

文章编号: 1001-3806(2018)06-0835-05

用于光纤激光器光谱组束的外腔反馈研究

刘小溪¹, 王学锋^{1,2*}, 阚宝玺^{1,2}, 王军龙^{1,2}, 朱占达¹, 郑也¹

(1. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100094; 2. 北京市光纤传感系统工程技术研究中心, 北京 100094)

摘要: 为了解决光纤激光器外腔光谱组束中存在像差以及发光单元反馈不足等问题, 采用将组束系统中单个传输透镜准直和聚焦功能分离的方法, 搭建了光纤激光外腔反馈系统, 实现了激光波长的锁定。结果表明, 该系统光光转换效率为 91.5%, 反馈输出线宽为 0.16nm, 输出功率为 29.7W, 组束方向 $M^2 = 1.241$, 非组束方向 $M^2 = 1.171$, 实验结果同理论分析相符。该外腔反馈方案可以应用于光纤激光器光谱组束。

关键词: 激光器; 光纤激光器; 外腔反馈; 光谱组束

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.06.020

Research of external cavity feedback for spectral beam combining of fiber lasers

LIU Xiaoxi¹, WANG Xuefeng^{1,2}, KAN Baoxi^{1,2}, WANG Junlong^{1,2}, ZHU Zhanda¹, ZHENG Ye¹

(1. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China; 2. Beijing Engineering Technology Research Center of Optical Fiber Sensing System, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to solve the problems, such as aberration in spectrum beam combining (SBC) of external cavity of fiber lasers and insufficient feedback of light emitting units, separating the collimation and focusing function of a single transmission lens in a beam combining system instead of multiple lenses, an external cavity feedback system for an optical fiber laser was set up. Laser wavelength was locked. Through theoretical analysis and experimental verification, the result shows that, optical-optical efficiency is 91.5%, output line width of feedback is 0.16nm, output power is 29.7W, M^2 in beam combining direction is 1.241, and M^2 of non beam combining direction is 1.171. Experimental results are in agreement with theoretical analysis. The external cavity feedback scheme can be applied to spectrum beam combining of fiber lasers.

Key words: lasers; fiber laser; external cavity feedback; spectral beam combining

引言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、热管理简单、使用灵活、结构稳定等一系列优点, 已成为高功率全固态激光器技术研究热点^[1-3]。但由于非线性效应, 光纤损伤、抽运耦合、模场直径等因素的制约, 单纤单模光纤激光器输出功率受限^[4-5]。若要获得更高功率水平, 则需要采用多路光束组束方式实现^[6-8]。目前发展较快的主要有相干组束和光谱组束 (spectral beam combining, SBC)。相干组束容易受到外界环境干扰, 且对光束的相位稳定性和控制精度要求较高; 光

谱组束无需相位控制, 结构简单, 对光束稳定性和控制要求较低, 同时又能实现较高的光束质量, 是光纤激光器实现高功率、高光束质量激光输出的较好方案^[9]。

自 1999 年以来, 麻省理工大学、美国空军实验室、德国夫琅和费研究所、洛克希德·马丁公司及中国工程物理研究院应用电子学研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所等单位先后对光谱组束技术进行了研究^[10-19]。其中, 美国洛马公司通过内腔光谱组束, 获得了输出功率大于 30kW 的激光输出^[16], 中国科学院上海光学精密机械研究所通过对 8 路全光纤超荧光光源的组束, 实现了 10.8kW 的组束输出^[19]。

根据组束元件(光栅)所处的位置, 光纤激光光谱组束可分为光栅在谐振腔之外的内腔型光谱组束与光栅在谐振腔之内的外腔型光谱组束。内腔型光谱组束中, 各子束激光器相互独立, 便于调试。由于组束输出光束质量随子束激光线宽增加而降低, 因而内腔型光谱组束对子束激光线宽要求较为严格。采用双光栅补

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFF0104500)

作者简介: 刘小溪 (1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光谱组束的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xuefeng_wang@sina.cn

收稿日期: 2017-11-20; 收到修改稿日期: 2017-12-08

偿的方法可以对光束质量的退化进行补偿,但其光束质量下降的趋势不可避免^[20],并且双光栅补偿法对光栅位置的调节精度要求较高。外腔型光谱组束系统中,光路中存在反馈结构,光栅和部分反射平面镜对波长具有选择作用,不满足反馈条件的光束无法形成振荡,子束激光波长自适应,对激光光源线宽要求较低。

