



·强激光物理与技术·

## 基于双色镜光谱合成 9.6 kW 合成光源\*

孙儒峰, 张 昆, 张利明, 张雪霞, 吴 佟, 赵 鸿

(中国电子科技集团公司 第十一研究所, 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

**摘 要:** 通过光纤激光光谱合成技术, 可以打破单个光纤激光器输出功率受非线性因素制约的限制, 实现更高功率的激光输出。通过梳理光谱合成技术的发展历程并分析其现状, 对其原理及优劣势进行分析, 结合自身研究, 设计了一款便携式 3 路合成系统, 通过设计及优化光纤激光器的放大结构, 严格把控参与合束的子束光源的质量, 将 1055、1070 和 1085 nm 三路高功率窄线宽光纤激光进行合束, 对合成系统中采用的双色镜进行研究, 对其膜系指标进行严格的设计, 对高陡度截止滤光膜的设计方法以及制备工艺进行分析, 对其热损伤规律及控制技术进行研究, 优化整个合成系统, 最终实现合成功率 9650 W 的高功率激光输出, 合成效率 92%, 光束质量  $M^2$  为 1.7, 并对未来双色镜光谱合成进行了展望。

**关键词:** 光纤激光器; 高功率; 窄线宽; 双色镜; 光谱合成

中图分类号: O43

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230191

## 9.6 kW combined light source using dichroic-mirror-based spectral beam combining

Sun Rufeng, Zhang Kun, Zhang Liming, Zhang Xuexia, Wu Tong, Zhao Hong

(Key Laboratory of Solid State Laser Technology, the 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Using the fiber laser spectral beam combining technology, the limitation of the output power of a single fiber laser due to nonlinear factors can be broken, and a higher power laser output can be realized. Combing the development history of spectral beam combining technology and analyzing its current situation, principle, advantages and disadvantages, and combining with our research, we have designed a portable 3-channel combining system. By optimizing the entire combining system, three high power narrow linewidth fiber lasers of 1055 nm, 1070 nm and 1085 nm were combined to achieve a high-power laser output of 9650 W, with combination efficiency of 92%, and beam quality  $M^2$  of 1.7. The future dichromatic mirror spectral beam combining is also prospected.

**Key words:** fiber laser, high power, narrow linewidth, dichroic mirror, spectral beam combining

光纤激光器在科学研究、工业加工以及激光武器、光电对抗等国防领域一直有着广阔的应用场景并取得长足发展<sup>[1-4]</sup>, 然而, 光纤激光器在放大过程中, 受热效应、模式不稳定、非线性效应以及光纤端面损伤等诸多因素的限制, 单路光纤激光器的输出功率存在理论极限<sup>[5-7]</sup>。在相关特殊领域, 单路光纤激光器的亮度及功率已不能满足应用需求, 因此, 光束合成技术成为了提升激光器功率及亮度的重要技术途径。光束合成基本分为相干合成和非相干合成两大类, 分别具有各自特点。

相干合成通过控制各子路激光器的相位以及偏振特性一致, 并在远场实现相干来达到共孔径输出的目的, 理论上相干偏振合成技术可以实现合成子束的无限拓展<sup>[8]</sup>。在目前已知的公开报道中, 2019 年, 国防科技大学实验室通过主动相干技术实现 7 路总输出功率 8 kW 量级的光纤激光合成输出<sup>[9]</sup>; 2020 年, 以色列的 Civan 公司将 37 路光纤子束通过相干合成技术实现总功率 16 kW 的光纤激光输出, 是目前已知公开报导的光纤激光器相干合成的最高功率<sup>[10]</sup>。相干合成方式涉及相位控制技术、偏振控制技术、像差控制技术以及光程控制技术等关键技术, 对合

\* 收稿日期: 2023-06-21; 修订日期: 2023-11-08

基金项目: 固体激光技术重点实验室基金项目(H202201030941)

