

# 掺铥全光纤结构 2.0 $\mu\text{m}$ 波段宽带超荧光光源

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结构 2.0  $\mu\text{m}$  波段宽带超荧光光源。超荧光种子源采用双包层掺铥光纤作为增益介质,中心波长为 790 nm 的多模半导体激光器作为抽运源,获得了稳定的中心波长为 1952 nm 的宽带超荧光输出,最大输出功率为 220 mW,3 dB 光谱带宽为 40 nm。超荧光种子源经过一级双包层掺铥光纤放大器后,输出功率达到了 2.6 W,光纤放大器斜率效率为 46%,相应的光谱范围为 1900~2100 nm,3 dB 光谱带宽为 33 nm。

**关键词** 光纤光学;光纤放大器;超荧光;掺铥光纤

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0202006

## Thulium-Doped All-Fiber Broadband Superfluorescent Source at 2 $\mu\text{m}$ Wavelength

Liu Jiang Wang Pu

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

**Abstract** A high power 2.0  $\mu\text{m}$  thulium-doped broadband amplified spontaneous emission (ASE) source is reported by using an all-fiber master oscillator power-amplifier (MOPA) configuration. The ASE seed source produces average output power of about 220 mW by using a segment of thulium-doped double-clad fiber pumped by fiber-pigtailed multimode diodes at 790 nm. The center wavelength and the 3 dB bandwidth are 1952 nm and 40 nm, respectively. A thulium-doped all-fiber amplifier is used to boost average output power to 2.6 W with a slope efficiency of 46% with respect to the launched pump power. The emission spans the wavelength range from 1900 nm to 2100 nm with a 3 dB bandwidth of 33 nm, and the maximum output power of the ASE fiber amplifier is currently limited by available pump power.

**Key words** fiber optics; fiber amplifier; superfluorescence; thulium-doped fiber

**OCIS codes** 140.3510; 140.6630; 140.3070

### 1 引 言

光纤激光器以其优良的光束质量、无可比拟的散热特性、高效的电光转换效率、稳定的激光性能以及较低的维护成本,逐步在工业制造、激光医疗以及军事国防等领域获得越来越多的用户青睐与市场份额,并进一步成为各研究机构研究与开发的热点。超荧光属于放大的自发辐射(ASE),故超荧光光源(SFS)又称为 ASE 光源。基于单模掺杂光纤所产

生的超荧光具有方向性好、环境稳定性高、荧光谱线宽等优点,其在光纤传感器、光纤探测器以及航天导航级的光纤陀螺仪中得到越来越广泛的应用。同时,超荧光光源与激光相比,具有无自脉冲、无弛豫振荡、无模式竞争、极高时间稳定性等突出优点。因此,高功率光纤超荧光光源被认为是一种宽光谱、高稳定性兼具激光特性以及荧光特性的新型高亮度光纤光源。过去几年间,高功率光纤超荧光光源的研

**收稿日期**: 2012-09-05; **收到修改稿日期**: 2012-10-24

**基金项目**: 国家自然科学基金(61235010,61177048)和北京市自然科学基金(KZ2011100050011)资助课题。

**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)

究取得了令人瞩目的进展<sup>[1-6]</sup>。2006年, Wang等<sup>[7]</sup>报道了在1.0 μm波段空间结构、输出功率达110 W的宽带超荧光光源,该光源采用24/550 μm的大芯径双包层掺铥光纤作为增益介质,掺杂光纤较大的纤芯直径有效抑制了激光振荡的产生,从而实现了光谱范围为1032~1120 nm的超荧光输出,其光谱带宽达到了40 nm,斜率效率为68%。此外在1.0 μm波段,最近本课题组<sup>[8,9]</sup>也实现了全光纤结构百瓦量级输出的高功率宽带超荧光光源,超荧光放大器的单程放大增益达到了近30 dB。2011年, Schmidt等<sup>[10]</sup>报道了全光纤结构中心波长为1030 nm的窄带超荧光光源,利用两个窄带的光纤布拉格光栅(FBG)来限制超荧光种子源的光谱带宽,通过多级放大器后最终得到了带宽为12 pm的窄带超荧光光源,最高输出功率达到了697 W。而关于2 μm波段宽带超荧光光源的研究报道较少, Shen等<sup>[11]</sup>报道了空间结构为2.0 μm波段宽带超荧光光源,他们采用纤芯直径为25 μm的双包层掺铥光纤作为增益介质,中心波长为790 nm的高功率多模半导体激光器作为抽运源,实现了平均功率为11 W的宽带超荧光输出,光谱范围为1930~1988 nm。近年来,由于2.0 μm波段宽带超荧光光源在光谱分析、气体传感以及激光医疗相干层析等领域具有重要应用,因此研制高功率全光纤结构2.0 μm波段宽带超荧光光源具有重要意义。而目前全光纤结构2.0 μm波段宽带超荧光光源的研究报道较少。

