

基于高功率窄线宽掺镱全光纤超荧光光源的光谱合束

魏守宇 金东臣 孙若愚 曹 镱 侯玉斌 王 静 刘 江 王 璞

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 全光纤结构超荧光光源各级均采用双包层掺镱光纤作为增益介质,中心波长为976 nm和915 nm的多模半导体激光器作为抽运源,利用窄线宽光纤布拉格光栅对宽带超荧光种子源进行滤波,经三级掺镱双包层光纤放大器放大,实现了中心波长分别为1060 nm和1078 nm的窄线宽超荧光稳定输出,输出功率分别达到57.4 W和56.6 W,斜效率分别为66.6%和66.7%,放大后的窄线宽超荧光光源3 dB光谱带宽均为0.05 nm。利用透射式衍射光栅对两路窄线宽超荧光进行光谱合束,实现了104.2 W窄线宽超荧光输出,合束效率为91.3%,光束质量 $M^2 < 1.7$ 。

关键词 激光光学; 光纤超荧光光源; 光纤放大器; 掺镱光纤; 光谱合束

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0402005

Spectral Beam Combining Based on High Power Narrow Linewidth Ytterbium-Doped All-Fiber Superfluorescent Source

Wei Shouyu Jin Dongchen Sun Ruoyu Cao Yi Hou Yubin Wang Jing
Liu Jiang Wang Pu

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract We obtained stable narrow bandwidth superfluorescent sources with central wavelengths of 1060 nm and 1078 nm by using a segment of ytterbium-doped double-cladding fiber as the gain medium, multi-mode diode lasers operating at 976 nm and 915 nm as pumping sources, and fiber Bragg gratings as filters. Two three-stage high power fiber amplifier systems are used to boost the output power up to 57.4 W and 56.6 W respectively, with the slope efficiencies of 66.6% and 66.7%. The superfluorescent bandwidths at 1060 nm and 1078 nm are 0.05 nm. Two output beams are spectrally combined with a transmission diffraction grating, the output beam is with the power of 104.2 W, power efficiency of 91.3% and the beam quality M^2 is superior to 1.7.

Key words laser optics; fiber superfluorescent source; fiber amplifier; ytterbium-doped fiber; beam combining

OCIS codes 140.3510; 140.3615; 140.6630; 060.2320; 140.3298

1 引 言

全光纤结构高功率光纤激光器具有结构紧凑、光束质量好、能量转换效率高、抗环境干扰能力强等优点,已广泛应用于激光加工与制造、通信遥感、科研医疗、军事国防安全等领域^[1-3]。随着大模场面积双包层光纤的出现及高功率二极管抽运源的发展,采用级联抽运的方式可从单根光纤获得万瓦级高功率连续激光输出^[4-5]。虽然在高功率光纤激光器中采用大模场面积光纤降低了光纤内非线性效应的影响,但却导致光束质量恶化,且在高功率运转条件下,由于光纤熔点损伤及掺杂光纤热损伤等因素的限制,使得输出功率难以大幅提高^[6]。为突破单根光纤最高输出功率的瓶颈,人们提出了相干和非相干合束技术,并获得了具有良好

收稿日期: 2015-10-21; 收到修改稿日期: 2015-12-17

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(Z131100003213010)

作者简介: 魏守宇(1990—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤超荧光光源、光谱合束方面的研究。

E-mail: weishouyu@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王 璞(1965—),男,博士,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)