联系方式: 孙儒峰, 1659584741@qq.com。

通信作者: 张 昆, nukzhang@163.com。

成子束间的相位以及偏振状态需要进行实时监测并反馈,确保各子束间的相位同步。因此,相干合成方式的系统结构复杂,操作难度大,对子束要求高,在大规模阵列方面实现难度较大。

非相干合成分为简单的光束叠加和光谱合成两大类。光束的叠加并束占空比低,无法实现共孔径功率输出,并且输出光束的发散角较大,难以满足远距离传输要求<sup>[11]</sup>。光谱合成对各路子束的相干性、功率稳定性等均没有硬性要求,不需要复杂的相位控制系统,结构相对简单,能在提升输出功率的同时保持良好的光束质量,实现合成光束的共孔径输出,远场能量叠加的集中度好,是目前采用最多的光束合成方式。光谱合成可大致分为基于棱镜的光谱合成、基于衍射光栅的光谱合成、基于双色镜的光谱合成以及基于体布拉格光栅的光谱合成这四种主要光谱合成方式。棱镜本身色散能力较弱,分辨率较低,对纳米级的窄线宽光纤激光分辨较差,因此不适合高功率窄线宽光纤激光的大规模阵列拓展,应用较少<sup>[12]</sup>。衍射光栅合成方式国内外研究较多,2016—2019年,国内的中国科学院、中国航天科工集团有限公司以及国外的洛克希德·马丁公司、Fraunhofer-IOF研究所等都有相关报道<sup>[13-16]</sup>。衍射光栅合成方式具有高效的衍射效率,热功耗区域小,但其对合成子束的线宽以及功率要求较高并且对子束入射角度有着严格的控制,因此在级联拓展方面对衍射光栅本身的物理属性要求苛刻,入射角度的要求使得系统本身操作难度增大。对于体布拉格光栅合成,2015年,中国工程物理研究院使用透射式体布拉格光栅(VBG)合成方案实现两路激光合成输出2.5 kW,光束质量 $M_x^2=4.21$ , $M_y^2=2.83$ <sup>[17]</sup>,2016年,该团队采用反射式VBG方案进行4路光纤激光合成,功率为720 W,合成效率为94%, $M^2\approx 1.54$ <sup>[18]</sup>。受限于制备材料热光玻璃(PTR)本身物理特性,目前,基于VBG的光谱合成方案很难同时实现高功率与高光束质量同时合成输出,其在高功率合成时,温度的升高导致VBG的折射率发生变化,进而导致了光束的衍射和透射性能下降,因此,采用VBG的合成方案目前阶段不适用于大规模级联合成应用。基于双色镜的合成技术利用双色镜自身的物理特性,通过合理设计双色镜的透射(反射)谱,提高镀膜工艺,最终实现基于双色镜的高功率光纤激光共孔径合成输出。2019年,K. Ludewigh等实现了3路基于双色镜光束合成,合成功率率为5.9 kW,合成光束质量 $M^2$ 为1.9<sup>[19]</sup>。南京理工大学通过对双色镜本身热性能进行分析,最终实现了1070 nm和1090 nm两路合成输出,功率为10.25 kW,合成效率为98%,光束质量 $M_x^2\approx 12$ , $M_y^2 > 14$ <sup>[20]</sup>。通过对比不同的合成方式,双色镜因其自身的特点在高功率光纤激光光谱合成中有着良好的优势:对合成子束带宽要求较低,符合一定带宽范围内的激光子束均可用于双色镜合成,这也使得单路子束的功率可以进一步提升;由于其集成透/反射于一体,在系统结构上比其他合成方式的系统结构简单,操作便捷;双色镜本身免去了色散因素,避免了合成过程中因光学元件引起色散导致的合成光束质量退化,理论上整体合成效果较好。

本文基于双色镜的光谱合成方案,基于窄线宽光纤激光器子束,设计并实现了3路3.5 kW量级的窄线宽光纤激光共孔径光谱合成激光输出,实验获得的相关指标在保证高功率的同时具有良好的光束质量。

