

# 1.5 kW 近衍射极限全光纤窄带超荧光光源

刘广柏<sup>1,2</sup> 杨依枫<sup>1,2</sup> 雷 敏<sup>1,2</sup> 胡 曼<sup>1,2</sup> 郑 也<sup>1,2</sup> 刘 驰<sup>1</sup> 漆云凤<sup>1</sup> 何 兵<sup>1</sup> 周 军<sup>1</sup>  
魏运荣<sup>1</sup> 楼祺洪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 搭建了一个全光纤主振荡功率放大(MOPA)近衍射极限输出的超荧光光源, 线宽为亚纳米量级, 最大输出功率为 1509 W, 输出斜率效率达到 85.2%, 光束质量因子稳定在  $M^2=1.4$ 。后向回光功率与输入功率呈线性关系, 系统很好地抑制了受激布里渊散射(SBS), 并且对环境具有很好的抗干扰能力。在整个输出功率范围内, 没有观察到自脉冲和弛豫振荡现象。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 掺镱光纤放大器; 放大自发辐射; 光纤布拉格光栅

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.1202009

## 1.5 kW Near-Diffraction-Limited Narrowband All-Fiber Superfluorescent Source

Liu Guangbo<sup>1,2</sup> Yang Yifeng<sup>1,2</sup> Lei Min<sup>1,2</sup> Hu Man<sup>1,2</sup> Zheng Ye<sup>1,2</sup> Liu Chi<sup>1</sup> Qi Yunfeng<sup>1</sup>  
He Bing<sup>1</sup> Zhou Jun<sup>1</sup> Wei Yunrong<sup>1</sup> Lou Qihong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A sub-nanometer linewidth, near-diffraction-limited superfluorescent source with a record power of 1509 W based on all-fiber master oscillator power amplifier (MOPA) configuration is established. The slope efficiency of the main amplifier is up to 85.2% and the beam quality at maximum power stays stable around  $M^2=1.4$ . The back reflection power maintains a linear behavior which confirms the considerable stimulated Brillouin scattering (SBS) suppression capability of our system. The performance of this high power source is robust with respect to the environment perturbations. No self-pulsing and relaxation oscillation is observed in the whole power range.

**Key words** lasers; fiber lasers; Yb-doped fiber amplifier; amplified spontaneous emission; fiber Bragg gratings

**OCIS codes** 140.3510; 140.3280; 140.3570

## 1 引 言

基于主振荡功率放大(MOPA)结构的掺镱 1  $\mu\text{m}$  光纤放大器(YDFA)具有输出激光光束质量好、效率高、易于散热、结构紧凑、可靠性高和易于实现高功率输出等特点<sup>[1-6]</sup>, 基于 YDFA 的超荧光光源在激光材料加工、遥感、低相干测量、光学相干成像、光谱组束等方面具有非常重要的应用<sup>[7-8]</sup>。同时, 窄带超荧光光源无纵模, 并且

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(U1330134、61308024、11174305)、上海市青年科技启明星计划(12QH401100)、上海市自然科学基金(11ZR1441400)

作者简介: 刘广柏(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事高功率光纤激光光线宽调控技术方面的研究。

E-mail: liuguangbo@siom.ac.cn

导师简介: 何 兵(1975—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率光纤激光器等方面的研究。

E-mail: bryanho@siom.ac.cn(通信联系人)

光子在光谱范围内均匀分布,因此在抑制受激布里渊散射(SBS)方面具有很大潜力。高功率拉曼光纤激光器和放大器具有很好的波长延展性和高亮度,而高功率超荧光源可以作为其理想的抽运源。2013年,刘江等<sup>[9]</sup>报道了输出功率为 122 W、半峰全宽(FWHM)为 25 nm 的宽带掺铥 2 μm 超荧光源和输出功率为 120 W、FWHM 为 1.2 nm 的窄带掺铥超荧光源。2011年,Schmidt等<sup>[10]</sup>采用空间耦合抽运方式,将窄带放大自发辐射(ASE)源经过两级放大,获得最大输出功率为 697 W、FWHM 为 12 μm。同年,Schmidt等<sup>[11]</sup>减少模式重叠,将窄带 ASE 源功率放大到 1.1 kW,斜率效率为 64%,光束质量因子  $M^2=1.3/1.4$ 。2015年,国防科技大学的 Xu等<sup>[12]</sup>报道了全光纤 MOPA 结构、输出功率为 1.01 kW 的窄带超荧光源,FWHM 为 8.1 nm。

