

光纤激光器外腔型光谱组束研究

刘小溪^{**}, 王学锋^{*}, 王军龙, 朱占达, 郑也, 李磐

北京航天控制仪器研究所, 北京 100094

摘要 实验研究了两路光纤激光器外腔反馈型光谱组束(SBC),采用透射式衍射光栅作为组束元件,实现了1060 nm波长激光与1080 nm波长激光的光谱组束输出。输出光束组束方向光束质量为1.328,非组束方向光束质量为1.257,组束输出功率为57.3 W,光-光效率为91.7%。采用该组束方案可以降低单路激光器线宽的要求,同时验证了多路激光进行组束的可行性,通过增加组束光束个数可以进一步提高组束输出功率。

关键词 激光光学; 激光组束; 光谱组束; 光纤激光器; 外腔反馈

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0801009

External Cavity Spectral Beam Combining of Fiber Lasers

Liu Xiaoxi^{**}, Wang Xuefeng^{*}, Wang Junlong, Zhu Zhanda, Zheng Ye, Li Pan

Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China

Abstract External cavity feedback spectral beam combining (SBC) of two fiber lasers is investigated experimentally. A transmission grating is employed as the beam combining element and the SBC of a 1060 nm laser and a 1080 nm laser is achieved. The beam quality of 1.328 in SBC direction is obtained, while the beam quality in the other direction is 1.257. The output power of the SBC system is 57.3 W with a combining efficiency of 91.7%. Based on the configuration in this experiment, the requirement on the bandwidth of a single laser participating in the SBC can be significantly relieved. The experiment results verify the feasibility of multi-channel SBC. The SBC output power can be improved by the increase of the channels of the SBC system.

Key words laser optics; laser beam combining; spectral beam combining; fiber lasers; external feedback

OCIS codes 140.3298; 140.3510; 140.3290

1 引 言

近年来,随着半导体抽运源和包层抽运技术的发展,光纤激光器的输出功率不断提升,但是受制于非线性效应、热效应、端面损伤等因素,单纤单模激光输出功率存在理论极限^[1-6]。光谱组束(SBC)技术是在保证较高光束质量条件下提高光纤激光器输出功率的有效方法^[7-9],受到了国内外众多单位的广泛重视。

根据组束元件(衍射光栅)所处的位置,光纤激光光谱组束可分为衍射光栅在谐振腔之外的内腔型光谱组束与衍射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,通常需要达到 $0.1\text{ nm}^{[10]}$ 。采用双光栅补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^[11],并且双光栅补偿法对光栅位置的调节精度要求较高,增加的光栅会进一步降低整体的组束效率。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,无需窄线宽光源。

自1999年麻省理工大学首次提出光纤激光光谱组束以来,美国空军实验室、德国夫琅禾费研究所、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理论和实验研究^[12-18]。目前光纤激光器光谱组束研究主要集中在

收稿日期: 2018-02-09; 修回日期: 2018-03-30; 录用日期: 2018-04-24

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0104500)

* E-mail: xuefeng_wang@sina.cn; ** E-mail: liuxiaoxibiacd@foxmail.com

内腔型,对外腔型的研究和报道较少。

本文对外腔型光谱组束进行研究,实现了1060 nm波长激光与1080 nm波长激光的外腔光谱组束。

2 基本原理

2.1 外腔反馈组束原理

外腔反馈光谱组束结构如图1所示^[19],光纤输出端面与衍射光栅分别位于传输透镜的左右焦平面上,图中 L 为掺镱光纤(YDF)输出端之间的距离, α 为入射角。光纤输出的激光与传输透镜主轴平行。传输透镜对单路光束起到准直作用,各光束经传输透镜后成为准直光束,以确保光束能够原路返回。传输透镜对多路光束起到会聚作用,使各光束在衍射光栅上重合。谐振腔由增益光纤后端的高反镜(HR)和系统右端的部分反射平面镜(反射率 $R=10\%$)构成,光路中以掺镱光纤(YDF)作为增益介质。部分反射平面镜与衍射光栅共同实现波长选择与锁定,只有满足空间条件约束的波长方可返回光纤形成振荡,锁定后各个激光器的波长不同。衍射光栅的色散作用使各子束激光沿同一方向传播,从而实现多路不同中心波长激光的组束。

