 Q 激光脉冲输出,激光谐振腔的总长度控制在 2.1 m 左右。实验中选用了调制深度为 30% 的 SESAM 作为可饱和吸收体,其工作的中心波长为 1960 nm,恢复时间为 500 fs。由于被动调 Q 激光脉冲的宽度与可饱和吸收体的调制深度成反比^[8],因此更高的调制深度更容易实现更窄的激光脉冲输出。

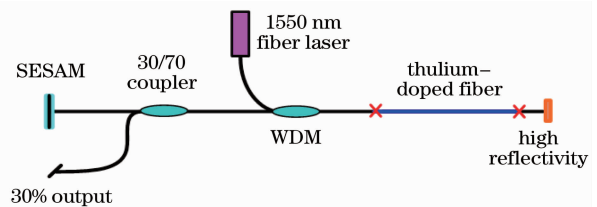


图 1 被动调 Q 纳秒脉冲掺铊光纤激光种子源实验装置图

Fig. 1 Schematic setup of the passively Q-switched nanosecond-pulsed thulium-doped fiber oscillator

3 实验结果与分析

当 1550 nm 连续掺铊光纤激光器的平均输出功率增加到 210 mW 时,适当的调节 SESAM 与光纤端面之间的耦合,掺铊光纤激光种子源开始产生稳定的被动调 Q 激光脉冲输出。由于此时激光抽运功率相对较低,调 Q 激光脉冲的重复频率为 77 kHz,平均输出功率也仅为 7 mW,采用带宽为 1 GHz 的实时示波器以及 7.5 GHz 的光电探头测得调 Q 激光脉冲的宽度为 740 ns。如图 2 所示,随着激光抽运功率的增加,被动调 Q 纳秒脉冲掺铊光

纤激光光子源的平均输出功率也相应增加。当抽运功率增加到 900 mW 时,此时掺铥光纤激光光子源的平均输出功率达到了 73 mW,平均输出功率未能进一步增加只是受连续掺铥光纤激光器最大输出功率的限制。

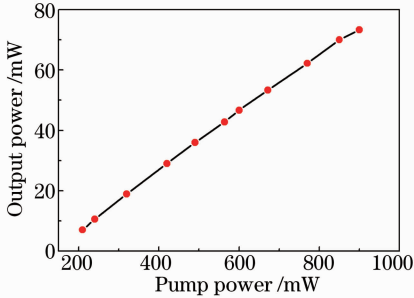


图2 被动调Q纳秒脉冲掺铥光纤激光种子源平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 2 Average output power of the passively Q-switched nanosecond-pulsed thulium-doped fiber oscillator with the increase of pump power

图3所示为被动调Q纳秒脉冲掺铥光纤激光种子源的重复频率和脉冲宽度随激光抽运功率变化的关系图。随着激光抽运功率的增加,被动调Q激光脉冲的重复频率相应增加,最高重复频率达到了240 kHz。然而,由于增益窄化作用^[8],被动调Q激光的脉冲宽度随抽运功率的增加而急剧减小。当抽运功率增加到最大值900 mW时,激光脉冲宽度从最初的740 ns减小到了250 ns。然而受最大抽运功率的限制,被动调Q激光脉冲的宽度没能进一步减小。因此,实验中可以进一步提高1550 nm连续掺铥光纤激光器的输出功率来窄化调Q掺铥光纤激光器的脉冲宽度。然而,由于SESAM受到损伤阈值的影响,更高的抽运功率将导致SESAM相对

