

百瓦级全光纤掺铥光纤激光器及超荧光光源

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 报道了一个全光纤主振荡功率放大(MOPA)结构的窄线宽掺铥连续光纤激光器,该高功率光纤激光器由窄线宽连续光纤激光种子源和两级包层抽运掺铥光纤放大器组成。激光种子源经过两级双包层掺铥光纤放大器后,最大平均输出功率为 120 W,功率放大器的斜率效率高达 60%,输出激光的中心波长为 1986 nm,3 dB 光谱带宽为 0.48 nm,平均输出功率未能进一步提高仅受限于最大抽运功率。此外,利用该两级掺铥光纤放大器,得到了平均输出功率为 122 W 的宽带超荧光光源,放大后的超荧光光源的中心波长为 1990 nm,3 dB 光谱带宽为 25 nm。

关键词 激光器; 光纤激光器; 光纤放大器; 掺铥光纤; 全光纤结构

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0402005

Hundred-Watt-Level All-Fiber Thulium-Doped Fiber Laser and Superfluorescent Source

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 An all-fiber continuous-wave thulium-doped fiber laser with narrow linear width based on a master oscillator power amplifier (MOPA) system that consists of a seed source and two-stage thulium-doped all-fiber amplifiers pumped by fiber-pigtailed multimode diodes at 793 nm is reported. The maximum output power is 120 W with a slope efficiency of 60% after the seed source amplified by a two-stage thulium-doped amplifier. The center wavelength is 1986 nm and 3 dB spectral width is only 0.48 nm. The maximum output power is currently limited by available pump power. In addition, a broadband thulium-doped superfluorescent source with average output power of 122 W based on the same MOPA configuration is reported. The center wavelength is 1990 nm and 3 dB spectral width is 25 nm.

Key words lasers; fiber laser; fiber amplifier; thulium-doped fiber; all-fiber configuration

OCIS codes 140.3510; 140.3280; 140.3070

1 引 言

近年来,高功率光纤激光器成为激光技术领域研究热点之一。随着高亮度半导体抽运源输出功率的增加以及双包层大模场面积掺杂光纤的出现,光纤激光器的输出功率得到了迅速提高。在 1.0 μm 波段,掺铥光纤激光器量子亏损小;同时铥离子系统属于准二能级系统,避免了高浓度掺杂时

铥离子间的能量传递^[1],光-光转换效率可达 70%~80%,从而掺铥光纤成为 1.0 μm 波段理想的激光增益介质。目前,基于振荡器结构的掺铥光纤激光器已经实现了千瓦级输出功率^[2],主振荡功率放大(MOPA)结构的掺铥单模光纤激光器也实现了 9.6 kW 的功率输出,多模光纤激光器的输出功率也达到了近 100 kW。众所周知,1.0 μm 波段

收稿日期: 2013-09-29; 收到修改稿日期: 2013-11-04

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: 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)

掺镱光纤激光器具有众多优势,且技术十分成熟,但仍然不能满足某些特殊应用(比如:人眼安全激光雷达、激光手术刀、塑料聚合物材料加工等)的需求。而 $2.0\ \mu\text{m}$ 波段掺铥光纤激光器在激光医疗、军事国防、材料加工、中红外非线性频率转换等领域有广泛应用。近几年, $2.0\ \mu\text{m}$ 掺铥光纤激光器得到了突飞猛进的发展^[3-15]。高功率掺铥光纤激光器可使用 $793\ \text{nm}$ 的高功率多模半导体激光器进行抽运,抽运光吸收效率高;并且铥离子之间交叉弛豫,量子效率可达 200% ,理论上斜率效率可达 80% ,实验上斜率效率也达到了 74% ^[9],接近掺镱光纤激光器的斜率效率。这使得掺铥光纤激光器将 $2.0\ \mu\text{m}$ 波段激光器的输出功率提高到了一个新的水平。在高功率掺铥连续光纤激光器方面,国外已实现千瓦级输出功率的掺铥光纤激光器^[10],单频单模掺铥光纤激光器的输出功率也已达到了 $608\ \text{W}$ ^[11]。然而国内掺铥光纤激光器方面的研究起步较晚,与国外还存在较大差距。此外,高功率窄线宽掺铥光纤激光器在激光雷达、高功率光谱组束等方面具有非常重要的应用。最近基于振荡器结构^[3-5]和 MOPA 结构的高功率窄线宽掺铥光纤激光器^[11-14]已见报道。相比之下,基于 MOPA 结构的高功率窄线宽掺铥光纤激光器具有稳定性高、输出线宽窄等优点。