## 1 实 验

基于对目前采用合成方案的分析,本文最终采用效果更好的双色镜合成方案,通过对参与合成的激光子束和双色镜分别开展研究,获得了3.5 kW级的窄线宽子束以及具有高损伤阈值高陡度截止滤光薄膜的双色镜,通过合理的结构设计以及良好的热管理,最终设计了一款用于3路合成的合束系统,合成系统如图1所示。在该系统中分为激光器区域以及合成区域两个部分,在激光器区域为3个并排放置的子束激光器,每一个激光器均为3.5 kW量级的窄线宽光纤激光器,波长分别为1055、1070、1085 nm。合成区域由准直镜系统以及双色镜系统构成,3个

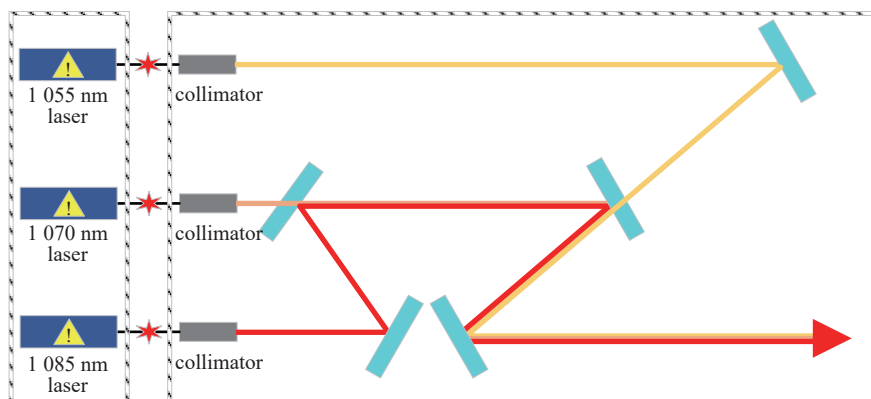


Fig. 1 Schematic diagram of the combining system

图1 合成系统示意图

并列排布的准直镜分别与 3 个激光器对应, 在其右侧是与之同轴的双色镜片, 每一个镜片的膜系标准都是经过严格筛选并满足用于合成的条件。在系统中, 共计用到 5 片镜片, 材质基板全部为熔融石英, 膜系中的折射率材料采用  $Ta_2O_5$  以及  $SiO_2$ , 其中 3 片镜片的膜系设计较简单, 全部为覆盖三种波段的反射率为 99% 以上的膜系, 中间那一路的镜片膜系设计较为严格, 其中靠近激光束输出头的那一片镜片膜系所覆盖的波段包含 HR@1085 nm, AR@1070 nm; 与之对应的右侧镜片上的膜系覆盖波段包含 HR@1070 nm&1085 nm, AR@1055 nm, 在每一片镜片外围均有水冷散热的夹持架子来保证在通光过程中镜片的散热, 减少在强光作用下镜片产生的热透镜效应。同时, 由于膜系的透射率并不能达到 100%, 系统内部产生杂散光, 并且系统在一个密闭环境下, 因此在系统中不同位置处放置了特殊设计的由紫铜材质制成的杂散光吸收体来减少系统内部的杂散光。

三束不同波长的激光经过准直器准直后, 分别射向与之对应的双色镜上, 由于膜系对不同波长的激光具有不同的透射与反射功能, 通过合理的排布, 使得三束不同波长的激光通过双色镜汇聚成同一束激光, 完成三束激光基于双色镜的共孔径合成输出。