本文采用 FWHM 为 70 pm 的全光纤窄带主振荡(MO)结构 ASE 种子源,经过 MOPA 结构放大,获得功率为 1.5 kW,近衍射极限输出的全光纤超荧光源。输出斜率效率达到 85.2%,在最大输出功率时光束质量因子稳定在  $M^2=1.42$ 。在整个输出功率范围内,没有观察到自脉冲和弛豫振荡现象。

## 2 实验装置

实验中全光纤窄带超荧光源包含全光纤窄带 ASE MO 结构和三级 YDFA 链路。窄带 ASE MO 结构原理图如图 1 所示。通过抽运合束器反向抽运,输出 ASE 功率 250 mW,FWHM 为 30 nm,并进入 2 个保偏(PM)隔离器(ISO 1 和 ISO 2)隔离。尾纤切成 8°斜角(AC),起到有效抑制平角形成振荡产生的激光。PM 光纤布拉格光栅(FBG)与环形器(CIRC)形成两级滤波器,将宽带的自发辐射光谱滤为窄带的自发辐射光谱。FBG1 为高反光栅,反射率大于 99%,中心波长为 1064.8 nm,将带宽压窄到 300 pm,在 CIRC 1 后输出 1 mW 的功率。经过全光纤预放大器(PA)1 后功率放大到 200 mW。窄带 FBG2 反射率为 50%,将带宽进一步降低至 70 pm,在 CIRC 2 后输出功率为 11 mW,经过 PA 2 将功率放大到 60 mW。PM ISO 3 用于保护 ASE MO,防止其被后续放大链路的后向回光打坏。该结构中使用的所有光纤皆为 Nufern 公司的 PLMA-10-125-M 光纤,以保证单模输出。2 个 FBG 安装在金属散热槽中,以防止机械振动和环境温度变化对其造成干扰。

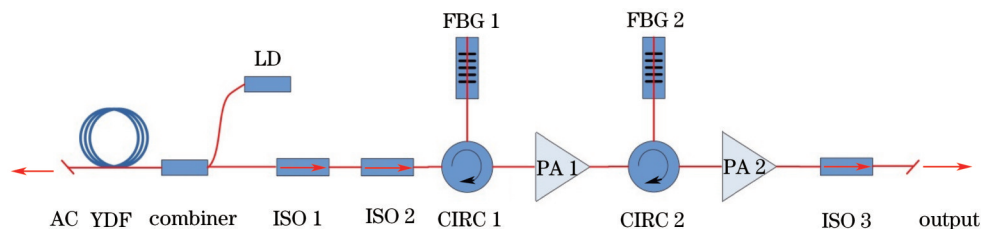


图 1 全光纤窄带 ASE MO 结构原理图

Fig.1 Scheme of the all-fiber narrowband ASE MO

图 2 为光谱仪(YOKOGAWA AQ6370B)测量得到的 ASE MO 的发射光谱,光谱仪分辨率为 20 pm。测得的发射光谱中心波长为 1064.8 nm,FWHM 为 70 pm,即 18.5 GHz,信噪比为 50 dB,偏振消光比(PER)大于 20 dB。频域稳定性测量时间为 340 s,在所测时间内,中心波长漂移小于 2 pm,FWHM 变化小于 3 pm,如图 3(a)所示。时域特性由 15 GHz 的铟镓砷光电探测器(ET-3500,EOT)和 6 GHz 实时示波器(DPO 70604C,Tektronix)监