光束质量的高功率激光输出^[7]。

相干合束是光场的矢量合成,需要严格的监测和控制手段来保证各合束单元间相位、偏振方向及波长相互一致,因此系统较为复杂;非相干合束(也称为光谱合束、频谱合束)是采用色散元件[如衍射光栅、体布拉格光栅(VBG)等]将若干不同波长激光单元的输出光束,在近场和远场实现空间上的重叠,达到标量叠加的目的,这使得光谱合束系统较相干合束系统结构简单、系统稳定性好且易于实现和控制^[8-9]。当入射至色散元件光束的中心波长发生变化时,衍射角度也会发生变化,若利用含有多波长成分的宽谱光源实现光谱合束时,将导致输出光束发散,影响合束效率以及光束质量。为获得高功率光谱合束输出,需使参与合束的激光单元输出功率足够高、光谱线宽足够窄、合束单元足够多。但窄线宽光纤激光器在高功率条件下容易产生受激布里渊散射(SBS),会对系统造成不利影响,而超荧光光源(SFS)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,其输出光为放大的自发辐射(ASE),通过光纤放大器容易获得高功率输出,具有无自脉冲、无弛豫振荡、无模式竞争和极高时间稳定性等突出优点^[10]。Schmidt等^[11]指出ASE中不存在纵模、且光谱中光子分布均匀使超荧光SBS阈值很高,并通过实验证实,在高功率条件下,窄线宽超荧光光源未激发SBS效应。因此,窄线宽超荧光光源在高功率光谱合束技术中更具应用潜力。

目前低功率超荧光光源已广泛应用到光学层析、光纤传感以及光纤通信等领域^[12-16],鉴于其优良的稳定性,在激光切割、激光焊接以及军事国防等高功率应用领域也将会有非常广泛的应用前景。Wang等^[17]在2006年利用偏心掺镱光纤采用双端输出结构首次获得了110 W超荧光输出。此后,超荧光光源输出波长范围逐渐拓宽,输出功率水平大幅提升。2011年,Schmidt等^[11]采用主控振荡器的功率放大器(MOPA)结构,获得了功率为697 W、线宽为12 pm的高功率窄线宽ASE输出。2012年,Chen等^[18]实现了1.5 μm波段16.1 W的超荧光输出。2014年,Luo等^[19]采用掺Ho ZBLAN光纤实现了3 μm波段宽带超荧光输出,输出功率为219.76 mW。2015年,Xu等^[20-21]分别采用两级和三级MOPA结构,实现了1 μm波段1.01 kW宽带超荧光输出及1.87 kW窄带宽(3 dB光谱带宽为1.7 nm)超荧光输出。同年,Liu等^[22-23]采用掺铥光纤实现了2 μm波段输出功率为364 W可调谐窄带超荧光,Jin等^[22]同样采用掺铥光纤实现了最高316 W宽带超荧光输出。

鉴于超荧光光源在窄线宽高功率条件下运转不易激发SBS非线性效应的特点及其优良的稳定特性,窄线宽超荧光光源在高功率光谱合束技术中更具应用潜力。本研究为实现具有更好光束质量和更高输出功率的光谱合束研究进行探索,设计了中心波长分别为1060 nm和1078 nm的两路全光纤窄线宽超荧光光源,并利用透射式衍射光栅对两路窄线宽超荧光实现光谱合束。两路窄线宽超荧光光源3 dB光谱带宽均为0.05 nm,在输出功率分别为57.4 W和56.6 W的条件下,实现了平均功率为104.2 W的合束超荧光输出,合束效率为91.3%,光束质量为 $M_x^2 < 1.7$ 。

2 实验装置

窄线宽超荧光光源实验结构如图1所示,图1(a)为宽带超荧光种子源,该种子源采用线型腔单向输出结构,反向输出端利用环形镜提高种子源正向输出功率。波长为976 nm、输出功率为9 W的激光二极管(LD)作为抽运源,通过(2+1)×1合束器前向抽运一段长度为7.7 m的5/130(芯径/包层直径,单位为μm,下同)掺镱双包层光纤,该掺镱双包层光纤数值孔径 $NA=0.12$,在波长为976 nm处的吸收系数为1.7 dB/m。产生的超荧光经隔离器后正向输出,99/1分束器的1%输出端用于监测种子源信号。

宽带超荧光种子源输出的种子光被环形器和光纤布拉格光栅分成独立的两路并进行信号放大,实验结构如图1(b)所示。首先,信号光经环形器1到达FBG-1(中心波长为1060 nm,反射率为99%,反射带宽为0.15 nm)后,满足FBG-1布拉格条件的频谱成分会被高效反射,使1060 nm波段超荧光经环形器2进入图1(b)中上方光路,信号光经掺镱双包层光纤放大,由窄线宽FBG-3(中心波长为1060 nm,反射率大于等于70%,反射带宽小于等于0.06 nm)进行再次滤波,使带宽保持在0.05 nm左右,窄化后的超荧光光源经三级放大后输出。宽带超荧光种子源中不满足FBG-1布拉格条件的其他波长成分将经环形器3透射至FBG-2(中心波长为1078 nm,反射率为99%,反射带宽为0.15 nm),满足FBG-2布拉格条件的1078 nm波段频谱成分经环形器4进入下半部分光路中,经掺镱双包层光纤放大后,由FBG-4(中心波长为1078 nm,反射率大于等于70%,反