参与合成的高功率窄线宽激光束实验结构如图 2 所示, 在该结构中, 整体采用主振荡功率放大(MOPA)结构的放大方式, 通过预放和主放两个阶段来实现激光放大输出。种子阶段包含一对布拉格全反光栅(HR FBG)以及输出耦合光栅(OC FBG), 976 nm 的半导体二极管(LD)作为泵浦源, 增益光纤选用 10/130  $\mu\text{m}$  的 Yb 掺杂光纤, 通过此结构来获得一个窄线宽的种子源。在预防阶段包含 976 nm 的半导体二极管(LD)作为泵浦源, 10/130  $\mu\text{m}$  的 Yb 掺杂光纤作为增益光纤, 通过隔离器(ISO)、模场适配器(MFA)以及光滤波器(CPS)与主放阶段进行连接。主放阶段采用单端泵浦结构, 通过(6+1) $\times$ 1 合束器将泵浦 LD(976 nm)以及经过预放阶段的信号光注入到主放大器中, 增益光纤的长度为 11 m, 尺寸为 20/400  $\mu\text{m}$ , 径增益光纤放大输出后与作为激光输出端的 20/400  $\mu\text{m}$  的石英输出端帽(QBH)相连石英输出端帽。至此, 对光栅选型来获得一个合适的窄线宽种子源, 通过一定长度的掺镱有源光纤来吸收剩余的泵浦功率, 并对信号光进行预防大, 提高进入主放大阶段前的功率, 来防止后续在放大过程中出现放大自发辐射(ASE)等非线性情况, 并增加结构的稳定。同时, 在预放大和主放大之间增加了隔离器(ISO)来防止后向光反向传输影响种子以及包层光剥除器(CPS)来处理掉主放阶段以剩余泵浦光为主的包层光, 进一步提高系统的稳定性。在主放阶段通过特殊结构设计来保证在放大过程中避免并减少受激布里渊散射(SBS)等非线性现象并提高光束质量, 最后在输出端增加一个包层光剥除器来进一步提高光束质量。通过上述结构, 最终获得了 3 路波长分别为 1055、1070、1085 nm 的 3.5 kW 级窄线宽光纤激光输出, 线宽为 0.3 nm, 光束质量  $M^2=1.5$ 。

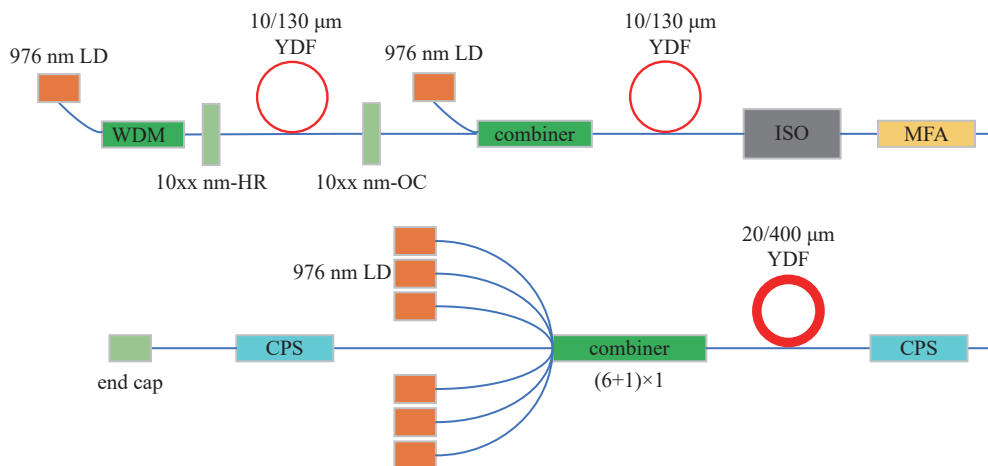


Fig. 2 Schematic diagram of the 3.5 kW narrow linewidth fiber laser

图 2 3.5 kW 窄线宽光纤激光器原理示意图

图 3 中为小角度入射下理想高陡度分光薄膜的设计光谱曲线, 从图中可以看出, 窄带透射滤光的效果, 在 1050~1064 nm 的波段达到 97% 以上的透射率, 在 1070 nm 波段反射率达到 99% 以上, 实现了截止分光的效果。