针对光纤激光器外腔光谱组束系统中,发光单元反馈量不足、偏离主光轴的发光单元存在像差、组束结构限制子束激光数量、多子束激光组束要求较大口径传输透镜等问题,改进外腔反馈方案,提出将组束系统中单个传输透镜准直和聚焦功能分离的措施,子束激光分别由对应的准直透镜准直。对光纤激光器外腔光谱组束过程中,激光线宽、光纤芯径对输出光束质量的影响进行了理论计算及模拟仿真,搭建了光纤激光器外腔反馈系统,实现了激光波长的锁定。光光转换效率为 91.5%,反馈输出线宽为 0.16nm,输出功率为 29.7W,组束方向(衍射方向) $M^2 = 1.241$,非组束方向 $M^2 = 1.171$ 。

1 外腔组束原理

外腔反馈光谱组束结构如图 1 所示^[13]。谐振腔由增益光纤左端的高反镜(high reflector, HR)和系统右端的部分反射平面镜构成,部分反射平面镜输出组束激光。光纤输出端面位于透镜焦平面上,各光束经透镜后为准直光束,确保光束能够原路返回,实现波长锁定。光栅在透镜的焦平面上,光束经透镜后在光栅上重合,经光栅衍射后,各个激光源锁定在不同的波长,由于光栅的色散作用,使各个光束沿相同的方向出射,实现组束。

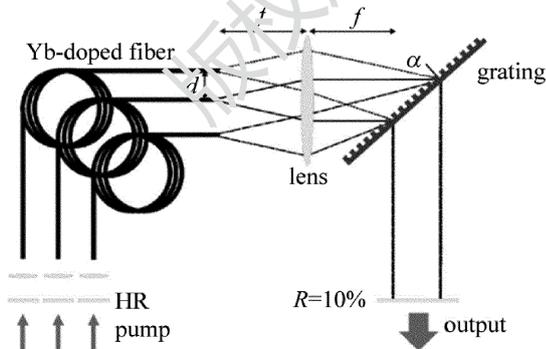


Fig. 1 Schematic layout of external cavity SBC

该组束系统中的传输透镜,同时具有聚焦和准直的功能。为同时实现这两个功能,传输透镜与光纤输出端面之间、传输透镜与光栅之间的距离有严格的限制,光纤输出端面和衍射光栅要分别放在传输透镜的前后两个焦面上。在该组束系统中:(1)偏离主光轴

的发光单元会产生像差,导致组束后整体光束质量下降;(2)光纤输出端需要放置在透镜焦面上,这就限制了参与组束的子束激光数量;(3)基于该结构的光谱组束系统光程较长,整体结构较大,在反馈过程中存在发光单元反馈量不足的问题;(4)增加组束光束数量需要采用更大口径的传输透镜,较大口径透镜加工较为困难,成本较高。

本文中在原组束系统进行了优化,如图 2 所示。图中,LD 为激光二极管(laser diode),HR-FBG 为高反镜光纤布喇格光栅(high reflector fiber Bragg grating),YDF 为掺镱光纤(Yb-doped fiber)。子束激光分别由对应的准直透镜准直,经透射光栅衍射及部分反射平面镜锁定波长。该方案中:(1)通过空间位置的摆放实现在光栅上的聚焦,可避免由像差引起的旁轴光束组束效率下降^[13];(2)消除子束激光输出端统一放置在单一传输透镜焦点附近的限制,空间布局较为自由,可容纳更多路光束参与组束,进一步提高组束输出功率;(3)透射光栅无需放置在传输透镜焦平面处,可以避免子束激光反馈量不足的问题;(4)多路光束组束无需大口径透镜,工程难度较低。