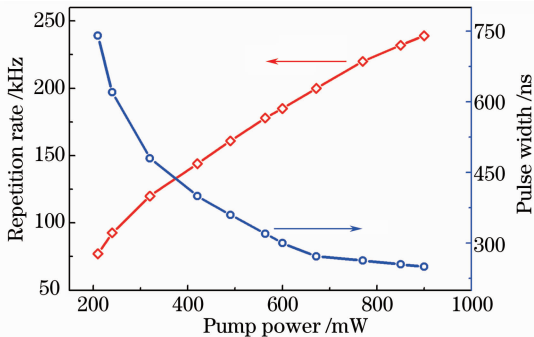


图3 被动调Q纳秒脉冲掺铥光纤激光种子源的重复频率和脉冲宽度随抽运功率的变化

Fig. 3 Repetition rate and pulse width of the passively Q-switched nanosecond-pulsed thulium-doped fiber oscillator with the increase of pump power

更加容易损坏。为了避免较高的抽运功率导致SESAM损坏,可以改变实验中激光分束器的输出比来降低SESAM可饱和吸收体承受的功率密度,避免SESAM在高抽运功率情况下损坏。比如70%的激光功率用于脉冲输出,而剩余的30%用于激光在谐振腔内形成反馈。另外,也可以将吸收率较低的单包层单模掺铥光纤换成吸收率较高的双包层单模掺铥光纤来进一步缩短激光谐振腔的长度,以得到更窄的纳秒激光脉冲输出。

对于塑料聚合物材料加工以及激光雷达等应用需求来说,一般需要平均输出功率为几十瓦,脉冲能量为几十微焦、甚至几百微焦的脉冲光纤激光器,因此为了得到更高的平均输出功率和单脉冲能量,实验中采用了两级全光纤结构掺铥光纤放大器来对纳秒脉冲掺铥光纤激光种子源进行功率放大,该两级掺铥光纤放大器与以前报道的光纤放大器相同^[13]。其中掺铥光纤预放大器主要包括:中心波长为790 nm的多模半导体激光器,最大输出功率为10 W;6 m长的双包层单模掺铥增益光纤,纤芯直径为10.0 μm ,内包层直径为130 μm (790 nm处包层抽运吸收率约为3 dB/m)。掺铥光纤功率放大器主要包括:6个中心波长为790 nm的高功率多模半导体激光器作为激光抽运源,其总的输出功率为69 W;4.7 m长的大芯径双包层掺铥增益光纤,纤芯直径为20.0 μm ,内包层直径为400 μm (790 nm处包层抽运吸收率约为4.5 dB/m)。

图4所示为被动调Q纳秒脉冲掺铥光纤激光种子源重复频率为200 kHz的脉冲串,从图中可以看出SESAM被动调Q所得到的纳秒脉冲相对比较稳定,幅值波动也较小。在此重复频率下激光种子源的平均输出功率为53 mW。此时激光脉冲宽

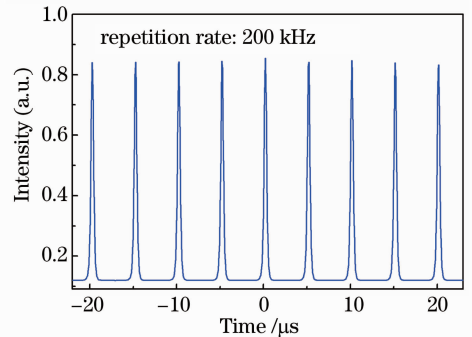


图4 重复频率为200 kHz时被动调Q掺铥光纤激光种子源输出的脉冲串

Fig. 4 Pulse train of the passively Q-switched thulium-doped fiber oscillator at 200 kHz

度 τ_{pulse} 为 280 ns, 激光中心波长为 1964 nm, 3 dB 光谱带宽 $w_{1/2}$ 为 5.8 nm, 如图 5 所示。当掺铥光纤预放大器的抽运功率增加到 9 W 时, 纳秒脉冲掺铥光纤激光种子源的平均输出功率被放大到了 1.7 W。在掺铥光纤功率放大器中, 当激光抽运功率增加到 69 W 时, 光纤功率放大器产生了 20 W 的平均输出功率, 如图 6 所示。此时激光单脉冲能量为 100 μJ ,