对镀膜后的双色镜进行损伤实验, 验证膜系的质量, 激光损伤测试光路图如图 4 所示。激光波长可在 1050~1080 nm 之间调制, 输入功率为 3.5 kW, 利用透镜将激光聚焦于测试样品。利用热像仪检测温升, 激光照射后用光学显微镜检查表面是否发生损伤。

图 5 给出了在抗损伤实验测试过程中, 热像仪观测到的双色镜膜系表面的温度变化情况, 以及显微镜观测的



膜系经过激光抗损伤实验后的表面形变结果。

通过对双色镜表面的截止滤光膜性能参数进行严格控制,对其散热进行独特排列,紧凑结构布局,通过该合成系统,3路参与合成的1055、1070、1085 nm激光光束,在功率为3.5 kW下进行光谱合成,最终合成功率为9650 W,合成效率为92%,光束质量 $M^2=1.7$ 。实验结果光谱如图6所示。

对合成后的光束进行分光处理,通过CCD采集经过弱化后的光束测得3路激光合成后的光束质量 $M^2=1.7$ ,最终合成光斑如图7(a)所示,不同功率下的光束质量如图7(b)所示。

对测得的数据进行拟合,最终得到合成功率随注入功率的变化情况以及相应的合成效率的变化情况,如图8所示,图8(a)为激光输出功率变化曲线,图8(b)为激光效率变化曲线,从功率变化曲线可以看出,在合成过程中,合成功率状态稳定,从效率曲线来看,合成效率从最开始逐渐升高,期间略有波动,最后合成效率有下降的趋势,造成该现象的原因是随着注入功率的逐渐增加,合成系统的整体热量在逐渐上升,镜片滤光膜表面温度升高,热效应在逐渐增加,导致滤光膜的表面形变或损坏,进而影响合成光斑的变化,致使总体的合成效率下降。若进一步提高滤光膜的热性能,可减轻因热效应引起的合成效率降低的问题。