本文报道了一种全光纤 MOPA 结构的高功率窄线宽 $2.0\ \mu\text{m}$ 连续掺铥光纤激光器。实验中,低

功率的窄线宽连续光纤激光种子源经过两级掺铥光纤放大器之后获得了 $120\ \text{W}$ 的高平均输出功率,相应的斜率效率高达 60% ,激光中心波长为 $1986\ \text{nm}$, $3\ \text{dB}$ 光谱带宽仅为 $0.48\ \text{nm}$ 。在不同的输出功率水平下,光谱的形状、中心波长、光谱带宽没有发生明显的变化,与激光种子源保持一致。平均输出功率未能进一步提高仅受限于抽运功率。此外,基于同样的 MOPA 结构,也实现了 $122\ \text{W}$ 的宽带超荧光输出,与连续激光相比,该高功率宽带超荧光光源具有输出稳定,无自脉冲、无模式竞争等优点。

2 实验装置

全光纤 MOPA 结构的百瓦级窄线宽连续掺铥光纤激光器的工作原理如图 1 所示,由低功率的连续掺铥光纤激光种子源和两级全光纤结构掺铥光纤放大器组成。其中,连续激光种子源采用与文献^[14]相同的环形腔结构,不同之处在于三端口环形器第二端口熔接的光纤布拉格光栅(FBG)的中心波长为 $1985\ \text{nm}$, $3\ \text{dB}$ 光谱带宽小于 $2\ \text{nm}$,为了增加平均输出功率,FBG 的反射率为 15% 。实验中,由于掺铥增益光纤与无源光纤(SMF-28)直接熔接的损耗以及三端口环形器的插入损耗较大,该环形腔激光种子源阈值高达 $1.5\ \text{W}$ 。在抽运源功率为 $6\ \text{W}$ 时,光纤激光种子源的输出功率为 $250\ \text{mW}$,受可用抽运功率的限制,输出功率没能进一步提高。

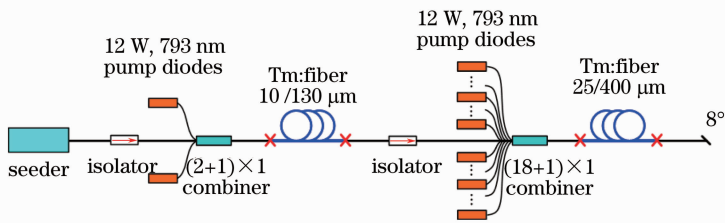


图 1 百瓦级全光纤结构掺铥光纤激光器及超荧光光源实验装置图

Fig. 1 Schematic setup of all-fiber hundred-watt-level thulium-doped fiber laser and superfluorescent source

两级全光纤结构包层抽运掺铥光纤放大器如图 1 所示,第一级为光纤预放大级,其主要作用是对种子光进行初级放大,以防止在功率放大时,因种子光功率不足而产生放大的自发辐射(ASE)。该掺铥光纤预放大级通过偏振无关隔离器与种子源相连,光纤预放大级采用同向抽运。它由半导体激光抽运源、 $(2+1)\times 1$ 抽运合束器、 $4\ \text{m}$ 长的双包层单模掺铥光纤组成。其中,半导体抽运源中心波长为 $793\ \text{nm}$,最大输出功率为 $12\ \text{W}$,经 $(2+1)\times 1$ 抽运合束器耦合进增益光纤;掺铥增益光纤的纤芯直径为 $10.0\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.15 ,内包层直径为

$130\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.46 ,该双包层增益光纤在 $793\ \text{nm}$ 处包层吸收系数为 $3\ \text{dB/m}$ 。第二级为光纤功率放大级,主要作用为对输入的信号光进行高功率放大。该级由高功率偏振无关隔离器与预放大级相连。它由半导体激光抽运源、 $(18+1)\times 1$ 抽运合束器和一段 $5\ \text{m}$ 长的保偏(PM)双包层大模场面积(LMA)掺铥光纤组成。其中,抽运源由 18 个中心波长为 $793\ \text{nm}$ 、最大输出功率为 $12\ \text{W}$ 的半导体激光器组成,经 $(18+1)\times 1$ 抽运合束器耦合进增益光纤;掺铥增益光纤的纤芯直径为 $25\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.09 ,内包层直径为 $400\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.45 ,该

增益光纤在 793 nm 处包层吸收系数大约为 2.4 dB/m。为了方便冷却双包层大模场面积掺铥光纤,在增益光纤之后熔接了大约 0.7 m 长的匹配无源光纤,输出端面切成 8°角,避免产生菲涅耳反射,防止在功率放大器中产生寄生振荡影响激光特性。