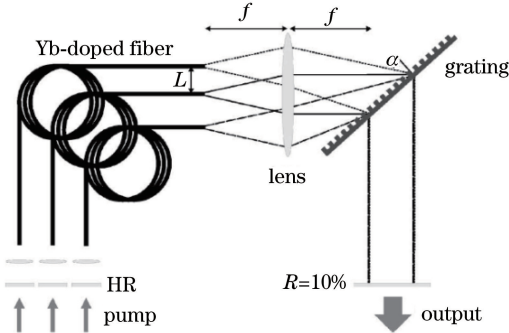


图1 外腔光谱组束系统结构示意图

Fig. 1 Schematic layout of external cavity SBC system

对于图1中所示的组束系统,传输透镜与透射光栅和光纤输出端面之间有较为严格的距离限制,光纤输出端面和衍射光栅分别放置在传输透镜的前后两个焦面上,以同时实现对单个光束准直和对多个光束聚焦的两个功能。在该组束系统中:1)偏离传输透镜主光轴的发光单元存在像差,组束后会导致整体光束质量下降;2)传输透镜口径的大小限制了参与组束的子束激光数量,增加组束子束激光数量需要增大传输透镜的口径;3)参与组束的子束激光数量因光纤输出端的空间部署要求而受限;4)基于该结构的光谱组束系统

光程较长,在反馈过程中存在发光单元反馈量不足的问题。

本文对已有组束系统进行了优化,如图2所示,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)子束发光单元分别由独立的准直透镜准直,通过空间位调节,实现了透射光栅上光束的重合,避免了由像差引起的旁轴光束组束光束质量和效率下降^[20];2)多路光束组束无需大口径透镜,可降低工程难度;3)发光单元空间布局相对自由,可提高单位空间内参与组束的子束激光数量,实现更高功率的组束输出;4)透镜光栅无需放置在传输透镜焦平面处,可以避免光程过长引起的子束激光反馈量不足的问题。

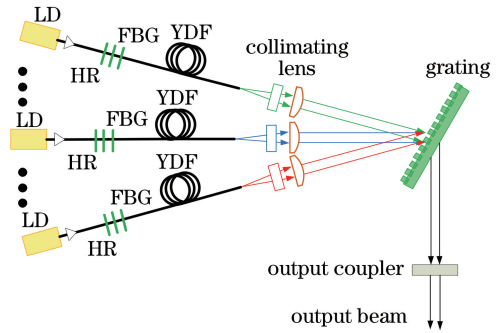


图2 优化后光谱组束系统结构示意图

Fig. 2 Schematic layout of SBC system after optimization

2.2 实验装置

光纤激光器光谱组束实验结构如图3所示。实验中采用的增益光纤为大模场双包层掺镱光纤(Nufern, PLMA-20/400),输出的光纤为大模场双包层无源光纤(Nufern, GDF-20/400),光纤端面镀增透膜(反射率小于0.5%),部分反射平面镜的反射率为15%。光束从端面输出后,由焦距 f 为30 mm的柱透镜和焦距 f 为75 mm的柱透镜分别对水平和垂直方向的光束进行准直。其中1060 nm波长激光准直后直接入射到透射光栅,1080 nm波长激光经过两片45°全反镜折转后入射到透射光栅,如图4所示。

为了保证组束效率,组束激光需要以近利托罗角入射到透射光栅上。当入射光束满足利托罗条件时,光栅衍射效率最高,此时入射角与衍射角相等,满足^[21]