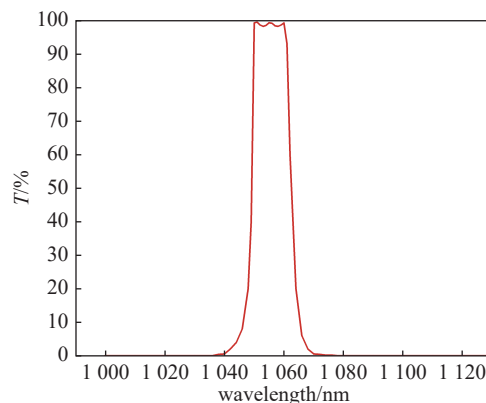


Fig. 3 Design spectrum of high steepness beam split films

图3 高陡度分光薄膜的设计光谱

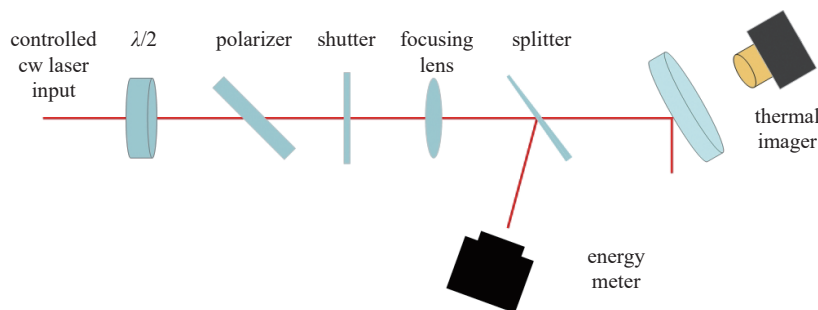


Fig. 4 Schematic diagram of the optical damage threshold test of coatings

图4 激光损伤阈值测试示意图

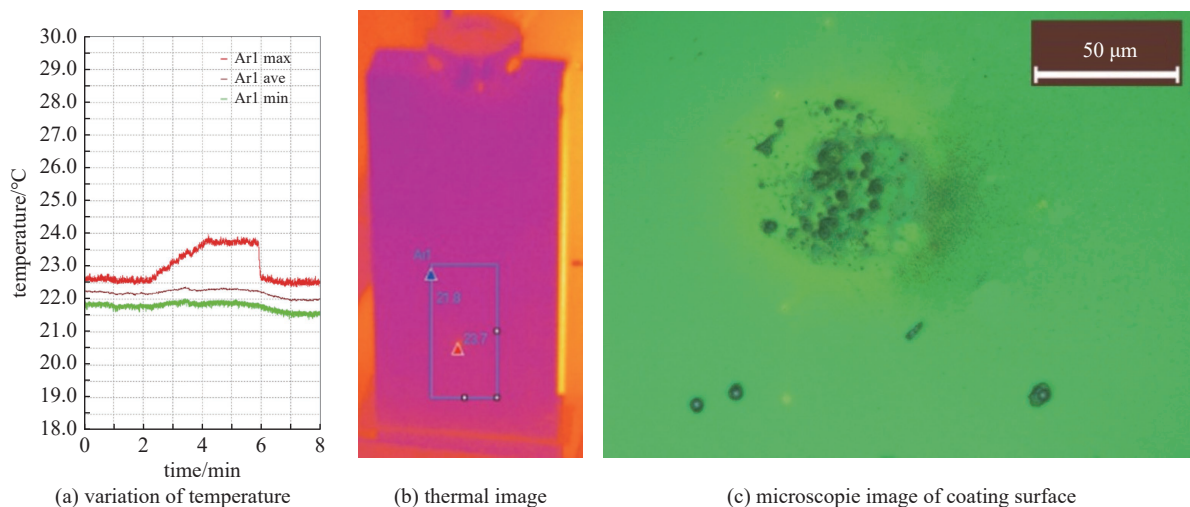


Fig. 5 Temperature variation on surface of the coatings and observations results

图5 温度变化情况以及显微镜下的观测结果

## 2 结论

通过采用基于双色镜的光谱合成方案,对参与合成的激光光束的性能参数进行严格设计,通过MOPA结构放大,获得3.5 kW级高功率窄线宽光纤激光输出。对系统中用于合成的双色镜表面膜系的设计以及损伤性能进行相关分析,选取高陡度截止滤光薄膜,设计了一款用于3路高功率窄线宽光纤激光光谱合成的紧凑型合成系统。

最终实现 1055、1070、1085 nm 三路子束合成输出, 功率为 9650 W, 合成效率为 92%, 光束质量  $M^2=1.7$ 。与目前报道的国内外有关双色镜合成的实验结果(见表 1)相比, 本实验获得的相关指标在保证高功率的同时具有良好的光束质量。

在合成过程中, 由于合成系统内部是个密闭空间, 虽然对杂散光进行了处理, 但部分反射光仍然对合成光路造成一定的影响; 镜片虽然有散热支架夹持, 但由于光功率较大, 对镜片产生热积累导致产生热透镜效应, 同时镜片表面的镀膜具有一定厚度, 在热积累情况下, 同样对光路传输具有一定的影响, 进而导致光束质量的退化。膜系受损同时导致反射率以及透过率降低, 杂散光增多, 合成系统内部温度升高, 进