3 实验结果与分析

在连续掺铥光纤激光种子源输出功率为 250 mW 时,使用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6375)测得该种子激光的输出光谱,如图 2 所示。从图 2 可看出种子源的中心波长为 1986 nm,3 dB 光谱宽度(FWHM)为 0.48 nm。由于激光种子源的输出功率仅为 250 mW,为了给光纤功率放大器提供足够高的信号功率,该种子源的平均功率在预放大级被放大到了 5 W。如图 3 所示,为了分析放大过程中激光特性的变化,测试了光纤预放大级在输出功率分别为 3、4、5 W 时的光谱。从图 3 可以看出不同输出功率下光谱形状、中心波长以及光谱带宽都与种子光基本一致。

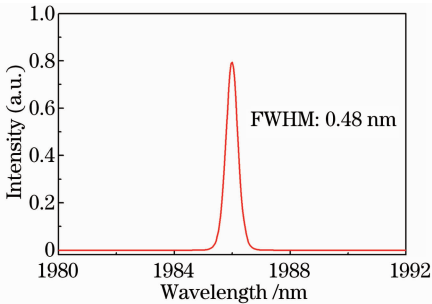


图 2 连续掺铥光纤激光种子源的输出光谱
Fig. 2 Optical spectrum of continuous-wave thulium-doped fiber laser seeder

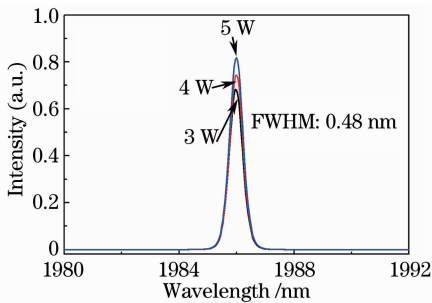


图 3 掺铥光纤预放大器不同输出功率时的输出光谱
Fig. 3 Optical spectra of thulium-doped fiber pre-amplifier at different output powers

考虑到掺铥光纤功率放大级的最高抽运功率可达 205 W,同时参考掺铥光纤激光器的最高转换效率,粗略估计在此放大器中最高将产生近百瓦的热

量。因此为了保证高效地交叉弛豫以实现稳定的激光输出特性,单纯的空气冷却已不能满足散热需求^[11]。采用自制的水冷系统对该掺铥光纤放大级进行循环冷却,实验中维持冷却水的温度在 15 °C 左右。在预放大器输出功率为 5 W 的情况下,逐步提高功率放大器的抽运功率,得到了输出功率随注入抽运增加的变化情况,如图 4 所示。从图 5 可以看出输出功率随着注入抽运功率基本呈线性增加趋势,斜率效率为 60%,在抽运功率为 205 W 时,最高平均输出功率为 120 W,此时仍未出现功率饱和的情况,说明输出功率未能进一步提高仅受限于当前的最大抽运功率。从图 4 可看出激光器的输出效率基本没有任何降低,由于光纤中受激拉曼散射、受激布里渊散射等非线性效应将导致激光输出功率的急剧下降,因此可以判定该光纤激光器系统中没有发生非线性效应。这得益于所使用的增益光纤具有较高的掺杂浓度和较大的纤芯面积,有效地提高了非线性效应产生的阈值。

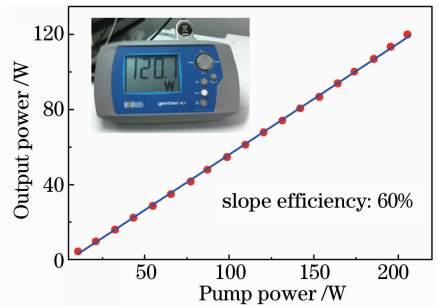


图 4 掺铥光纤功率放大器平均输出功率随注入抽运功率的变化

Fig. 4 Average output power of thulium-doped fiber power amplifier with increase of incident pump power

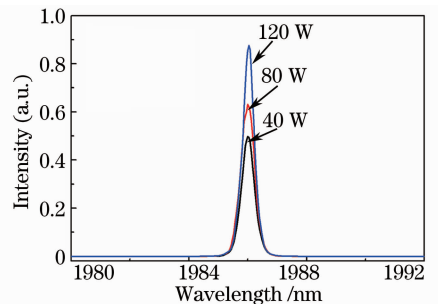


图 5 掺铥光纤功率放大器不同输出功率时的输出光谱
Fig. 5 Optical spectra of thulium-doped fiber power amplifier at different output powers