$$\sin \theta_{\text{lit}} = \frac{\lambda}{2d}, \quad (1)$$

式中: θ_{lit} 为利托罗角; λ 为入射光束波长; d 为光栅刻线宽度。

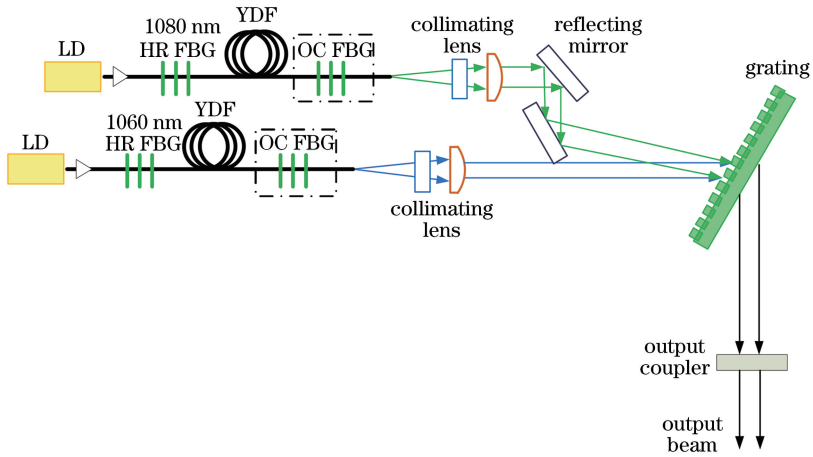


图 3 光谱组束实验系统结构示意图

Fig. 3 Schematic layout of SBC system

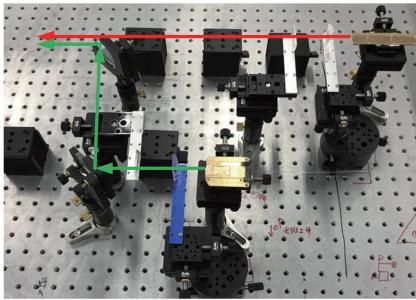


图 4 子束光束传播路线示意图

Fig. 4 Schematic of propagation route of laser sub-beams

选取的透射光栅刻线数为 1000 line/mm, 对于 1080 nm 波长和 1060 nm 波长的入射光, 统一单位后, 其利托罗角可表示为

$$\theta_{\text{lit}} = \arcsin \frac{\lambda}{2d} = \arcsin \frac{N \times \lambda \times 10^{-6}}{2}, \quad (2)$$

式中: N 为透射光栅刻线数, 单位为 line/mm。经计算, 1080 nm 和 1060 nm 波长入射光的利托罗角分别为 32.68° 与 32.00° 。

调节光路, 使两束准直光入射到光栅的同一位

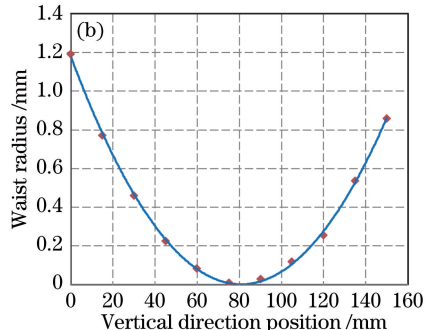
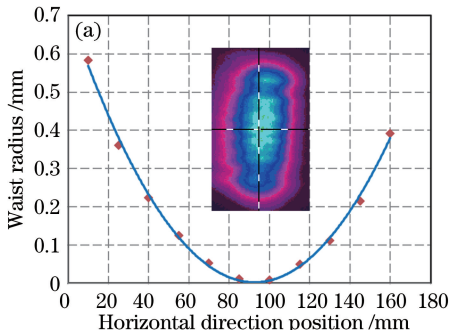


图 5 光谱组束光束质量测量。(a)水平方向;(b)竖直方向

Fig. 5 Beam quality measurement of the SBC. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

置, 且经过透射光栅后, 沿同一方向传播, 光束在空间上重合。与外腔反馈组束原理近似^[22], 该组束系统中, 各子束激光器的高反射率光纤光栅 (HR FBG) 与部分反射平面镜分别构成谐振腔, 各子束激光器以掺镱光纤 (YDF) 作为增益介质, 由于两路激光器共用部分反射平面镜, 整体构成了反馈组束激光器。

通过调整部分反射平面镜, 实现初步外腔反馈, 为获得较高的组束效率, 拆除子束光纤激光器中的低反射率光纤光栅, 重新熔接光纤, 连通光路, 完成外腔反馈光谱组束。

3 实验结果

采用光束质量分析仪 (SPIRICON, M2-200) 测量光谱组束后输出光束的光束质量, 测得组束方向 (水平方向) 光束质量为 1.328, 非组束方向 (竖直方向) 光束质量为 1.257, 如图 5 所示。