本文采用双包层掺铥光纤作为增益介质,中心波长为790 nm的多模半导体激光器作为抽运源,获得了稳定的中心波长为1952 nm的宽带超荧光输出,最大输出功率为220 mW。该超荧光种子源

经过一级双包层掺铥光纤放大器后,输出功率达到了2.6 W,斜率效率为46%,相应的光谱范围为1900~2100 nm,3 dB光谱带宽为33 nm。由于宽带超荧光光源作为种子源时,光纤放大器具有单程放大增益高<sup>[4]</sup>、功率输出稳定等优点,因此,利用该全光纤结构宽带超荧光作为种子源,通过一级高功率光纤放大器放大后即可实现几千瓦的功率输出。

## 2 实验装置

掺铥宽带超荧光光源采用了主振荡功率放大(MOPA)结构设计,如图1所示。超荧光种子源主要包括光纤耦合输出的790 nm多模半导体激光器、多模抽运合束器、掺铥双包层光纤、2.0 μm波段偏振无关隔离器。其中增益介质为6 m长的掺铥双包层单模光纤,掺铥双包层单模光纤的纤芯直径为6.0 μm,数值孔径为0.23,内包层直径为125 μm,数值孔径为0.45。此掺铥增益光纤在790 nm处包层抽运吸收率大约为1.4 dB/m。而中心波长为790 nm的高功率多模半导体激光器作为抽运源,其最大输出功率为6 W,输出尾纤为105/125 μm的双包层无源光纤,数值孔径为0.22。由于多模抽运合束器在790 nm波段处损耗较大,最后从抽运合束器输出的最大功率为5.6 W。抽运合束器的信号端熔接有2.0 μm波段偏振无关的隔离器,该隔离器工作的中心波长为2000 nm,工作带宽为±20 nm,最大隔离度大于35 dB。为了得到较高的单端输出,实验采用了反向抽运方式,隔离器的输出端作为超荧光的输出端,而掺铥增益光纤的另一端采用8°角切割,从而有效抑制了激光振荡产生,实现了高功率超荧光输出。

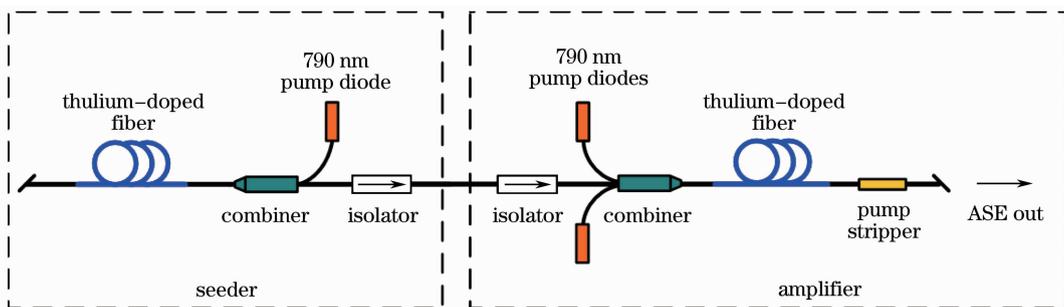


图1 全光纤结构2.0 μm波段宽带超荧光光源实验装置图

Fig.1 Schematic setup of the all-fiber superfluorescence source at 2.0 μm wavelength

## 3 实验结果与分析

随着抽运功率的增加,掺铥光纤正反两个方向

都将产生超荧光输出,并且输出功率都不断增加,图2为ASE种子源反向输出功率随抽运功率变化

的关系图。当抽运功率增加到 5.6 W 时,反向输出的超荧光的最大功率为 220 mW,而正向输出功率大约为 50 mW,正向输出功率明显低于反向输出功率。这是因为在抽运功率一定的情况下,沿掺铥双包层光纤正向传播的超荧光在传播过程中重新被掺铥光纤吸收,因此最后从正向端输出的超荧光功率较低;而超荧光在反向传播过程中不断得到放大,导致反向输出功率不断增加<sup>[7]</sup>。此外,正反两个方向输出的超荧光功率之差还与光纤两输出端的反射率存在很大关系<sup>[12]</sup>,通过优化光纤两输出端的角度可以实现光纤超荧光光源近单端输出。图 3 为 ASE 种子源在不同输出功率情况下的光谱,从中可以看出随着抽运功率的增加光谱形状基本保持不变,但中心波长逐渐向长波长方向移动,而 3 dB 光谱带宽稍微变窄,这种变化趋势是由于短波长方向光的重吸收损耗增加所致,该变化趋势也与 1.0  $\mu\text{m}$  波段光纤超荧光光源相似<sup>[7]</sup>。在反向最大输出功率为 220 mW 时,采用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6375)测得反向传播的超荧光的中心波长为 1952 nm,光谱范围为 1850 ~ 2100 nm,3 dB 光谱带宽为 40 nm。