激光斜率效率为 42%, 平均输出功率没能进一步增加只是受限于当前可用的最大抽运功率。由于掺铥光纤功率放大器中的掺铥光纤的纤芯直径为 20 μm , 数值孔径为 0.11, 光纤纤芯能容纳的模式数 V 值大约为 3.52, 因此理论上该纤芯直径的光纤支持的模式大约为 5 个横模, 因此, 光纤放大器在平均输出功率为 20 W 时光束质量 M^2 应该小于 1.5。

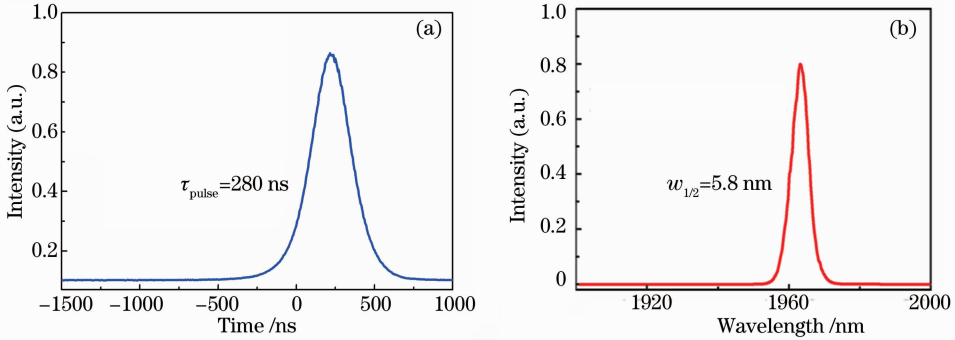


图 5 被动调 Q 掺铥光纤激光种子源的 (a) 脉冲宽度和 (b) 输出光谱

Fig. 5 (a) Pulse width and (b) optical spectrum of the passively Q-switched thulium-doped fiber oscillator



图 6 掺铥光纤功率放大器平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 6 Average output power of the thulium-doped fiber power amplifier with the increase of pump power

图 7 所示为掺铥光纤功率放大器平均输出功率为 20 W 时输出激光脉冲的脉宽和光谱, 测得激光脉冲的宽度 τ_{pulse} 为 270 ns, 比种子源的脉冲宽度稍

微有所减小, 相应的激光脉冲的峰值功率为 370 W, 激光中心波长为 1966 nm, 3 dB 光谱带宽 $w_{1/2}$ 为 6.1 nm。下一步, 在纳秒脉冲掺铥光纤激光种子源方面, 将进一步降低被动调 Q 掺铥光纤激光种子源的脉冲宽度, 争取得到脉冲宽度为几十纳秒的激光脉冲输出; 或者采用增益开关技术实现几纳秒到几十纳秒的激光脉冲输出。而在高功率掺铥光纤功率放大器方面, 将采用更大芯径的掺铥光纤作为增益介质以减小光纤强烈的非线性效应, 以及采用更高功率的 790 nm 的多模半导体激光器作为抽运源以实现百瓦量级的全光纤结构纳秒脉冲掺铥光纤激光器, 从而满足目前 2.0 μm 波段掺铥光纤激光器在科学研究、先进制造、军事国防等领域的迫切应用需求。

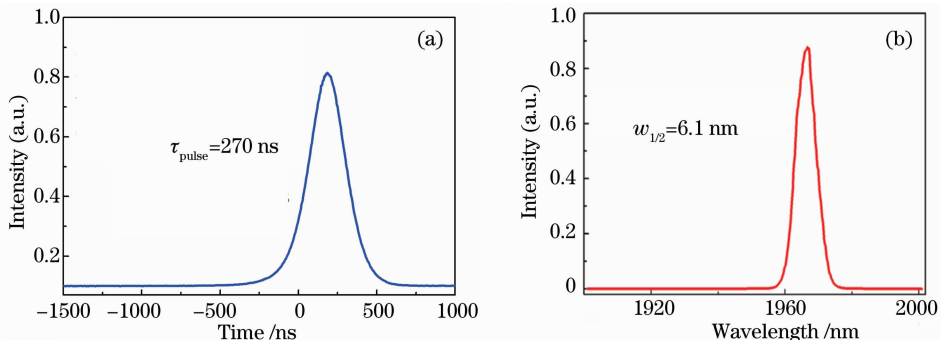


图 7 掺铥光纤功率放大器的 (a) 脉冲宽度和 (b) 输出光谱

Fig. 7 (a) Pulse width and (b) optical spectrum of the thulium-doped fiber power amplifier