单独测量 1060 nm 波长子束光束质量, 水平方向光束质量为 1.153, 竖直方向光束质量为 1.205, 如图 6 所示。

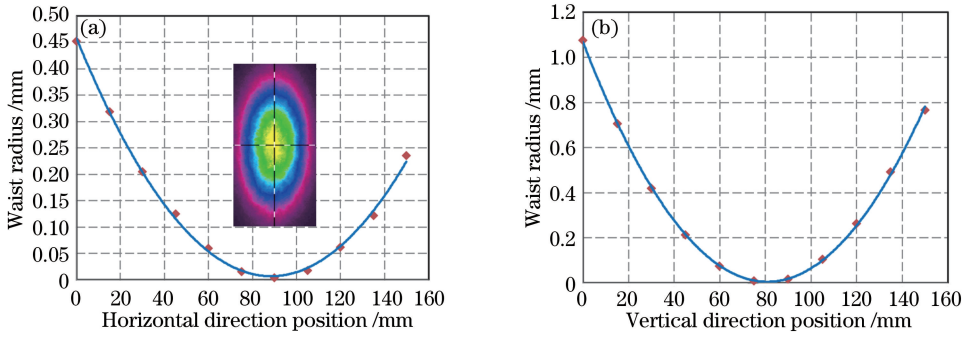


图 6 1060 nm 波长子束激光光束质量测量。(a)水平方向;(b)竖直方向

Fig. 6 Beam quality measurement of 1060 nm laser. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

单独测量 1080 nm 波长子束激光光束质量,水平方向光束质量为 1.308,竖直方向光束质量为 1.223,如图 7 所示。1080 nm 波长子束激光光束质量相对

1060 nm 波长子束略差,其原因主要为 1080 nm 波长光束经过两个 45° 全反镜的折转,存在一定的调节误差。

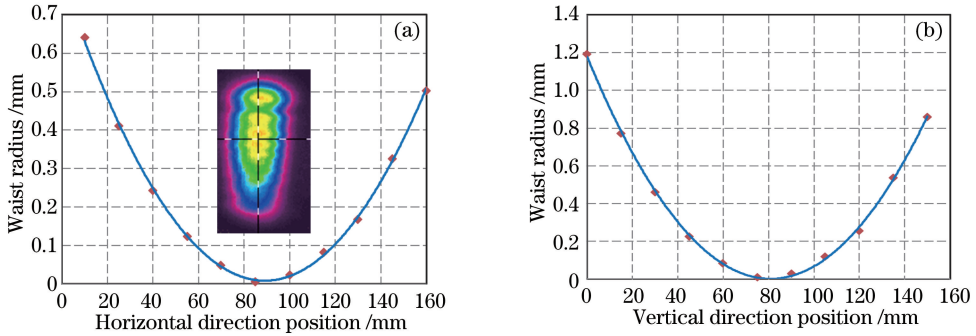


图 7 1080 nm 波长子束激光光束质量测量。(a)水平方向;(b)竖直方向

Fig. 7 Beam quality measurement of 1080 nm laser. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

综合对比由图 5~7 可得,组束后光束的光束质量与参与组束的子束光束质量基本一致。

由转运时,光谱内存在 3 个峰,半峰全宽 $\omega_{1/2}$ 为 0.685 nm,通过反馈锁定波长实现光谱组束后 $\omega_{1/2}$ 变为 0.121 nm;1060nm 激光器自由转运时,光谱范围内存在双峰, $\omega_{1/2}$ 为 0.275 nm,通过反馈锁定波长实现光谱组束后 $\omega_{1/2}$ 变为 0.178 nm;可以看出,外腔光谱组束系统中,外腔镜(即部分反射平面镜)与透射光栅对波长起到了筛选的作用。

当两路子束激光空间重合时,尚未实现反馈光谱组束,其光谱测量结果如图 8(a)所示。通过外腔反馈光谱组束后输出光束的光谱如图 8(b)所示。图 9 和图 10 分别为 1080 nm 和 1060 nm 激光器反馈组束锁定波长前后的光谱图。1080 nm 激光器自

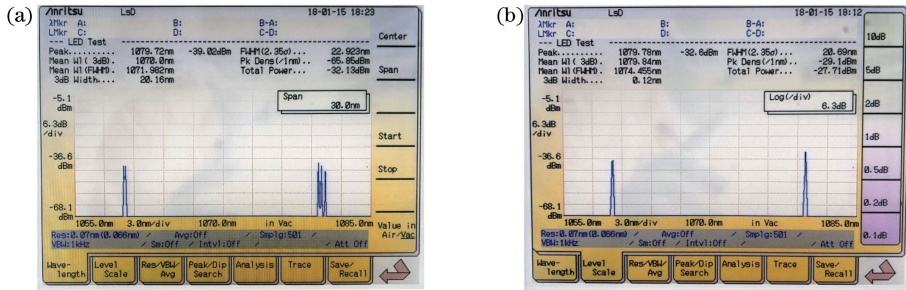


图 8 (a) 双路子束激光自由运转光谱图;(b)光谱组束后输出光谱图

Fig. 8 Spectra of (a) two sub-beams on free running and (b) after SBC

综合对比图 8(b)、图 9(b)和图 10(b),可以看出 1060 nm 与 1080 nm 两子束强度基本一致,波长锁定良好,两发光单元反馈均匀。

光纤激光器自由运转及光谱组束输出的功率如图 11(a)所示。当驱动电流为 12 A 时,1060 nm 和 1080 nm 光纤激光器自由运转功率之和为 62.5 W,