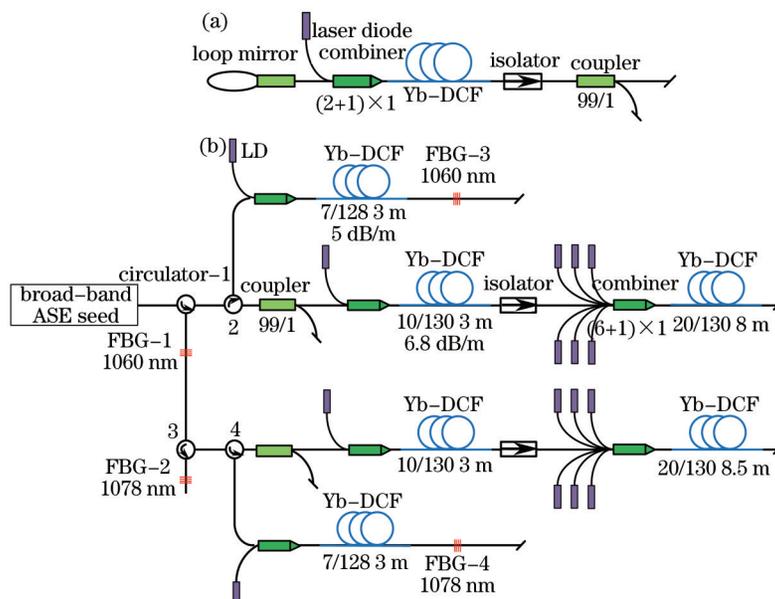


图 1 (a) 宽带超荧光种子源实验结构; (b) 窄线宽超荧光光源放大器

Fig.1 Schematics of (a) broadband superfluorescent source and (b) narrow band superfluorescent source amplifier

射带宽小于等于 0.06 nm)再次滤波,最终经三级光纤放大器放大后输出 1078 nm 波段窄线宽超荧光。1060 nm 和 1078 nm 两路窄线宽超荧光 MOPA 结构放大器第一级预放大级的增益介质均采用掺镱 7/128 双包层光纤, $NA=0.19$,在波长为 976 nm 处的吸收系数为 5 dB/m,长度均为 2.5 m。第二级预放大级均采用掺镱 10/130 大模场双包层光纤, $NA=0.075$,在波长为 976 nm 处的吸收系数为 3.9 dB/m,长度分别 4 m(1060 nm)和 6 m(1078 nm)。以上两级预放大级均采用波长为 976 nm、功率为 10 W 的激光二极管通过 $(2+1) \times 1$ 合束器为掺杂光纤提供抽运光。两路预放大级与主放大级之间均采用 5 W 隔离器防止主放大级回光损坏前向系统。1060 nm 和 1078 nm 两路窄线宽超荧光光源主放大级均采用在波长为 915 nm 处的吸收系数为 3.3 dB/m 的掺镱 20/130 大模场双包层光纤作为增益介质, $NA=0.08$,为获得更高的放大效率,1060 nm 和 1078 nm 窄线宽超荧光光源光纤长度分别选择 8 m 和 8.5 m,两主放大级均采用 6 个波长为 915 nm 的 30 W 激光二极管作为抽运源,经 $(6+1) \times 1$ 合束器耦合进掺杂光纤。掺杂光纤输出端熔接一段无源 20/125 单包层光纤($NA=0.07$)用于剥离输出光中残余的抽运光,为防止端面反射使腔内产生激光振荡,光纤输出端采取切 8° 角处理。利用光栅衍射公式进行计算,当采用 1060 nm 和 1078 nm 两波段窄线宽超荧光光源入射至衍射光栅时,入射角度差为 1.1° 。输出光束经准直器准直并聚焦后,由两全反射镜折叠光路并调节两光束入射至透射式衍射光栅的入射角,使两光束经透射式衍射光栅衍射后的输出光束在空间重叠,得到合束输出。实验中所使用的偏振不相关透射式衍射光栅线密度为 13791 lp/mm, $1 \mu\text{m}$ 波段处的衍射效率大于等于 92%,图 2 为光谱合束实验结构图。

