

基于掺镱双包层光纤的百瓦级全光纤结构宽带超荧光光源

曹 镱 刘 江 王 科 王 璞

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 构建了基于掺镱双包层光纤的超荧光种子源和放大器, 实现了稳定运转的全光纤结构宽带超荧光光源, 种子源经一级单程放大, 获得百瓦级功率超荧光输出。该超荧光光源在高功率状态下无自脉冲、弛豫振荡、纵模起振。超荧光种子源中心波长 1050 nm, 半峰全宽(FWHM)21 nm, 最大输出功率 3 W。放大级超荧光最高输出功率 102 W, 斜率效率 70%, FWHM 20.5 nm。

关键词 光纤光学; 放大自发辐射; 超荧光; 宽带光源; 掺镱双包层光纤; 光纤放大器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0802008

All-Fiber Hundred-Watt-Level Broadband Ytterbium-Doped Double-Cladding Fiber Superfluorescent Source

Cao Yi Liu Jiang Wang Ke Wang Pu

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

Abstract Stable high-power operation of an all-fiber broadband superfluorescent source, based on ytterbium-doped double-cladding fibers, is achieved via a fiber amplifier. It comprises an amplified spontaneous emission (ASE) seed source which is amplified to over one hundred watts in the next stage for a single pass, with no self-pulsing, relaxation oscillation or lasing modes being observed. The center wavelength of ASE seed source is 1050 nm, and the full width half maximum (FWHM) is 21 nm. The maximum superfluorescent output power yielded by the amplifier is 102 W, the slope efficiency with respect to the pump power is 70%, and FWHM of the emission spectrum is 20.5 nm.

Key words fiber optics; amplified spontaneous emission; superfluorescence; broadband light source; ytterbium-doped double-cladding fiber; fiber optics amplifiers

OCIS codes 140.3510; 140.3615; 060.3510; 060.2320

1 引 言

利用掺稀土元素光纤中的放大自发辐射(ASE)发光的装置又称为超荧光光纤光源(SFS),是实现宽带激光光源的有效技术手段。传统的光纤超荧光光源是一种低输出功率(百毫瓦级)、低转换效率(小于 40%)、宽发射光谱(数十纳米)、低相干长度的单模光纤光源。由于其具有良好的温度稳定性、较宽的荧光谱线、低时间相干性和可观的空间相干性,在光

纤通信、光纤传感(如 gyroscope)、光学层析(如 OCT)、信号分析、光谱检测等领域有着重要和广泛的应用^[1~4]。特别地,高功率 SFS 是拉曼激光器的理想抽运源,也可与常规高功率激光器一样拓展应用于对金属非金属进行切割、加工、焊接的工业加工甚至是作用生物组织的激光医疗等领域。

近年来,随着光纤激光器的发展,SFS 的工作波长已覆盖 1 μm 、1.5 μm 以及 2 μm 波段,输出功率

收稿日期: 2012-02-01; **收到修改稿日期**: 2012-04-20

作者简介: 曹 镱(1986—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器、光纤放大器等方面研究。

E-mail: sdybcao@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

则突破百瓦。2006年, Wang等^[5]使用掺镱多模偏心光纤实现了双端输出110 W的超荧光光源, 并于2007年利用二级放大装置实现了功率122 W的SFS放大^[6,7]。2011年, Schmidt等^[8]采用放大技术和基于光纤光栅(FBG)的光谱滤波技术实现了工作波长1 μm 附近、输出功率率逾600 W的窄线宽超荧光输出。2011年, Xiao等^[9]利用20/400D型双包层掺镱光纤和侧泵技术实现了双端输出总功率68 W的ASE装置。2006年, Chen等^[10]实现了工作波长1561 nm、输出功率1.1 W的超荧光装置。2008年, Shen等^[11]利用掺铥光纤获得了单端输出功率约为11 W的2 μm 波段ASE输出。

目前, 利用掺稀土元素光纤ASE实现高功率超荧光输出的途径主要有两种。一种是直接采用单端或双端输出, 严格控制腔内信号光反馈, 通过向掺杂光纤中抽运高能量直接实现自发辐射的放大。然而, 这种方式极易满足腔内增益大于损耗的条件而出现自激振荡(尤其是单端输出的情况下), 对光信号隔离度异常敏感, 因此这种方法不适合工作在大功率状态。实现ASE高功率输出的另一种方法是利用主振荡功率放大(MOPA)技术。低功率运转的ASE装置简单、稳定、可靠, 具备良好的宽带输出特性。利用其充当种子源, 通过合理设计放大器, 经一级单程放大便可获得稳定的高功率超荧光输出, 经多级放大可进一步满足更高的功率要求。特别地, 与前一种方法相比, 由于MOPA结构元件分立串联、功率单端输出, 所以更易于全光纤化集成, 有利于提高系统的稳定性^[12,13]。