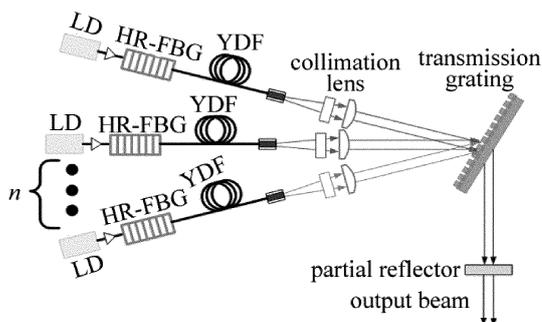


Fig. 2 Schematic layout of external cavity SBC after improvement

2 计算与仿真

2.1 线宽、光纤芯径对光束质量影响

$$\text{由光栅方程: } m\lambda = d(\sin i + \sin \theta) \quad (1)$$

$$\text{可得: } \Delta\lambda = d\cos\theta\Delta\theta \quad (2)$$

式中, m 为衍射级次, λ 为入射激光波长, d 为光栅刻线宽度, i 为入射角, θ 为衍射角。对于满足 Littrow 条件的光束,入射角等于衍射角。在光谱组束系统中,激光线宽可用 $\Delta\lambda$ 表示。当仅考虑色散造成的影响时,光束经过光栅后的发射角为: $\beta = \alpha + \Delta\theta_\lambda$ (3) 式中, α 为入射光束的发散角, $\Delta\theta_\lambda$ 表示因光束具有一定线宽,经光栅色散时衍射角增大的角度。在图 1、图 2 所示的光谱组束系统中, $\Delta\theta_\lambda = \Delta\theta$ 。

在光纤激光光谱组束系统中,光纤芯径即为光源

宽度。对于光源宽度为 D 的光束,经焦距为 f 的透镜准直后,其发散角为:

$$\alpha = D/f \quad (4)$$

当仅考虑谐振腔分辨率影响时,如图 1 所示的外腔结构输出激光线宽为^[20]:

$$\Delta\lambda = Dd\cos\theta/f \quad (5)$$

将(2)式、(5)式代入(3)式,可得衍射光束的发散角:

$$\beta = D/f + (d\cos\theta)^{-1} \times Dd\cos\theta/f = 2D/f = 2\alpha \quad (6)$$

在光纤激光光谱组束系统中,光束经过组束元件即光栅衍射后,腰斑半径不变,光束发散角为原发散角的 2 倍,如图 3 所示。由(4)式及(6)式可知,组束系统中光纤芯径对组束后光束的发散角也有影响。

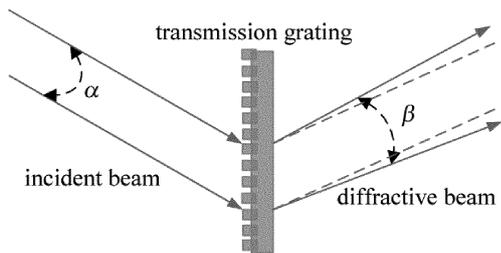


Fig. 3 Schematic layout of beams before & after grating

2.2 外腔反馈仿真

实验中采用透射光栅,衍射级次为 -1 级,则 $m = -1$,采用的光栅 1000line/mm,波长为 1080nm,理论计算线宽为 0.2nm,衍射角 32.60°。采用输出光纤为大模场双包无源光纤(Nufen GDF-20/400),芯径为 20μm。在 ZEMAX 设计中,通过设计 3 个波长分为 1080nm,1080.05nm,1079.95nm 的高斯光源从同一位置沿相同方向出射,表征线宽全宽为 0.2nm 的光束。在非序列中加入高斯光源,束腰宽度为 9μm,数值孔径为 0.06,对应的位置均为 0.15nm,光功率均为 1.00W。

选取的光栅为透射光栅,光栅刻线数取为 1000line/mm,衍射级次选取 -1 ,与 x 轴方向夹角设为 32.60°。

外腔反馈系统空间结构示意图如图 4 所示。组束

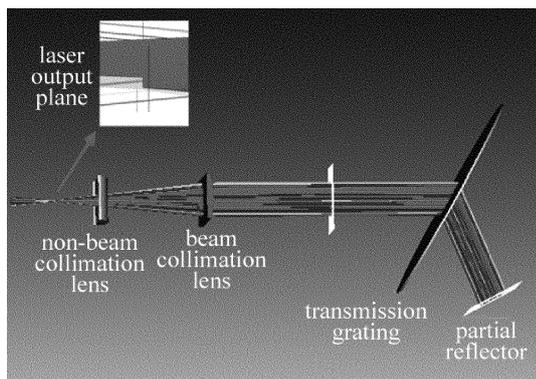


Fig. 4 Simulation layout of external cavity feedback system in ZEMAX

方向准直透镜焦距选用 75mm 焦距柱透镜,非组束方向准直透镜选用 30mm 柱透镜,光栅选取 1000line/mm。

在激光输出端面处分别采集出射光与反馈光在组束方向上的光场强度分布,其分布如图 5 所示。当激光输出端面上的光斑半宽度与出射光斑宽度相同时,返回的光能占输出光能的 72.73%。