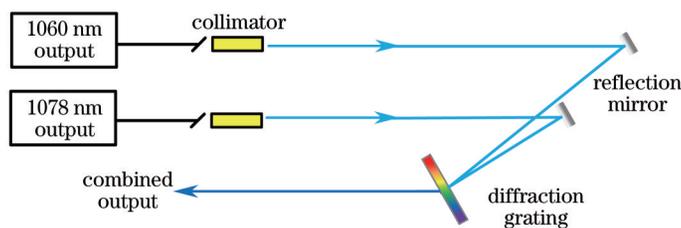


图 2 光谱合束实验结构图

Fig.2 Schematic setup of spectral beam combining

3 实验结果分析与讨论

线型腔结构单向输出宽带超荧光种子源输出光谱如图 3(a)所示,中心波长为 1066.7 nm,3 dB 光谱带宽为 22 nm。在 1.7 W 的抽运功率下,输出功率为 166 mW,继续增加抽运功率会出现弛豫振荡。

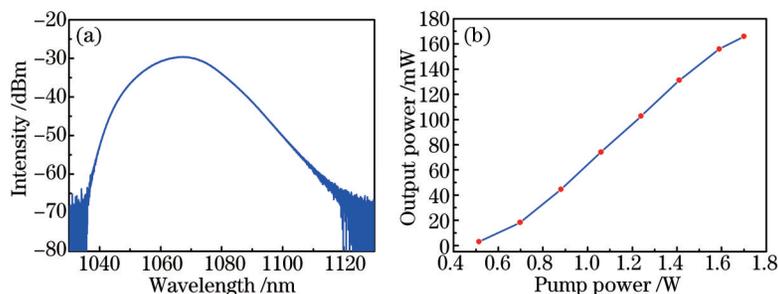


图3 (a) 宽带超荧光种子源输出光谱; (b) 输出功率与抽运功率关系曲线

Fig.3 (a) Emission spectrum of broadband superfluorescent seed source; (b) output power versus launched pump power

宽带超荧光种子源经环形器1和FBG-1后分成独立的两路传输,经FBG-1首次滤波后由环形器1出射的1060 nm窄带超荧光输出功率为471 μ W,经FBG-2滤波后由环形器3出射的1078 nm窄带宽超荧光输出功率为245 μ W。两路信号光分别经FBG-3、FBG-4再次滤波,并由双包层光纤放大后获得低功率窄线宽超荧光种子光,种子光经环形器2、4后的输出功率均为240 mW,图4(a)、(b)分别为两路窄线宽超荧光光源在该功率水平下的输出光谱图,中心波长分别为1060.23 nm和1078.35 nm,3 dB光谱带宽分别为0.051 nm和0.045 nm,与所使用窄带宽FBG固有带宽基本保持一致,未出现光谱展宽。因1078 nm一路超荧光光源在滤波过程中采用未经切趾处理的自制光纤布拉格光栅,从图4(b)可以看出,1078.35 nm的主峰左侧有两个次峰,但主次两峰强度差小于27 dB,次峰对后续放大过程影响很小。

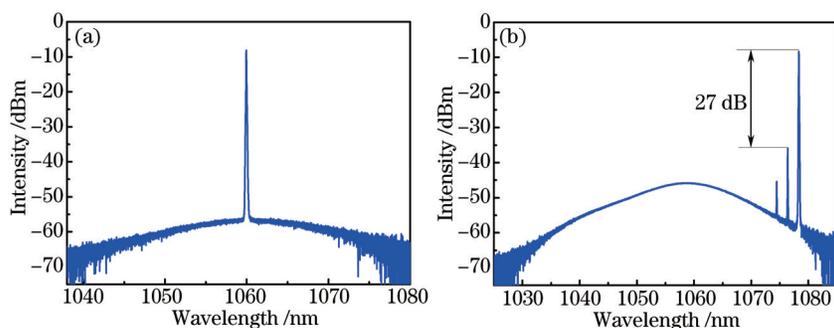


图4 (a) 1060 nm和(b) 1078 nm窄带宽超荧光种子源输出光谱曲线

Fig.4 Emission spectra of (a) 1060 nm and (b) 1078 nm narrow band superfluorescent seed source