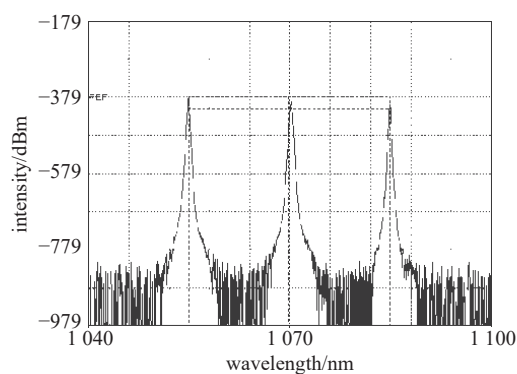
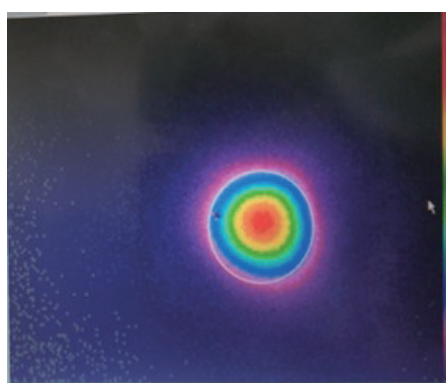
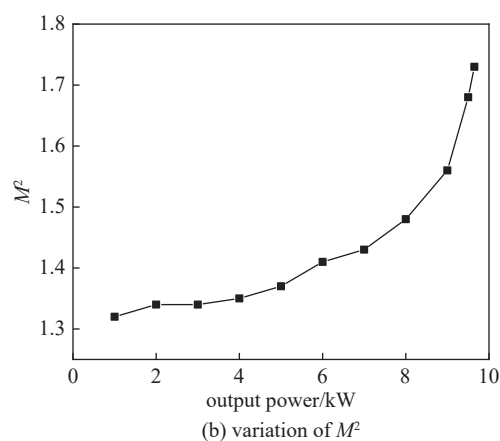


Fig. 6 Output laser spectrum

图 6 输出激光光谱



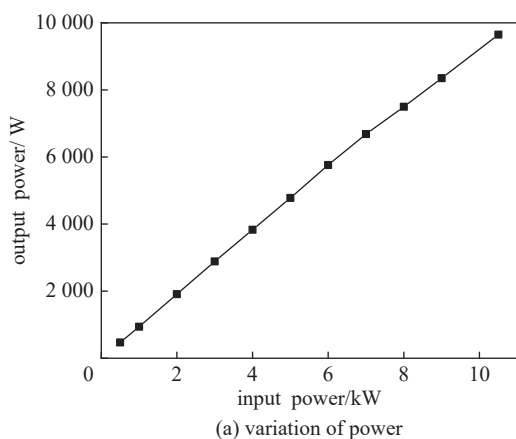
(a) laser spot at the highest output power



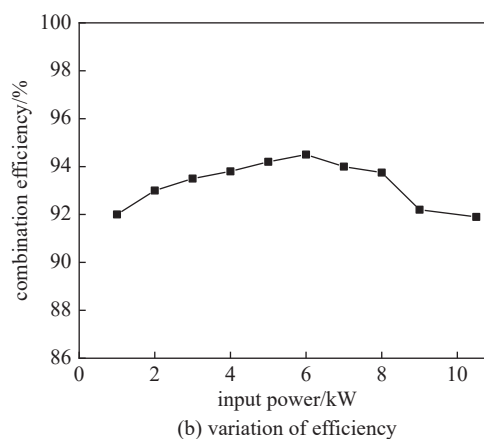
(b) variation of  $M^2$

Fig. 7 Output laser spot image and beam quality factor

图 7 最高输出功率下的激光光斑和不同功率下的光束质量



(a) variation of power



(b) variation of efficiency

Fig. 8 Variation of combined output power and combination efficiency

图 8 合成激光功率以及效率变化曲线

表 1 双色镜合成相关参数对比

Table 1 Comparison of parameters related to bicolor mirror combination

year	authors	power/kW	beam quality	combined efficiency/%
2015	Zhou Taidou et al	2.50	$M_x^2=4.21$ $M_y^2=2.83$	/
2016	Zhou Taidou et al	0.72	$M^2=1.54$	94
2019	K. Ludewight et al	5.90	$M^2=1.90$	/
2019	Ma Jun et al	10.25	$M_x^2 \approx 12.00, M_y^2 > 14.00$	98

而降低合成效率。为改善合成效率以及合成后的光束质量, 在提高合成子束单元质量的同时, 合成系统内部需增强对镜片散热的处理、提升镜片表面膜系的质量以及对杂散光进行更全面的吸收处理。