之前关于高功率SFS的研究中, 激光器的抽运机制与光纤级联多采用空间耦合方式^[5~7,11], 尽管文献^[8,9]采用了全光纤结构, 但是前者输出窄带光谱而后者属于双端输出, 这都不利于系统的稳定与集成。本文介绍了一种基于大模场掺镱双包层光纤的, 采用全光纤MOPA结构, 经一级单程放大单端输出获得百瓦级全光纤超荧光稳定输出的技术途

径。种子源输出半峰全宽(FWHM)21 nm, 最大输出功率3 W。放大级超荧光输出FWHM 20.5 nm, 最大输出功率102 W, 斜率效率70%。该超荧光光源在高功率状态下无自脉冲、弛豫振荡、纵模起振等, 运转稳定。

2 实验装置

基于MOPA结构的百瓦级全光纤宽带超荧光光源实验装置如图1所示。种子源使用波长976 nm的光纤耦合输出激光二极管(LD)作抽运源, 最大抽运功率8.5 W。种子源为双向输出设计, 增益介质为一段长度15 m的高掺杂掺镱双包层光纤(Nufern LMA-YDF-20/130-VIII), 吸收系数在波长976 nm时为8.7 dB/m, 纤芯直径为20 μm , 数值孔径为0.08, 内包层直径130 μm , 数值孔径为0.46。在抽运功率和增益光纤长度一定的情况下, 高掺杂浓度的大模场光纤可提供更强的ASE效应, 同时由于其降低了腔内的拉曼散射, 因此可有效提高自激振荡的阈值。而较长的掺杂光纤可以在保证较强ASE效应的同时, 在反向(相对于抽运方向, 下同)输出端获得相对更多的功率输出。种子源正向经隔离器(ISO)输出, 输出端做抽运过滤处理并切10°角, 该端用于种子源的光谱采样和稳定性监测; 反向经ISO输出并进行抽运过滤, 该端作为放大级信号。由于放大级所使用的合束器信号端光纤为HI1060, 故种子源需通过模场适配器(MFA)接入放大级。为保证放大级与种子源之间的隔离度, 在模场适配器之前串联了两个隔离器。放大级使用波长976 nm的光纤耦合输出LD作抽运源, 最大抽运功率150 W, 增益光纤为长度20 m的大模场掺镱双包层光纤(Nufern LMA-YDF-20/400-M), 纤芯直径为20 μm , 数值孔径为0.07, 内包层直径400 μm , 数值孔径为0.46。信号光经一级单程放大并做抽运过滤后经10°角端帽输出。实验使用光谱仪(YOKOGAWA OSA AQ6370B, 光谱响应波段700~1600 nm)、1 G