经最后一级预放大级放大后的1060 nm和1078 nm两路窄线宽超荧光种子光,经5 W隔离器后输出功率均为2 W,进入主放大级后,分别在84.9 W和83.2 W的抽运功率下获得了57.4 W和56.6 W的输出功率,斜率效率分别为66.6%和66.7%,在放大过程中具有良好的线性特征,因此可通过进一步提高抽运光源的抽运功率来获得更高功率的窄线宽超荧光输出。在该功率水平下,1060 nm和1078 nm两路窄线宽超荧光光源输出光束质量分别为 $M_{x_{1060}}^2 = 1.5$ 、 $M_{y_{1060}}^2 = 1.3$ 和 $M_{x_{1078}}^2 = 1.9$ 、 $M_{y_{1078}}^2 = 1.7$,图5(a)、(b)中插图分别为两路超荧光光源在束腰处的光斑形状。进入放大级前,1060 nm与1078 nm波段超荧光3 dB带宽分别为0.055 nm和0.043 nm,如图5(c)、(d)所示,经主放大级放大后的输出光谱线宽分别稳定在0.053 nm和0.058 nm,较种子光光谱未出现中心波长的偏移。

输出功率分别为57.4 W和56.6 W的两路窄线宽超荧光光源出射光束由准直系统准直,经全反镜反射后,入射至透射式衍射光栅,经衍射光栅合束,获得平均功率为104.2 W超荧光输出,输出光谱如图6(a)所示。图6(b)为合束输出功率与总入射功率的关系曲线,斜率效率即光谱合束效率为91.3%,由于零级衍射及合束过程中散射造成损耗,合束效率略低于衍射光栅最高衍射效率。经多点测量,近场及远场合束光束光斑重叠度高,图6(c)为合束后输出光束的光束质量拟合曲线, x 轴方向 $M_x^2 = 1.7$, y 轴方向 $M_y^2 = 1.4$,较单路测量结果未出现恶化,插图分别为束腰处光斑形状。

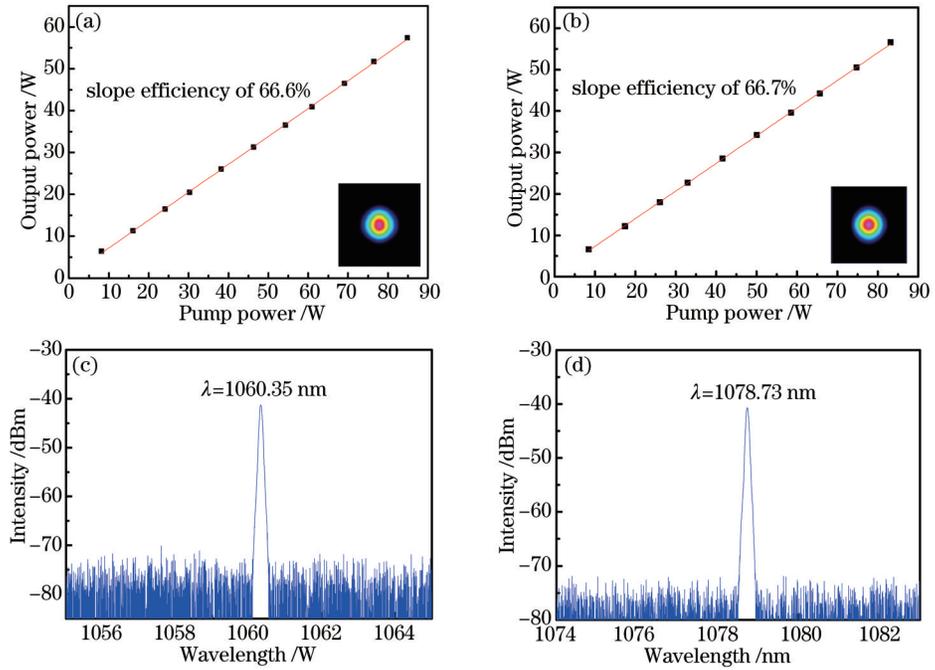


图 5 (a) 1060 nm 和(b) 1078 nm 超荧光光源主放大级输出功率与抽运功率关系曲线; (c) 1060 nm 和(d) 1078 nm 超荧光光源主放大级输出光谱曲线