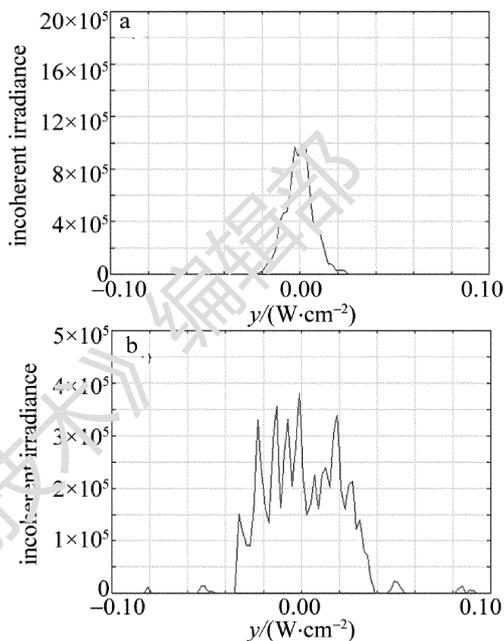


Fig. 5 Light field distribution

a—output laser b—feedback laser

按照上面所述的设置,引入第 2 路子束激光,进行双路组束仿真。第 2 路子束激光波长设置为 1060nm,组束方向准直透镜焦距选用 75mm 焦距柱透镜,非组束方向准直透镜选用 30mm 柱透镜,其空间结构见图 6。

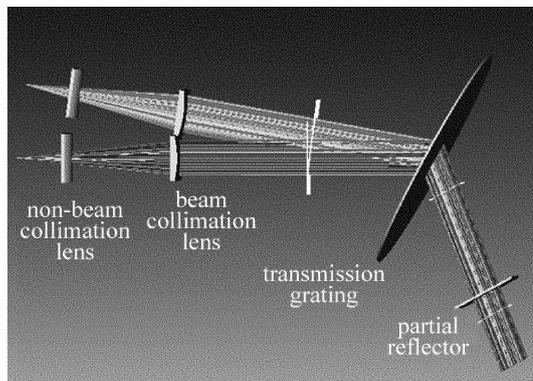


Fig. 6 Simulation layout of SBC system in ZEMAX

分别采集单路外腔反馈与双路组束输出时,光栅后方与部分反射平面镜后方的组束方向光场强度分布,其分布如图 7 所示。双路子束激光组束时光场分布与单路外腔反馈时光场分布一致。

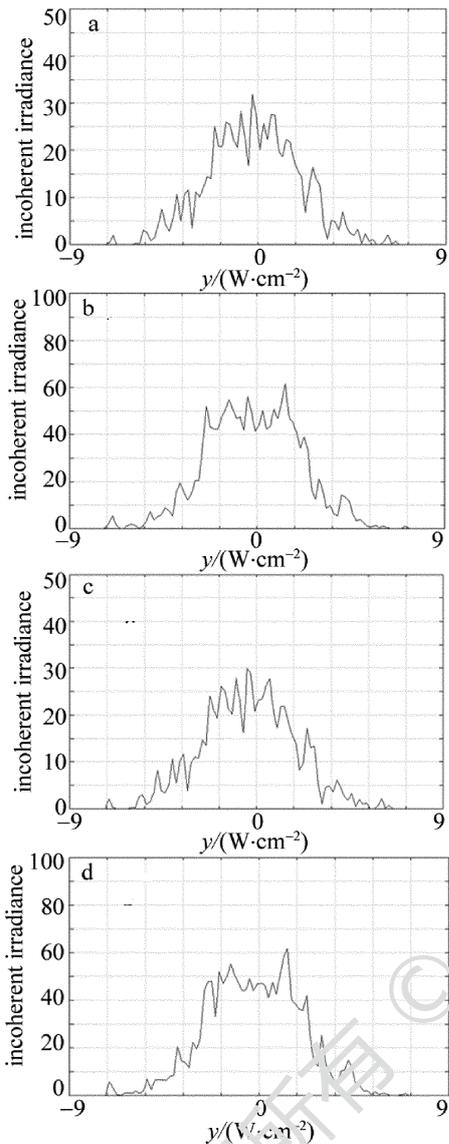


Fig. 7 Light field distribution

a—external cavity feedback laser after grating b—SBC after grating c—external cavity feedback laser after partially reflecting flat mirror d—SBC after partially reflecting flat mirror