为了分析激光输出功率对激光特性的影响,测试了掺铥光纤功率放大级在输出功率分别为 40、80、120 W 时的输出光谱,如图 5 和图 6 所示。从图 5 可以看出,不同输出功率下光纤激光器的光谱形

状、中心波长、光谱宽度基本不变。在最高输出功率为 120 W 时,输出激光的中心波长为 1986 nm,光谱宽度为 0.48 nm,基本与种子激光一致。

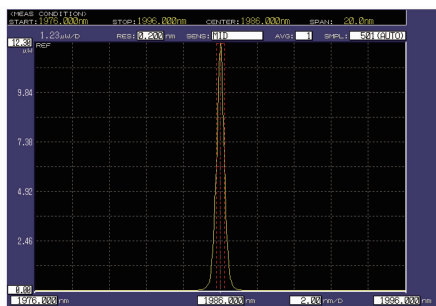


图 6 掺铥光纤功率放大器输出功率为 120 W 时的输出光谱

Fig. 6 Optical spectrum of thulium-doped fiber power amplifier at power of 120 W

另外,基于同样的全光纤 MOPA 结构,将连续掺铥光纤激光种子源换为宽带的超荧光光源,研究了宽带超荧光的放大特性。宽带超荧光种子源的结构如图 7 所示。它由一个 50/50 的光纤分束器、半导体抽运源、 $(2+1)\times 1$ 抽运合束器、双包层掺铥光纤和一个偏振无关隔离器组成。其中双包层掺铥增益光纤的长度为 3 m,纤芯直径为 $10\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.15,内包层直径为 $130\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.46,该双包层增益光纤在 793 nm 处的包层吸收系数为 3 dB/m;半导体抽运源的中心波长为 793 nm,最大输出功率为 6 W,经 $(2+1)\times 1$ 抽运合束器耦合进增益光纤;偏振无关隔离器工作的中心波长为 2000 nm,带宽为 40 nm,最大承受功率为 5 W,主要作用是抑制激光的产生。由于整个装置采用同向抽运方式,大部分超荧光将从反向抽运端输出^[16],为了提高同向输出端的输出功率,在反向输出端连接了一个 50/50 的分束器作为全反射镜来使用,以提高正向超荧光的输出功率。

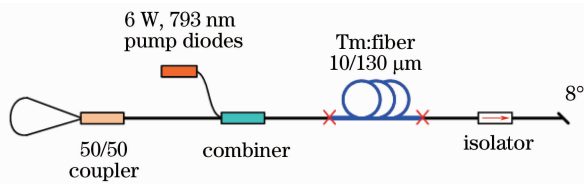


图 7 全光纤结构宽带超荧光种子源实验装置图
Fig. 7 Schematic setup of all-fiber broadband superfluorescent seed source

实验中,研究了宽带超荧光种子源在输出功率分别为 100、200、400 mW 情况下的输出光谱,如图 8 所示。当抽运功率为 6 W 时,最大平均输出功率

为 400 mW,此时超荧光光源的光谱范围为 1920~2090 nm,中心波长为 1970 nm,3 dB 光谱带宽为 43 nm。

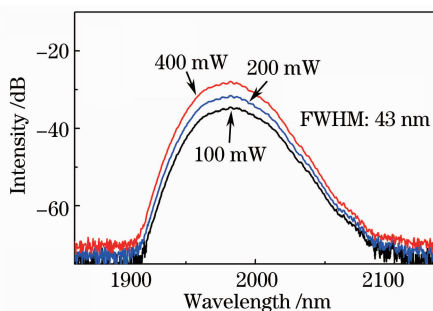


图 8 宽带超荧光种子源不同输出功率时的输出光谱
Fig. 8 Optical spectra of broadband superfluorescent seed source at different output powers

将该宽带超荧光种子源的输出功率稳定在 400 mW,经两级掺铥光纤放大器后输出功率最高可达 122 W,超荧光光源输出功率随注入功率的变化情况与连续掺铥光纤激光器基本一致,效率可达 60.5%。图 9 为超荧光光源输出功率分别为 40、80、120 W 时的光谱。从图 9 可看出,随着输出功率的提高光谱形状基本不变。当输出功率为 122 W 时,输出光谱范围为 1930~2070 nm,中心波长为 1990 nm,3 dB 光谱带宽为 25 nm。