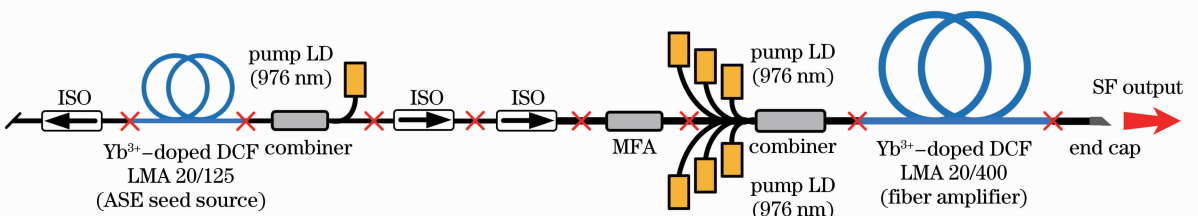


图1 百瓦级全光纤宽带超荧光光源实验装置

Fig. 1 Schematic setup of 102 W all-fiber broadband superfluorescent source

示波器和 200 MHz 探头对激光器输出光信号进行空间采样检测。

3 实验结果与分析

掺杂光纤长度分别为 15, 20, 25 m 的种子源与抽运功率相关的输出功率曲线如图 2 所示。随着抽运功率的提高,腔内反转粒子数不断增多, ASE 效应越来越强,种子源正反两个方向 ASE 输出功率都不断增大,而且 ASE 反向输出功率明显大于正向输出功率。这是因为当正反两个输出方向的光信号被 ISO 严格限制而腔内无模式反馈时, ASE 效应起主导作用。在抽运功率一定的情况下,沿掺杂光纤正向的增益强度逐渐减小,因此反向的自发辐射光信号在传播过程中被不断放大,而正向的自发辐射光信号则在放大过程中被掺杂光纤不断吸收。在相同的抽运功率下,掺杂光纤长度的增加会使 ASE 正向输出功率先增大后减小,反向输出功率则一直增大;同时由于反向功率水平比正向功率水平更加显著,所以总输出功率也会相对增大,斜率效率则相应得到提高。事实上,在抽运功率一定的情况下,如果掺杂光纤足够长,则 ASE 的正向输出功率将会变得非常小,但反向输出功率不可能无限增大,而是逐渐趋向饱和。掺杂光纤长度为 15, 20, 25 m 的种子源最大总输出功率分别为 2411, 3054, 3074 mW。随着抽运功率提高, ASE, FWHM 从最宽值 44 nm 逐渐减小到 21 nm, 这是由于掺杂光纤增益谱变窄导致的^[14]。图 3(a) 为掺杂光纤长度为 15 m 的种子源输出光谱, 此时 ASE 正向和反向输出功率分别为 284 mW 和 2127 mW, 在波长 1020~1120 nm 范围内获得了的近似平坦宽带光谱。图中光谱曲线存在微小的锯齿状结构, 而此时并未监测到腔内有自激振荡或纵模起振。这是由于种子源使用的掺杂光纤具有大模场, 除基模外还支持多个高阶模式的传输, 因此存在相当程度的模间干涉现象^[6]。只需通过对掺杂光纤进行小直径盘绕即可显著减少光谱中存在的微结构, 如图 3(b) 所示。需要指出的是, 由于实验采用空间采样的方式对 ASE 输出光谱进行监测, 其对不同波长信号的衰减具有选择性, 所以不可能完全消除光谱曲线中的微结构。种子源为双向输出, 一端(正向)用于 ASE 光谱采样和稳定性监测, 另一端(反向)作为放大级信号。

当种子源掺杂光纤长度一定时, 过高的抽运水平将使得正向自发辐射光信号被越来越多地放大, 这不利于对腔内信号反馈的抑制, 极易导致腔模随

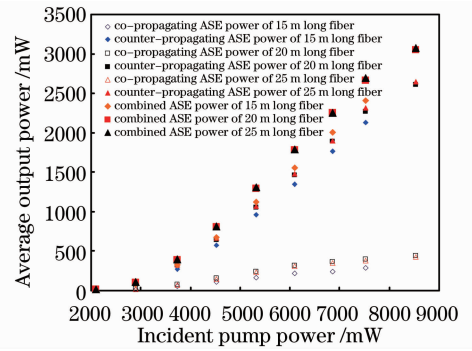


图 2 与抽运功率相关的, 不同掺杂光纤长度超荧光种子源的功率输出曲线

Fig. 2 Output power corresponding to incident pump power for different superfluorescent seed sources

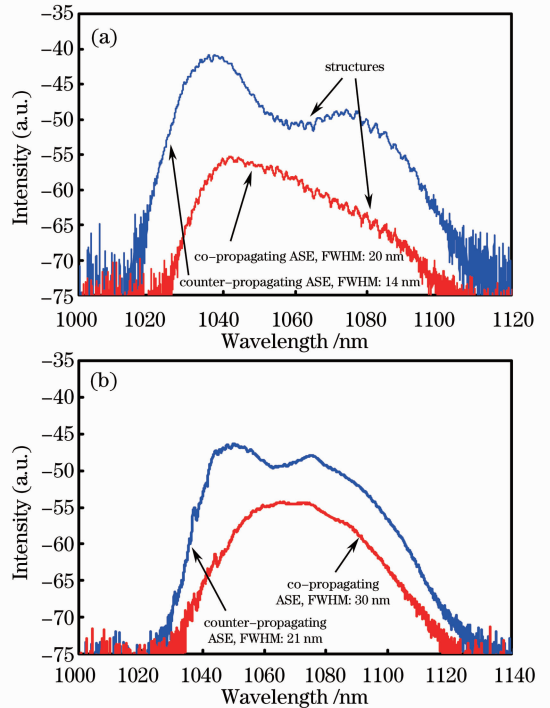


图 3 超荧光种子源 ASE 输出光谱。(a) 未对光纤进行小直径盘绕处理的输出结果; (b) 对光纤进行小直径盘绕处理后的输出结果

Fig. 3 Emission spectra for superfluorescent seed source with fiber length of 15 m. (a) Output without fiber bending; (b) output with a small fiber bending radius