3 实验结果与分析

3.1 实验结构

本文中采用的光纤激光器外腔反馈实验结构如图 8 所示。实验中采用的增益光纤为大模场双层掺镱光纤 (Nufen PLMA-20/400), 输出的光纤为大模场双包无源光纤 (Nufen GDF-20/400), 光纤端面镀增透膜 (反射率小于 0.5%)。光纤激光器产生激光后先经过 $f=30\text{mm}$ 输出光束先经过的柱透镜, 对光束水平方向直行准直, 然后经过 $f=75\text{mm}$ 的柱透镜, 对光束竖直方向进行准直, 后光束入射到透射光栅上, 经光栅衍射后, 入射到部分反射平面镜上。调节光路, 待反馈条件

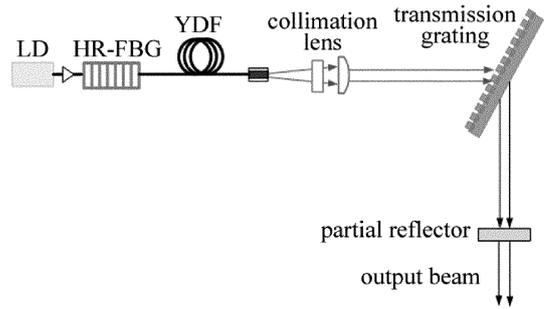


Fig. 8 Schematic layout of external feedback system

成立后, 拆除低反射率光纤光栅, 形成外腔反馈系统。

3.2 实验结果及分析

分别测量光纤激光器自由运转及外腔反馈输出时的功率, 结果如图 9 所示。部分反射平面镜的反射率为 10%。当驱动电流为 12A 时, 外腔反馈激光输出功率为 29.7W, 光纤激光器自由运转功率为 32.4W, 光光转换效率为 91.5%。在工作电流范围内, 光光转换效率高于 90%。

采用 SCPRICON M2-200 型光束质量分析仪测量

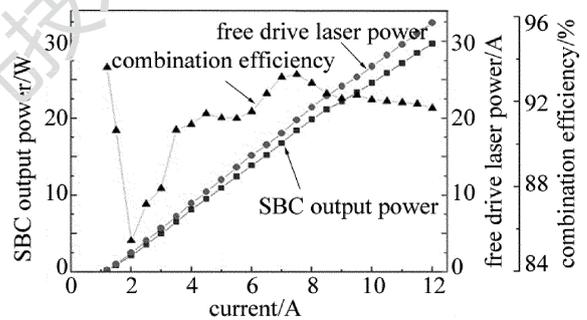


Fig. 9 Relationship of SBC output power, free drive laser power, combination efficiency and current

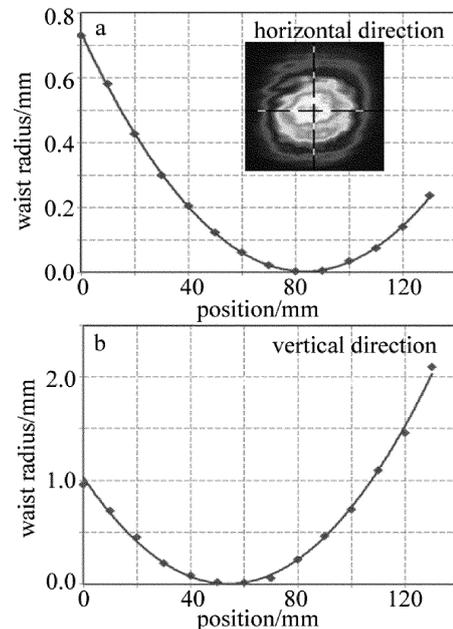


Fig. 10 Qualitative measurement results of external cavity feedback of SBC

外腔反馈输出的光束质量,组束方向光束质量 $M^2 = 1.241$,非组束方向光束质量 $M^2 = 1.171$ 。组束方向与非组束方向相比,光束质量相近,如图 10 所示。外腔反馈输出光束的光束质量优于 RÖSER 等人外腔光谱组束输出的光束质量^[13]。

在驱动电流为 12A 的情况下,光纤激光器自由运转输出光谱与外腔反馈输出光谱如图 11 所示。从图中可以看出,自由运转时,频谱内除主峰外还有次峰,而外腔反馈后,频谱内只有单一的主峰,证明激光波长实现锁定。由第 2 节中的分析可知,光谱宽度理论值为 0.2nm,光谱仪测得外腔反馈输出光谱宽约为 0.16nm,与理论分值有较小差距,其原因主要为光栅放置的角度和位置存在误差。