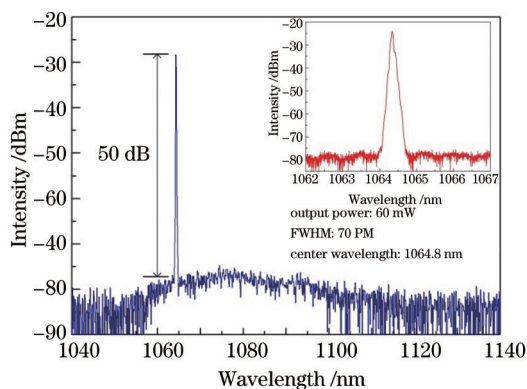


图 2 全光纤窄带 ASE MO 发射光谱

Fig.2 Emission spectra of the all-fiber narrowband ASE MO

测,如图3(b)所示。由实验结果可知,ASE MO在整个过程中,没有弛豫振荡和自脉冲现象,可很好的应用于长时间高功率运作的YDFA系统中。

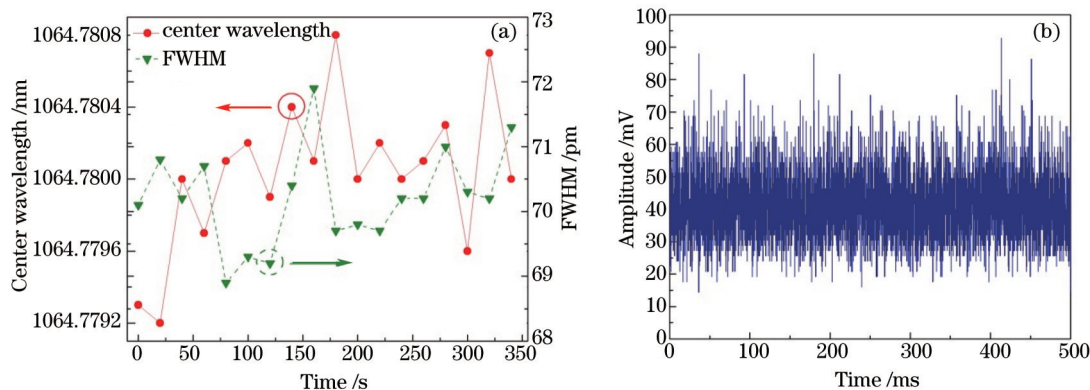


图3 窄带ASE MO的频域和时域特性。(a) 频域特性;(b) 时域特性

Fig.3 Spectral and time domain characterization of the narrowband ASE MO. (a) Spectral domain; (b) time domain

三级放大YDFA结构示意图如图4所示。该链路的一级放大器(A1)将 ASE MO 的功率由 60 mW 提升到 10 W,二级放大器(A2)将 10 W 功率放大到 100 W,第3级放大链路再将 100 W 放大到 1.5 kW。A1、A2使用 10/125 光纤,以保证输入第3级的光为单模种子光。2×2 光纤分路器(1:999)置于第2级放大器后,从 P1 端口监测主放大链路的后向散射光功率。主放大链路结构中,使用 1 段 13.5 m 长的大模场掺镱双包层光纤(LMA-YDF-20/400, Nufern),抽运源采用 1 个(6+1)×1 合束器和 6 个 400 W、976 nm 的激光二极管(LD)组成。YDF 盘绕在 1 个铝制水冷盘上,并且通过合适的盘绕直径以衰减高阶模。YDF 末端与抽运滤除器(PS)熔接后,与准直光纤光缆连接(QBH, Optoskand),输出光纤的数值孔径(NA)大小为 0.06,准直(Co)透镜的焦距为 100 mm,输出激光光斑大小为 12 mm。