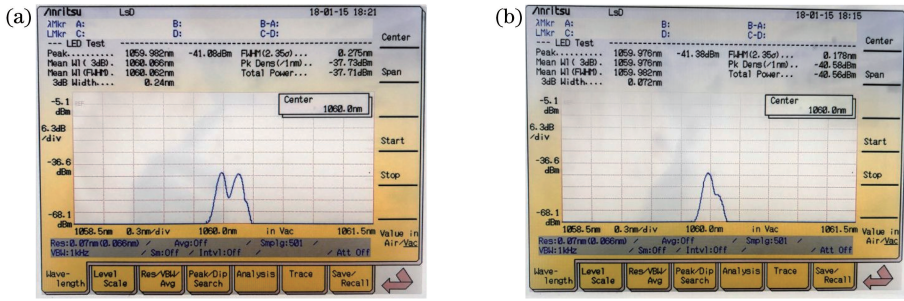


图 9 (a) 1060 nm 激光自由运转光谱图; (b) 光谱组束后 1060 nm 激光光谱图
Fig. 9 Spectra of 1060 nm laser (a) on free running and (b) after SBC

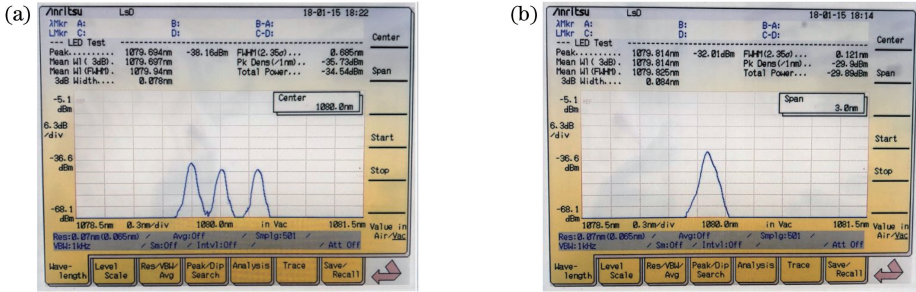


图 10 (a) 1080 nm 激光自由运转光谱图; (b) 光谱组束后 1080 nm 激光光谱图
Fig. 10 Spectra of 1080 nm laser (a) on free running and (b) after SBC

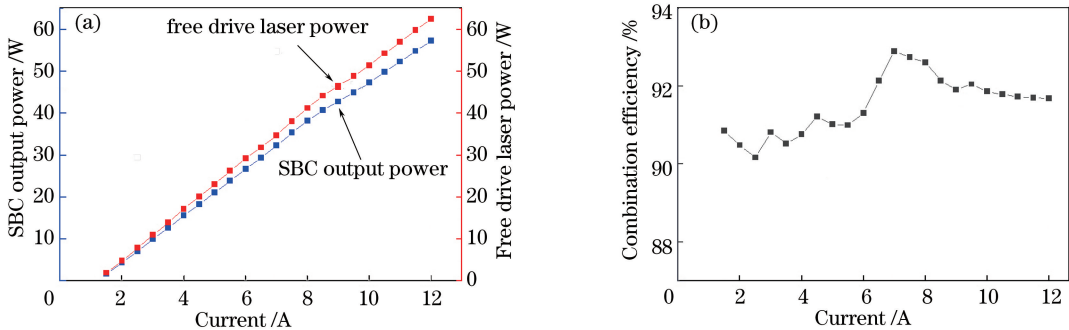


图 11 (a) 光谱组束输出功率和光纤激光器自由运转功率随电流变化图; (b) 光谱组束的组束效率随电流的变化
Fig. 11 (a) SBC output power and free running laser power as a function of current; (b) combination efficiency of the SBC as a function of current