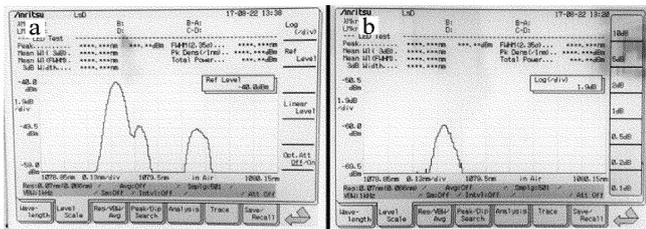


Fig. 11 Spectrum of fiber laser and SBC system
a—fiber laser on free drive b—SBC system

4 结 论

通过对外腔反馈结构进行改进,将组束系统中单个传输透镜的准直和聚焦功能分离,以获得更好的组束输出光束质量。实现了光纤激光外腔反馈锁波长输出,连续输出功率为 29.7W,光光转换效率为 91.5%,反馈输出组束方向光束质量 $M^2 = 1.241$,非组束方向 $M^2 = 1.171$ 。外腔反馈过程中,光谱谱线宽度与理论计算基本一致。该外腔反馈方案可应用于多路光纤激光光谱组束。

参 考 文 献

[1] LOU Q H, ZHOU J, WANG Zh J. Analysis of high-power fiber laser weapons[J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 161-165 (in Chinese).

[2] BACHMANN F, LOOSEN P, POPRAWA R. High power diode lasers technology and applications[M]. New York, USA: Springer, 2007: 38-39, 215-217.

[3] ZERVAS M N, CODEMARD C A. High power fiber lasers: a review [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5):0904123.

[4] DAWSON J W, MESSERLY M J, BEACH R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high av-

erage power[J]. Optics Express, 2008, 16(17):13240.

[5] CIAPURIN I V, GLEBOV L B, GLEBOVA L N, et al. Incoherent combining of 100W Yb-fiber laser beams by PTR Bragg grating, advances in fiber devices[J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 4974: 209-219.

[6] MADASAMY P, LOFTUS T, THOMAS P, et al. Comparison of spectral beam combining approaches for high power fiber laser systems [J]. Proceedings of the SPIE 2008, 6952: 1-10.

[7] LOFTUS T H, THOMAS A M, HOFFMAN P R, et al. Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications[J]. IEEE Journal of Select Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3):487-497.

[8] AFZAL R S, HONEA E, SAVAGE LEUCHS M, et al. Spectrally beam combined fiber lasers for high power efficiency and brightness [J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8547:1-4.

[9] ZHANG D Y, HAO J P, Zhu Ch, et al. Review on spectral beam combining of fiber lasers[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(5): 517-518 (in Chinese).

[10] COOK C C, FAN I Y. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity[J]. Advanced Solid-State Lasers, 1999, 26(10):163-166.

[11] AUGUST S J, GOYAL A K, AGGARWAL R L, et al. Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers. [J]. Optics Letters, 2000, 28(5): 331-332.

[12] RÖSER F, KLINGEBIEL S, LIEM A, et al. Spectral beam combining of fiber lasers [J]. Proceedings of the SPIE, 2006, 6102: 61020T-1.

[13] KLINGEBIEL S, RÖSER F, ORTAC B, et al. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency [J]. Journal of the Optical Society of America, 2007, 24(8): 1716-1720.

[14] THOMAS H L. High power spectrally beam combined fiber laser with near-diffraction limited beam quality [J]. Proceedings of the SPIE, 2007, 6453:64530S-1.

[15] WIRTH C, SCHMIDT O, TSYBIN I, et al. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2kW [J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3118-3119.

[16] HONEA E, AFZAL R S, SAVAGE-LEUCHS M, et al. Advances in fiber laser spectral beam combinings for power scaling[J]. Proceedings of the SPIE, 2016, 9730:97300Y-1.

[17] MA Y, YAN H, TIAN F, et al. Common aperture spectral beam combination of fiber lasers with 5kW power high-efficiency and high-quality output. [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(5): 040101 (in Chinese).

[18] MA Y, YAN H, PENG W J, et al. 9.6kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-line-width fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0901009 (in Chinese).

[19] ZHENG Y, YANG Y, WANG J, et al. 10.8K spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation[J]. Optics Express, 2016, 24(11):12063-12071.

[20] LIU A, MEAD R, VATTER T, et al. Spectral beam combining of high power fiber lasers [J]. Proceedings of the SPIE, 2004, 5335: 83-84.