机起振, 而只要增加掺杂光纤的长度即可提高出现自激振荡的抽运阈值。当掺杂光纤长度为 15 m 的种子源的抽运功率超过 7.5 W 时, 使用示波器和光谱仪在任意输出端可同时监测到脉冲波动和波长 1070 nm 附近光谱强度波动, 意味着种子源已进入自激振荡的非稳运转状态。而掺杂光纤长度分别为 20 m 和 25 m 的种子源, 在满功率(8.5 W)注入情

况下稳定运转,未监测到自激振荡或纵模起振。必须指出,如果是由于光腔隔离度不足、输出端面缺陷或拉曼散射等原因引起反馈过强而导致腔内纵模起振,使用示波器将无法检测到脉冲波动,但是光谱分析可观察到激光尖峰谱线,此时单纯增加掺杂光纤长度的方法不仅无法抑制纵模起振,而且往往适得其反。

使用掺杂光纤长度为 15 m 的超荧光种子源,利用其反向输出端作信号光,通过大模场掺镱双包层光纤进行一级单程放大。为保证放大级与种子源之间的隔离度,在模场适配器之前串联了两个隔离器。但是由于隔离器插入损耗很大,而且模场适配器本身也有耦合损耗,所以当种子源反向输出功率最大时(约 2 W,此时中心波长 1050 nm,FWHM 为 21 nm),实际注入放大级的信号光功率只有 380 mW。实验过程中激光器系统稳定运转,未监测到自激振荡或纵模起振。种子源不同注入功率下,放大级与抽运功率相关的功率输出曲线如图 4 所示。当种子源注入功率为 200,300,380 mW 时,放大级最大输出功率分别为 95,97,102 W,斜率效率分别为 65.0%,66.5%和 70.0%,单程增益 24.3~26.8 dB。可见在相同抽运强度下,放大级输出功率和斜率效率同信号光强度呈正相关。值得注意的是,种子源的宽带信号光与常规窄线宽激光信号光相比,本身不存在弛豫振荡现象,而且有着更宽的光谱带宽和更加均一的光谱能量密度。这使放大级更易获得较高的能量转换效率和实现稳定的高功率运转。图 5 给出了种子光注入功率 380 mW 时,放大级不同输出功率下的超荧光光谱。超荧光光谱在输出功率 1~100 W 的范围内近似平坦,形状变化不大,FWHM 约为 20.5 nm。模间干涉使得放大

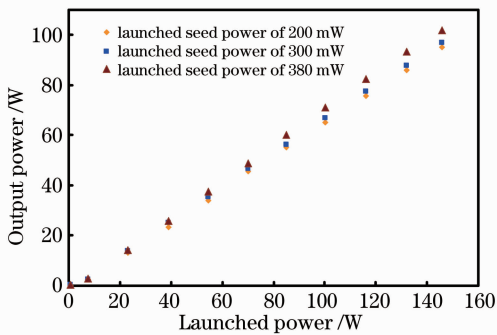


图 4 与抽运功率相关的,不同超荧光种子源注入功率下放大级功率输出曲线

Fig. 4 Output power versus launched pump power for fiber power amplifier comprising superfluorescent seed sources of different powers