### 3 展 望

随着光纤工艺的进步以及高功率窄线宽激光器性能的提升以及薄膜制备技术的不断深入研究和提升, 解决热性能等关键技术得到进一步发展, 未来通过基于双色镜的光谱合成技术可以实现更高功率、更高效率以及更好光束质量的光谱合成输出。

#### 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] Zhou Pujun, Wang Xianliang, Xiao Huadong, et al. Review on recent progress on Yb-doped fiber laser in a variety of oscillation spectral ranges[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(5): 823-831.
- [3] Shi Wei, Schulzgen A, Amezcua R, et al. Fiber lasers and their applications: introduction[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): FLA1.
- [4] Buikema A, Jose F, Augst S J, et al. Narrow-linewidth fiber amplifier for gravitational-wave detectors[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(15): 3833-3836.
- [5] Zhu Jijian, Zhou Pu, Ma Yanxing, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18645-18654.
- [6] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, et al. Theoretical analysis of mode instability in high-power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1944-1971.
- [7] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [8] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Coherent polarization beam combination[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(8): 1191-1196.
- [9] 马鹏飞, 马阎星, 栗荣涛, 等. 8 kW 级光纤激光优质高效相干合成(简讯)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49: 20190577. (Ma Pengfei, Ma Yanxing, Su Rongtao, et al. High quality and efficient coherent combined of 8 kW fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49: 20190577)
- [10] Shekel E, Vidne Y, Urbach B. 16kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing[C]//Proceedings of SPIE 11260, Fiber Lasers XVII: Technology and Systems. 2020: 1126021.
- [11] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, et al. Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency, and brightness[C]//Proceedings of SPIE 8601, Fiber Lasers X: Technology, Systems, and Applications. 2012: 860115.
- [12] Von Elm R, Marois C. Beam-combiner for fiber-delivered laser-beams of different wavelengths: 9075237[P]. 2015-07-07.
- [13] Pan Hui. Lockheed Martin readies 60 kW fiber laser weapon for U. S. army[J]. *Fiber Optics & Communications: Monthly Newsletter Loving Domestic & International News on Fiber Optic Communications and Related Fields*, 2017, 40(3): 8-9.
- [14] Strecker M, Plötner M, Stutzki F, et al. Highly efficient dual-grating 3-channel spectral beam combining of narrow-linewidth monolithic cw Yb-doped fiber amplifiers up to 5.5 kW[C]//Proceedings of SPIE 10897, Fiber Lasers XVI: Technology and Systems. 2019: 108970E.
- [15] 郑也, 杨依枫, 赵翔, 等. 高功率光纤激光光谱合成技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44: 0201002. (Zheng Ye, Yang Yifeng, Zhao Xiang, et al. Research progress on spectral beam combining technology of high-power fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 0201002)
- [16] Zheng Ye, Zhu Zhanda, Liu Xiaoxi, et al. High-power, high-beam-quality spectral beam combination of six narrow-linewidth fiber amplifiers with two transmission diffraction gratings[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(30): 8339-8343.
- [17] 周泰斗, 梁小宝, 李超, 等. 基于透射型体布拉格光栅的两通道 2.5 kW 光谱组束输出[J]. *物理学报*, 2017, 66: 084204. (Zhou Taidou, Liang Xiaobao, Li Chao, et al. 2.5 kW average power, two-channel spectral-beam-combined output based on transmitting volume Bragg grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66: 084204)
- [18] Zhou Taidou, Liang Xiaobao, Li Chao, et al. Spectral beam combining of fiber lasers by using reflecting volume Bragg gratings[J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33: 124205.
- [19] Ludewigt K, Liem A, Stuhr U, et al. High-power laser development for laser weapons[C]//Proceedings of SPIE 11162, High Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects III. 2019: 1116207.
- [20] Ma Jun, Chen Fan, Wei Cong, et al. Modeling and analysis of the influence of an edge filter on the combining efficiency and beam quality of a 10-kW-class spectral beam-combining system[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9: 2152.