两路光纤激光器光谱组束激光输出功率为 57.3 W, 组束效率为 91.7%, 如图 11(b) 所示。在工作电流范围内, 光-光效率高于 90%。

4 结 论

实验研究了两路光纤激光器外腔反馈型光谱组束, 实现了 1060 nm 波长与 1080 nm 波长激光的组束输出。光谱组束后, 光束的组束方向(水平方向)光束质量为 1.328, 非组束方向(竖直方向)光束质量为 1.257。1060 nm 波长子束激光线宽为 0.178 nm, 1080 nm 波长子束激光线宽为 0.121 nm。组束光束的光束质量与单路子束光束质量相近。当驱动电流为 12 A 时, 外腔反馈光谱组束激光输出功率为

57.3 W, 光纤激光器自由运转功率为 62.5 W, 组束效率为 91.7%。在工作电流范围内, 光-光效率高于 90%。此组束结构可以容纳更多子束激光参与组束, 后续将进行更多路的激光组束, 进一步提高组束输出激光功率。

参 考 文 献

[1] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.
[2] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13240-13266.

- [3] Ciapurin I V, Glebov L B, Glebova L N, *et al.* Incoherent combining of 100-W Yb-fiber laser beams by PTR Bragg grating [J], Proceedings of SPIE, 2003, 4974: 209-220.
- [4] Madasamy P, Thomas A, Loftus T, *et al.* Comparison of spectral beam combining approaches for high power fiber laser systems [C] // Frontiers in Optics 2008/Laser Science XXIV/Plasmonics and Metamaterials/Optical Fabrication and Testing, 2008: FTuJ3.
- [5] Feng Y, Jiang H W, Zhang L. Advances in high power Raman fiber laser technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201005.
冯衍, 姜华卫, 张磊. 高功率拉曼光纤激光器技术研究进展 [J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201005.
- [6] Bao H N, Shang J Y, Li Y, *et al.* The research of fuzzy control technology on laser guided vehicle [J]. Navigation and Control, 2017, 16(1): 17-22.
暴海宁, 尚俊云, 黎原, 等. 激光导引车模糊控制技术 [J]. 导航与控制, 2017, 16(1): 17-22.
- [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 Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 487-497.
- [8] Afzal R S, Honea E, Savage-Lueschs M. Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency and brightness [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8547: 854706.
- [9] Zhang D Y, Hao J P, Zhu C, *et al.* Review on spectral beam combining of fiber lasers [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(5): 517-521.
张大勇, 郝金坪, 朱辰, 等. 光纤激光器光谱合束技术综述 [J]. 激光与红外, 2016, 46(5): 517-521.
- [10] Charles X Y, Shatrovov O, Fan T Y. All-glass fiber amplifier pumped by ultra-high brightness pumps [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9728: 972806.
- [11] Liu A, Mead R, Vatter T, *et al.* Spectral beam combining of high power fiber lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5335: 81-89.
- [12] Cook C C, Fan T Y. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity [C]. Advanced Solid State Lasers, 1999, 26: 163-166.
- [13] Klingebiel S, Röser F, Ortaç B, *et al.* Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency [J]. Journal of the Optical Society of America B, 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 SPIE, 2007, 6453: 64530S.
- [15] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, *et al.* High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW [J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3118-3120.
- [16] Honea E, Afzal R S, Savage-leuchs M, *et al.* Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9730: 97300Y.
- [17] Ma Y, Yan H, Peng W G, *et al.* 9.6 kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0901009.
马毅, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的 9.6 kW 共孔径光谱合成光源 [J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0901009.
- [18] Zheng Y, Yang Y F, Wang J H, *et al.* 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation [J]. Optics Express, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [19] Röser F, Klingebiel S, Liem A, *et al.* Spectral beam combining of fiber lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6102: 61020T.
- [20] Augst S J, Goyal A K, Aggarwal R L, *et al.* Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers [J]. Optics Letters, 2003, 28(5): 331-333.
- [21] Clausnitzer T, Kämpfe T, Kley E B, *et al.* Highly-dispersive dielectric transmission gratings with 100% diffraction efficiency [J]. Optics Express, 2008, 16(8): 5577-5584.
- [22] Liu X X, Wang X F, Kan B X, *et al.* Research on external cavity feedback applied to spectral beam combining of fiber lasers [J/OL]. Laser Technology, 2017-12-13 [2018-01-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20171213.0920.002.html>.
刘小溪, 王学锋, 阚宝玺, 等. 用于光纤激光器光谱组束的外腔反馈研究 [J/OL]. 激光技术, 2017-12-13 [2018-01-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20171213.0920.002.html>.