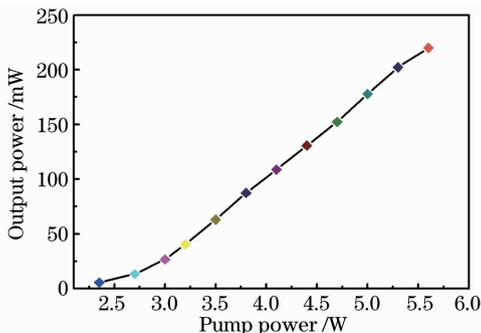


图 2 ASE 种子源反向输出功率随抽运功率的变化  
Fig. 2 Average output power of the ASE seed source with the increase of pump power

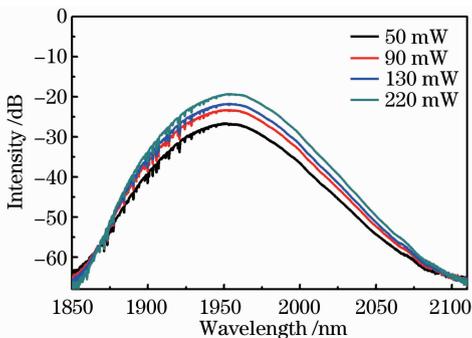


图 3 ASE 种子源输出光谱随输出功率的变化  
Fig. 3 Optical spectra of the ASE seed source for different output powers

实验中双包层掺铥光纤放大器主要包括偏振无关的隔离器、总输出功率为 10 W 的多模半导体激光器、 $(2+1)\times 1$  的多模抽运合束器、6 m 长的掺铥双包层光纤、抽运光剥离器等。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,该掺铥增益光纤在 790 nm 处包层抽运吸收率大约为 3 dB/m。另外,为了避免放大过程中输出光纤端面的菲涅耳反射产生激光振荡,超荧光光纤放大级的输出端也采用  $8^\circ$  角切割。如图 4 所示,ASE 种子光经过光纤放大器后,放大器的平均输出功率随光纤放大器的抽运功率几乎呈线性增加。当种子源注入放大级的功率为 200 mW 时,光纤放大器最大输出功率达到了 2.6 W (此时注入抽运功率为 8.4 W)。相应的斜率效率为 46%,而输出功率的进一步提高则受限于最大抽运功率,另外,通过优化掺铥光纤的长度以及对掺铥光纤降温,相应的斜率效率还可得到进一步提高。

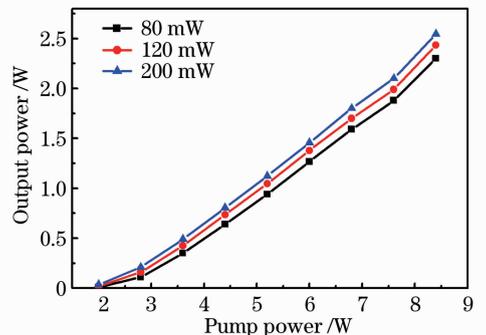


图 4 ASE 光纤放大器平均输出功率随抽运功率的变化  
Fig. 4 Average output power of the ASE fiber amplifier with the increase of pump power

图 5 为 ASE 种子源注入功率为 200 mW 时,ASE 光纤放大器在不同输出功率下的超荧光光谱。当放大器最大输出功率为 2.6 W 时,此时测得输出光谱的中心波长为 1983 nm,比 ASE 种子源的中心波长长 31 nm,光谱范围为 1900 ~ 2100 nm,3 dB 光谱带宽为 33 nm,略窄于 ASE 种子源的光谱带宽。采用 1 GHz 的示波器和高速光电探头,测得放大后的 ASE 不存在任何的自脉冲现象,表现出了极高的时间稳定性,如图 6 所示。另外,对放大后的 ASE 光源的输出功率和光谱进行了数小时的监测,没有发现较明显的波动。实验结果表明,基于掺铥光纤的宽带超荧光光源具有传统掺铥光纤激光器所不能比拟的稳定性,利用该全光纤结构宽带超荧光作为种子源,通过一级高功率光纤放大器放大即可获得几千瓦的高功率、高亮度、结构简单的光纤光源,因