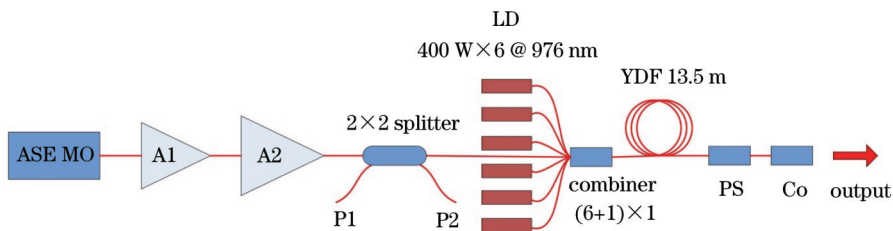


图4 三级放大YDFA结构示意图

Fig.4 Schematic illustration of the three-stage YDFA chain

### 3 实验结果与讨论

发射光谱和 FWHM 与输出功率的关系图如图 5 所示。不同功率量级的光谱曲线都为双曲正割函数,

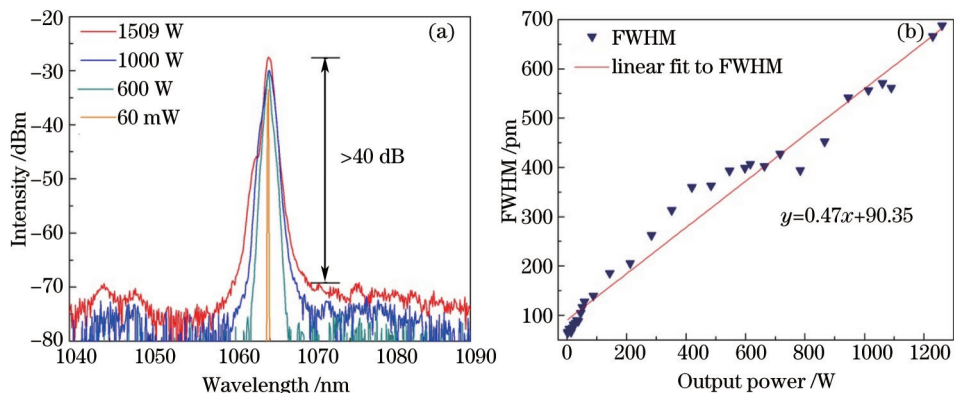


图5 发射光谱和 FWHM 与输出功率的关系图。(a) 发射光谱与输出功率的关系;(b) FWHM 与输出功率的关系

Fig.5 Output spectra and FWHM according to the output power. (a) Spectra versus output power; (b) FWHM versus output power

中心波长与 ASE MO 输出光的中心波长一致。激光与 ASE 的信噪比大于 40 dB,FWHM 随着输出功率的增长由 70 pm 展宽到 800 pm,如图 5(a)所示。主要是由于 ASE MO 的强度噪声引起了第 3 级放大链路中的光纤折射率变化,引入了自相位调制(SPM)效应。光强变化导致相位变化时,频谱逐渐展宽。Kablukov 等<sup>[13]</sup>报道,在掺镱光纤激光器(YDFL)结构中,由 SPM 导致的光谱展宽与输出激光功率成线性关系。在本文 YDFA 系统中,FWHM 展宽与输出功率成线性关系,线性拟合的斜率为 0.47 pm/W,如图 5(b)所示。

图 6 所示为高功率超荧光源输出功率和光束质量特性。图 6(a)为输出功率和光束质量因子随着抽运功率的变化关系图。抽运功率为 1806 W 时,系统输出最高激光功率为 1509 W。输出激光功率随着抽运功率的增加近似成线性增长,斜率效率为 85.2%。输出最大激光功率时,测得光束质量因子  $M^2=1.42$ ,并且为整个功率范围内光束质量因子的最大值,表明整个功率范围内没有模式不稳定现象出现。输出功率稳定性测试结果以及后向散射光功率如图 6(b)所示,测试时间为 340 s,平均功率为 1.5 kW,功率起伏小于 1%,表明系统在测试环境下具有很好的稳定性。通过光纤分路器 P1 端口监测后向散射光功率,在整个功率范围内,后向散射光功率始终低于输出激光功率的 0.01%,表明在整个功率范围内,没有出现 SBS 效应。