4 结 论

本文报道了结构紧凑的 SESAM 被动调 Q 纳秒脉冲掺铥光纤激光器,该光纤激光器产生了稳定的重复频率为 77~240 kHz 的激光脉冲输出,激光最大平均输出功率为 73 mW,最窄激光脉冲宽度为 250 ns。利用该被动调 Q 纳秒脉冲掺铥光纤激光器作为种子源,经过两级全光纤结构掺铥光纤放大器后,平均输出功率达到了 20 W,相应的激光单脉冲能量为 100 μ J,激光脉冲宽度为 270 ns,中心波长为 1966 nm。据我们所知,该结果为目前国内全光纤结构纳秒脉冲掺铥光纤激光器所报道的最高输出功率。该高功率纳秒脉冲掺铥光纤激光器可广泛应用于工业材料加工、激光医疗以及激光雷达等领域。

参 考 文 献

- 1 P F Moulton, G A Rines, E Slobodtchikov, *et al.*. Tm-doped fiber lasers; fundamentals and power scaling[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15(1): 85-92.
- 2 Thomas Ehrenreich, Ryan Leveille, Imtiaz Majid, *et al.*. 1-kW, all-glass Tm fiber laser[C]. SPIE, 2010, 7580: .
- 3 M Eichhorn, Stuart D Jackson. High-pulse-energy actively Q-switched Tm³⁺-doped silica 2 μ m fiber laser pumped at 792 nm [J]. Opt Lett, 2007, 32(19): 2780-2782.
- 4 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.
- 5 M Jiang, P Tayebati. Stable 10 ns, kilowatt peak-power pulse generation from a gain-switched Tm-doped fiber laser[J]. Opt Lett, 2007, 32(13): 1797-1799.

- 6 Y Tang, L Xu, Y Yang, *et al.*. High-power gain-switched Tm³⁺-doped fiber laser [J]. Opt Express, 2010, 18 (22): 22964-22972.
- 7 F Z Qamar, T A King. Passive Q-switching of the Tm-silica fiber laser near 2 μ m by Cr²⁺:ZnSe saturable absorber crystal[J]. Opt Commun, 2005, 248(4-6): 501-505.
- 8 S Kivistö, R Koskinen, J Paajaste, *et al.*. Passively Q-switched Tm³⁺, Ho³⁺-doped silica fiber laser using a highly nonlinear saturable absorber and dynamic gain pulse compression[J]. Opt Express, 2008, 16(26): 22058-22063.
- 9 Liu Jiang, Wang Pu. Graphene passively Q-switched Tm-doped fiber laser at 2.0 μ m [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38 (10): 1008004.
刘江,王璞. 2.0 μ m 石墨烯被动调 Q 掺铥全光纤激光器 [J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1008004.
- 10 J Liu, J Xu, P Wang. Graphene-based passively Q-switched 2 μ m thulium-doped fiber laser [J] Opt Commun, 2012, 285 (24): 5319-5322.
- 11 Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser at 2.0 μ m [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0902001.
刘江,王璞. 高功率被动锁模 2.0 μ m 掺铥飞秒脉冲光纤激光器 [J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0902001.
- 12 Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke, *et al.*. Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0802001.
刘江,吴思达,王科,等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调 Q 掺铥光纤激光器 [J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802001.
- 13 Liu Jiang, Wang Pu. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102001.
刘江,王璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102001.

栏目编辑:宋梅梅