Fig.5 (a) 1060 nm and (b) 1078 nm output power versus launched pump power of superfluorescent main amplifier; emission spectra of (c) 1060 nm and (d) 1078 nm narrow band superfluorescent main amplifier

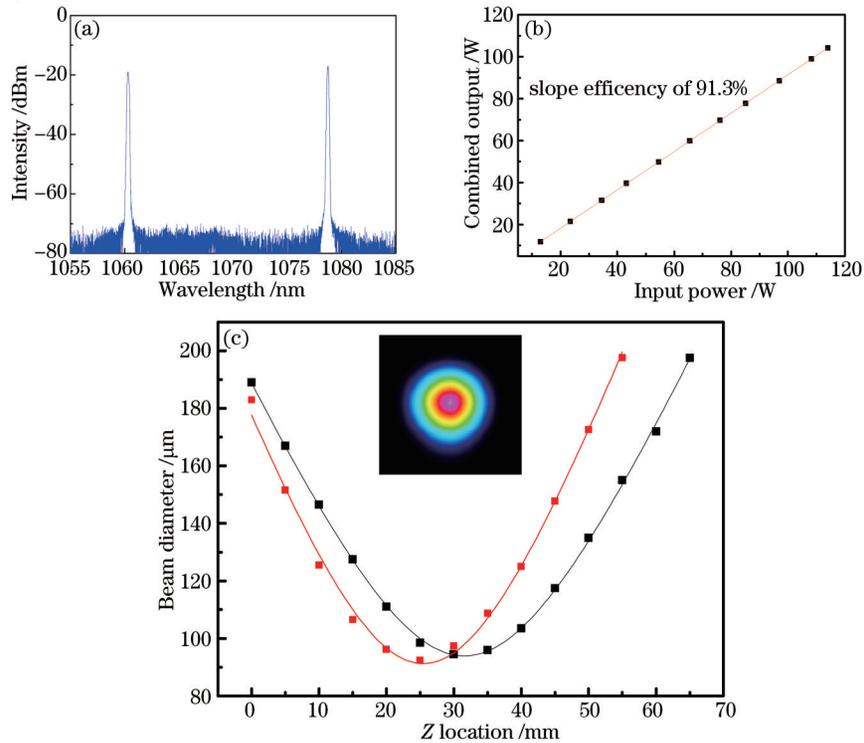


图 6 (a) 合束输出光谱图; (b) 输入功率与合束输出功率关系曲线; (c) 合束输出光束质量拟合曲线, 插图为合束输出光斑轮廓
Fig.6 (a) Output spectrum of combined beam; (b) input power versus output power of combined beam; (c) beam quality fitting curve of combined beam, the insert shows beam profile of the combined beam

4 结 论

介绍了基于全光纤窄线宽超荧光光源的两路光谱合束系统, 对利用窄线宽超荧光光源实现光谱合束进

行了初步的探索性研究,并实现了稳定的超荧光光谱合束输出。单路窄线宽超荧光光源最高输出功率分别为 57.4 W 和 56.6 W,斜率效率分别为 66.6%、66.7%,3 dB 光谱带宽均为 0.05 nm。利用上述窄线宽超荧光光源经透射式衍射光栅进行光谱合束,获得了平均功率为 104.2 W 的超荧光合束输出,合束效率为 91.3%,光束质量 $M_x^2 = 1.7$, $M_y^2 = 1.4$ 。光谱合束为进一步提高光纤光源输出功率提供了更加直接、有效的途径,基于全光纤化的窄线宽光谱合束超荧光光源系统结构简单,紧凑可靠,在后续工作中可通过提高抽运光源的抽运功率、更换主放大级掺杂光纤、调整空间光路等方法来提高合束输出功率、合束效率并优化光束质量。