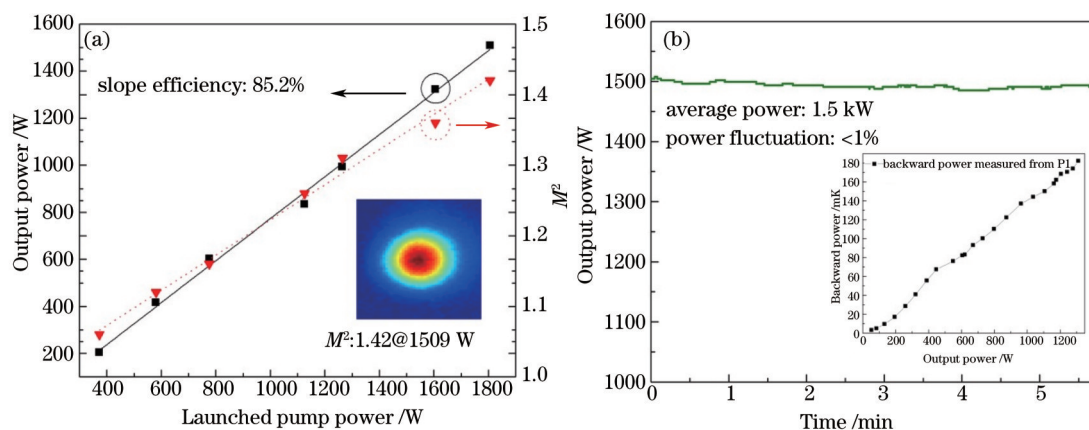


图 6 高功率超荧光源输出功率和光束质量特性。(a) 输出功率和光束质量因子与抽运功率关系图;  
(b) 输出功率稳定性及后向散射光功率

Fig.6 Output power and beam quality characterization of the high power super fluorescent source. (a) Output power and  $M^2$  factor versus launched pump power; (b) power stability and back reflection power with respect to the output power

## 4 结 论

搭建了一个 1.5 kW 全光纤 MOPA 窄带超荧光源,输出激光中心波长为 1064.8 nm,FWHM 为 800 pm,斜率效率为 85.2%。将宽带 ASE 源线宽压窄到 70 pm,输出功率为 60 mW,作为种子源输入。通过三级放大结构将功率放大到 1509 W。输出近衍射极限激光,最大输出功率时光束质量因子稳定在  $M^2=1.42$ 。后向回光功率与输入功率呈线性关系,证明了系统对 SBS 具有很好的抑制效果。通过改变 FBG 的带宽,可以控制 ASE MO 的输出激光线宽。若将主放级光纤更换为 PM 光纤,将可实现稳定的线偏振高功率超荧光源。这是目前为止所了解到的近衍射极限全光纤 1  $\mu\text{m}$  窄带超荧光源输出功率的最高纪录,可很好地应用于医疗成像、低相干干涉测量、拉曼抽运源等方面。

## 参 考 文 献

- 1 Dai Shoujun, He bing, Zhou Jun, *et al.*. 1.5 kW near single-mode all-fiber fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702001.  
代守军,何兵,周军,等. 1.5 kW 近单模全光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702001.
- 2 Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.
- 3 Jeong Y, Sahu J K, Payne D, *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Opt Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- 4 Lou Qihong, He Bin, Xue Yuhao, *et al.*. 1.75 kW Yb-doped double cladding fiber laser made in China[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1277.

- 楼祺洪, 何 兵, 薛宇豪, 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1277.
- 5 Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Chen, *et al.*. 1.6 kW Yb-doped all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416001.
- 闫 平, 肖起榕, 付 晨, 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416001.
- 6 Bonati G, Voelckel H, Gabler T, *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser[C]. Late Breaking Developments San Jose: Photonics West, 2005: 5709-2a.
- 7 Zhou Jun, He Bing, Xue Yuhao, *et al.*. Study on passive coherent beam combination technology of high power fiber laser arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900129.
- 周 军, 何 兵, 薛宇豪, 等. 高功率光纤激光阵列被动相干组束技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900129.
- 8 Leng Jinyong, Liu Chi, Guo Shaofeng, *et al.*. Influence of temperature distribution on stimulated Brillouin scattering in high power single frequency fiber amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2491-2496.
- 冷进勇, 刘 驰, 郭少锋, 等. 高功率单频光纤放大器中温度分布对受激布里渊散射的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2491-2496.
- 9 Liu Jiang, Wang Pu. Thulium-doped all-fiber broadband superfluorescent source at 2  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202006.
- 刘 江, 王 璞. 掺铥全光纤结构 2.0  $\mu\text{m}$  波段宽带超荧光光源[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202006.
- 10 Schmidt O, Wirth C, Rhein S, *et al.*. High power narrow-band ASE as source for beam combining applications[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2011: AMF3.
- 11 Schmidt O, Kliner A, Rekas M, *et al.*. Relative intensity noise characterization of a linear polarized 1.1 kW fiber-amplified narrow-band ASE source[C]. Frontiers in Optics, 2011: FTuW3.
- 12 Xu Jiangming, Huang Liangjin, Leng Jinyong, *et al.*. 1.01 kW superfluorescent source in all-fiberized MOPA configuration[J]. Opt Express, 2015, 23(5): 5485-5490.
- 13 Kablukov S I, Zlobina E A, Podivilov E V, *et al.*. Output spectrum of Yb-doped fiber lasers[J]. Opt Letters, 2012, 37(13): 2508-2510.

栏目编辑: 史 敏