此该类高稳定性宽带光纤超荧光光源在实际应用中具有重要地位。

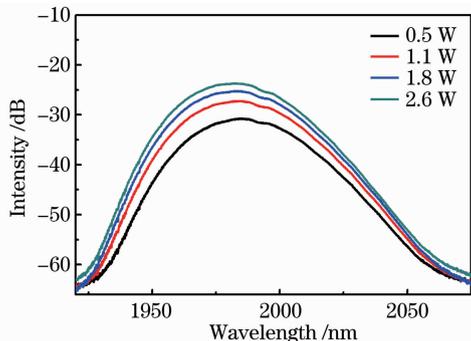


图 5 ASE 光纤放大器输出光谱随输出功率的变化  
Fig. 5 Optical spectra of the ASE fiber amplifier for different output powers

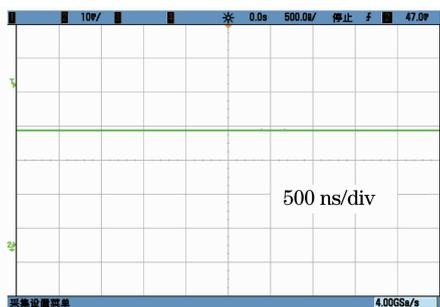


图 6 ASE 光纤放大器输出稳定性测量  
Fig. 6 Measurement of stability of ASE fiber amplifier

## 4 结 论

报道了高功率全光纤 MOPA 结构的 2.0  $\mu\text{m}$  波段宽带超荧光光源。超荧光种子源采用双包层掺铥光纤作为增益介质,790 nm 的多模半导体激光器作为抽运源,获得了稳定的中心波长为 1952 nm 的宽带超荧光输出,最大输出功率为 220 mW,3 dB 光谱带宽为 40 nm。超荧光种子源经过一级双包层掺铥光纤放大器后,最大输出功率达到了 2.6 W,斜率

效率为 46%,相应的光谱范围为 1900~2100 nm,3 dB 光谱带宽为 33 nm。该 2.0  $\mu\text{m}$  波段宽带超荧光光源可广泛应用于光谱分析、气体传感以及激光医疗相干层析等领域。

## 参 考 文 献

- 1 S. P. Chen, Z. J. Liu, Y. G. Li *et al.*. Resonantly pumped high power flat L-band erbium-doped superfluorescent fiber source[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(1): 207~212
- 2 Q. Xiao, P. Yan, Y. Wang *et al.*. High-power all-fiber superfluorescent source with fused angle-polished side-pumping configuration[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(8): 1164~1169
- 3 V. Filippov, Y. Chamorovskii, J. Kerttula *et al.*. Double clad tapered fiber for high power applications [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1929~1944
- 4 P. Wang, W. A. Clarkson. High-power, single-mode, linearly polarized, ytterbium-doped fiber superfluorescent source [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2605~2607
- 5 W. Chen, D. Shen, T. Zhao *et al.*. High power Er, Yb-doped superfluorescent fiber source with over 16 W output near 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(13): 14542~14546
- 6 P. Wang, J. K. Sahu, W. A. Clarkson. High-power broadband ytterbium-doped helical-core fiber superfluorescent source [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(5): 300~302
- 7 P. Wang, J. K. Sahu, W. A. Clarkson. 110 W double-ended ytterbium-doped fiber superfluorescent source with  $M^2=1.6$  [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(21): 3116~3118
- 8 Liu Jiang, Wang Pu. 60 W all-fiber broadband superfluorescent sources[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0501001  
刘江,王璞. 60 W 全光纤结构宽带超荧光光源[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0501001
- 9 Cao Yi, Liu Jiang, Wang Ke *et al.*. All-fiber hundred-watt-level broadband ytterbium-doped double-cladding fiber superfluorescent source[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0802008  
曹懿,刘江,王科等. 基于掺铥双包层光纤的百瓦级全光纤结构宽带超荧光光源[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0802008
- 10 O. Schmidt, M. Rekas, C. Wirth *et al.*. High power narrow-band fiber-based ASE source[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(5): 4421~4427
- 11 D. Y. Shen, L. Pearson, P. Wang *et al.*. Broadband Tm-doped superfluorescent fiber source with 11 W single-ended output power[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11021~11026
- 12 P. Wang, J. K. Sahu, W. A. Clarkson. Power scaling of ytterbium-doped fiber superfluorescent sources[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, 2007, **13**(3): 580~587

栏目编辑:宋梅梅