参 考 文 献

- 1 Liu Guangbo, Yang Yifeng, Lei Min, *et al.*. 1.5 kW near-diffraction-limited narrow band all-fiber superfluorescent source[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1202009.
刘广柏, 杨依枫, 雷 敏, 等. 1.5 kW 近衍射极限全光纤窄带超荧光光源[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1202009.
- 2 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. 基于掺镱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.
- 3 Wang Xiaolin, Tao Rumao, Zhang Hanwei, *et al.*. 1 kilowatt single-end pumped all-fiber laser oscillator with good beam quality and high stability[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105001.
王小林, 陶汝茂, 张汉伟, 等. 1 kW 单端抽运、高光束质量、高稳定性全光纤激光振荡器[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105001.
- 4 V Gapontsev, V Fomin, A Ferin, *et al.*. Diffraction limited ultra-high-power fiber lasers[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2010, AWA: AWA1.
- 5 E Stiles. New developments in IPG fiber laser technology[C]. Proceeding of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009: 1-2.
- 6 D J Richardson, J Nilsson, W A Clarkson. High power fiber lasers: Current status and future perspectives [invited][J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- 7 T Schreiber, C Wirth, O Schmidt, *et al.*. Incoherent beam combining of continuous-wave and pulsed Yb-doped fiber amplifiers[J]. IEEE J Selected Optics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 354-360.
- 8 T Y Fan. Laser beam combining for high power, high-radiance sources[J]. IEEE J Selected Optics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567-577.
- 9 T Y Fan, A Sanchez. Coherent (phased array) and wavelength (spectral) beam combining compared[C]. SPIE, 2005, 5709: 157-164.
- 10 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.
- 11 O Schmidt, M Rekas, C Wirth, *et al.*. High power narrow-band fiber-based ASE source[J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4421-4427.
- 12 P F Wysocki, M J F Dignonnet, B Y Kim, *et al.*. Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(3): 550-567.
- 13 K Takada, T Kitagawa, M Shimizu, *et al.*. High-sensitivity low coherence reflectometer using erbium-doped superfluorescent fibre source and erbium-doped power amplifier[J]. Electronics Letters, 1993, 29(4): 365-367.
- 14 J H Han, S J Kim, J S Lee. Transmission of 4 \times 2.5-Gb/s spectrum-sliced incoherent light channels over 240 km of dispersion-shifted fiber with 200-GHz channel spacing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(7): 901-903.
- 15 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.
- 16 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, 2010, 7580: 758000.
- 17 P Wang, J K Sahu, W A Clarkson. 110 W double-ended ytterbium-doped fiber superfluorescent source with $M^2=1.6$ [J]. Optics Letters, 2006, 31(21): 3116-3118.
- 18 W T Chen, D Y Shen, T Zhao, *et al.*. High power Er, Yb-doped superfluorescent fiber source with over 16 W output near 1.55 μm [J]. Optics Express, 2012, 20(13): 14542-14546.
- 19 H Y Luo, J F Li, L L Wang, *et al.*. High power broadband amplified spontaneous emission source near 3 μm [J]. IEEE Photonics Technology

- Letters, 2014, 26(22): 2287–2290.
- 20 J M Xu, L G Huang, J Y Leng, *et al.*. 1.01 kW superfluorescent source in all-fiberized MOPA configuration[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 5485–5490.
- 21 J M Xu, W Liu, J Y Leng, *et al.*. Power scaling of narrowband high-power all-fiber superfluorescent fiber source to 1.87 kW[J]. Optics Letters, 2015, 40(13): 2973–2976.
- 22 X X Jin, X Wang, J M Xu, *et al.*. High-power thulium-doped all-fiber amplified spontaneous emission sources[J]. Journal of Optics, 2015, 17(4): 045702.
- 23 J Liu, H X Shi, C Liu, *et al.*. Widely-tunable high-power narrow-linewidth thulium-doped all-fiber superfluorescent source[C]. CLEO: 2015, 2015, JTh2A: JTh2A.98.

栏目编辑: 宋梅梅