级输出光谱中存在明显的锯齿样微结构,由于放大级双包层掺镱光纤(Nufern LMA-YDF-20/400-M)直径较大,实验未对放大级光纤进行小直径盘绕。

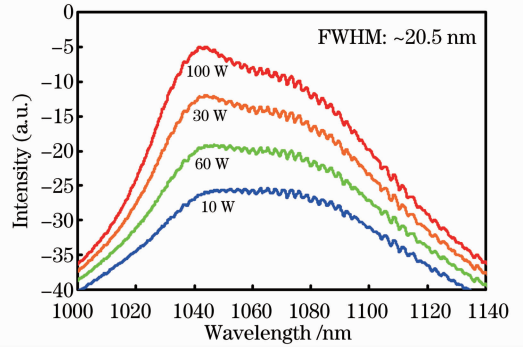


图 5 放大级超荧光输出光谱

Fig. 5 Emission spectrum of fiber power amplifier

如果降低种子光的注入强度,要获得相同功率的超荧光输出,放大级就需要更高的抽运功率或更长的增益光纤,但是本实验中种子源的注入功率不宜过低。尽管 ASE 宽带信号光有着比窄线宽激光信号光更高的放大级能量转换效率,但是由于其光谱较宽、各光谱成分的强度相对较弱,在抑制放大级本身 ASE 效应的能力上要逊色很多。实验所用放大级结构自身的 ASE 反向输出方向恰为其信号端,在增益光纤过长或者抽运功率过高的情况下,过弱的 ASE 种子源信号光将导致腔内 ASE 效应过强,进而影响前级种子源的稳定性,甚至毁坏元件。此外,过长的增益光纤还会引起对超荧光的再吸收,造成输出光谱短波长成分的缺失。当然,种子源的运转功率也并非越高越好,由前文分析可知,种子源输出功率越高,所需增益光纤越长或者要求抽运功率相应提高。前者会提高系统成本,而后者则易降低种子源的运转稳定性和对放大级回光的承受能力。若使用插入损耗理想的隔离器以及耦合效率更高的模场适配器,则可使实验的种子源在更低的功率水平运转,有望获得谱线更宽的超荧光输出。

4 结 论

构建了基于大模场掺镱双包层光纤的超荧光种子源和放大器,实现了稳定运转的全光纤结构宽带超荧光光源,种子源经一级单程放大,获得的百瓦级功率超荧光输出。该超荧光光源在高功率状态下无自脉冲、弛豫振荡、纵模起振等。种子源中心波长 1050 nm,FWHM 21 nm,最大输出功率 3 W。放大级超荧光最大输出功率 102 W,斜率效率 70%,FWHM 20.5 nm。基于稀土掺杂光纤的超荧光光

源,可采用 LD 抽运机制并全光纤化集成,结构紧凑可靠、系统稳定实用,同时具有输出功率高、荧光谱线宽、使用寿命长等优点,有望大规模替代传统的超发光二极管(SLD)宽带光源,满足各种对高功率宽带光源的应用需求。

参 考 文 献

- 1 Z. C. Hsu, Z. S. Peng, L. A. Wang *et al.*. Gamma ray effects on double pass backward superfluorescent fiber sources for gyroscope applications[C]. *SPIE*, 2008, **7004**: 70044M
- 2 B. Levit, A. Bekker, V. Smulakovsky *et al.*. Amplified-spontaneous-emission pumped Raman fiber laser [C]. CLEO/QELS, June 2009, Baltimore, MD
- 3 I. Trifanov, P. Caldas, L. Neagu *et al.*. 20 mW, 70 nm bandwidth ASE fibre optic source at 1060 nm wavelength region for optical coherence tomography [C]. *SPIE*, 2008, **7580**: 758000O
- 4 W. Fan, S. Fu, X. Yang *et al.*. High-power broadband superfluorescent source with a Yb-doped double-cladding fiber [C]. *SPIE*, 2004, **5280**: 225~228
- 5 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
- 6 P. Wang, W. A. Clarkson. High-power, single-mode, linearly polarized, ytterbium-doped fiber superfluorescent source [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2605~2607
- 7 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
- 8 O. Schmidt, M. Rekas, C. Wirth *et al.*. High power narrow-band fiber-based ASE source[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(5): 4421~4427
- 9 Qirong Xiao, Ping Yan, Mali Gong *et al.*. High-power all-fiber superfluorescent source with fused angle-polished side-pumping configuration[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(8): 1164~1169
- 10 S. P. Chen, Y. G. Li, J. P. Zhu *et al.*. Dualstage superfluorescent fiber source with 1.16 W output power centered at 1561 nm[J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(5): 055003
- 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 Wang Xiaolin, Leng Jinyong, Du Wenbo *et al.*. 275 W all-fiber narrow-linewidth ytterbium-doped MOPA laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0308001
王小林, 冷进勇, 杜文博等. 275 W MOPA 结构全光纤窄线宽掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0308001
- 13 Liu Jiang, Wang Pu. 60 W all-fiber broadband superfluorescent source[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
- 14 I. N. Duling III, W. K. Burns, L. Goldberg. High-power superfluorescent fiber source [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(1): 33~35

栏目编辑:马 沂