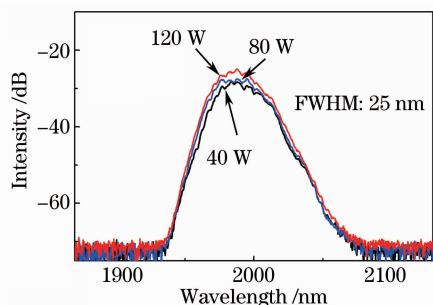


图 9 掺铥光纤功率放大器不同输出功率时的输出光谱
Fig. 9 Optical spectra of thulium-doped fiber power amplifier at different output powers

4 结 论

报道了一个全光纤 MOPA 结构的百瓦级窄线宽 $2.0\ \mu\text{m}$ 连续掺铥光纤激光器。它由一个低功率连续掺铥光纤激光种子源和两级双包层掺铥光纤放大器组成。实验中,输出功率为 250 mW 的光纤激光种子经过两级掺铥光纤放大器后,获得了 120 W 高功率激光输出,光纤功率放大器的斜率效率高达 60%,此时测得激光中心波长为 1986 nm,3 dB 光谱带宽为 0.48 nm,且在不同功率水平下光谱特性基

本与种子激光保持一致。此类高功率全光纤窄线宽掺铥光纤激光器可应用于光谱组束,实现更高功率的激光输出。此外,基于同样的全光纤 MOPA 结构,实现了 122 W 的宽带超荧光输出,光谱范围为 1930~2070 nm,中心波长为 1990 nm,3 dB 光谱带宽为 25 nm。与连续激光相比,该高功率宽带超荧光光源具有输出稳定,无自脉冲、无模式竞争等优点。

参 考 文 献

- 1 S D Jackson. Towards high-power mid-infrared emission from a fiber laser[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 423-431.
- 2 Y Jeong, J Sahu, D Payne, *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- 3 Y Tang, C Huang, S Wang, *et al.*. High-power narrow-bandwidth thulium fiber laser with an all-fiber cavity[J]. *Opt Express*, 2012, 20(16): 17539-17544.
- 4 Z Yunjun, Y Baoquan, J Youlun, *et al.*. LD-cladding-pumped 50 pm linewidth Tm³⁺-doped silica fiber laser[J]. *Opt Express*, 2008, 16(11): 7715-7719.
- 5 F Wang, D Shen, D Fan, *et al.*. Spectrum narrowing of high power Tm³⁺ fiber laser using a volume Bragg grating[J]. *Opt Express*, 2010, 18(9): 8937-8941.
- 6 Du Geguo, Zhao Junqing, Zhang Lingcong, *et al.*. Studies on Tm-doped double-clad fiber lasers[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 020005.
杜戈果, 赵俊清, 张灵聪, 等. 掺铥双包层光纤激光器研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 020005.
- 7 Wang Fei, Shen Deyuan, Long Jingyu, *et al.*. High-power widely-tunable Tm³⁺ fiber master oscillator power amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602009.
汪飞, 沈德元, 龙井宇, 等. 高功率、宽调谐掺 Tm 光纤主振荡功率放大器[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602009.
- 8 S D Jackson, T A King. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2008, 23(18): 1462-1464.
- 9 S D Jackson. Cross relaxation and energy transfer upconversion processes relevant to the functioning of 2 μm Tm³⁺-doped silica fiber lasers[J]. *Opt Commun*, 2004, 230(1): 197-203.
- 10 T Ehrenreich, R Leveille, I Majid, *et al.*. 1-kW, all-glass Tm fiber laser[C]. *SPIE*, 2010, 7580: 758016.
- 11 G D Goodno, L D Book, J E Rothenberg. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(8): 1204-1206.
- 12 L Pearson, J W Kim, Z Zhang, *et al.*. High-power linearly-polarized single-frequency thulium-doped fiber master-oscillator power-amplifier[J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 1607-1612.
- 13 L Shah, R A Sims, P Kadwani, *et al.*. Integrated Tm³⁺ fiber MOPA with polarized output and narrow linewidth with 100 W average power[J]. *Opt Express*, 2012, 20(18): 20558-20563.
- 14 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.
- 15 Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser at 2.0 μm[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0902001.
刘江, 王璞. 高功率被动锁模 2.0 μm 掺铥飞秒脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0902001.
- 16 Liu Jiang, Wang Pu. Thulium-doped all-fiber broadband superfluorescent source at 2 μm wavelength [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0202006.
刘江, 王璞. 掺铥全光纤结构 2.0 μm 波段宽带超荧光光源[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0202006.

栏目编辑: 宋梅梅