

万瓦级光纤激光双色镜合成技术*

奚小明¹⁾²⁾³⁾ 杨保来¹⁾²⁾³⁾ 王鹏¹⁾²⁾³⁾ 张汉伟¹⁾²⁾³⁾ 王小林¹⁾²⁾³⁾†韩凯¹⁾²⁾³⁾ 王泽锋¹⁾²⁾³⁾‡ 许晓军¹⁾²⁾³⁾ 陈金宝¹⁾²⁾³⁾

1) (国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

2) (国防科技大学南湖之光实验室, 长沙 410073)

3) (高能激光技术湖南省重点实验室, 长沙 410073)

(2023 年 4 月 23 日收到; 2023 年 6 月 19 日收到修改稿)

高功率光纤激光具有光束质量好、转换效率高、热管理方便和柔性传输等优势, 在工业加工和国防领域具有广泛的应用需求. 目前, 受限于光纤中的非线性效应和模式不稳定效应, 单链路光纤激光器输出功率的提升遇到了巨大挑战. 为突破单链路激光功率限制, 本文基于双色镜合成技术, 利用两路自研近单模宽谱光纤激光放大器实现了 10 kW 近单模合束激光输出, 合成效率约为 98.3%, 光束质量因子 M^2 约为 1.29. 为进一步提升功率, 采用三路宽谱激光实现了 13.52 kW 合束激光输出, 合成效率约为 96.8%, 光束质量因子 M^2 约为 1.61. 本文首次在实验上验证了双色镜合成技术的对宽谱激光的功率提升潜力和光束质量保持能力, 通过增加合成路数以及提高单路激光功率, 有望在保持高光束质量的情况下实现更高功率激光输出.

关键词: 高功率, 光纤激光器, 双色镜, 色谱合成**PACS:** 42.81.-i, 42.55.Wd, 42.55.Xi**DOI:** 10.7498/aps.72.20230657

1 引言

高功率光纤激光器具有电光转换效率高、光束质量好、热管理方便和柔性传输等优点, 在工业加工、生物医疗和国防军事等领域具有广泛的应用需求^[1-4]. 近年来, 随着双包层光纤技术和高亮度半导体激光泵浦源的应用和发展, 光纤激光器的输出功率得到了大幅度提升. 然而, 随着激光功率密度不断增大, 光纤中的受激拉曼散射、受激布里渊散射等非线性效应也变得越来越严重, 与模式不稳定效应一起已然成为光纤激光器功率提升的主要限制因素^[5,6]. 目前, 在多模光纤激光器方面, 虽然国内包括工程物理研究院、国防科技大学、华中科技大学

学等在内的多家单位在输出功率上也相继突破了 20 kW 量级^[7-9], 但由于所用的增益光纤和传能光纤的纤芯尺寸均较大, 且未对输出激光模式进行有效控制, 导致输出激光的光束质量表现不佳. 根据文献^[10]的报道, 近单模光纤激光器最高输出功率在过去很长一段时间基本没有进展.

光束合成技术能够实现多路激光的相干或者非相干叠加, 从而大幅度提升光纤激光器系统的输出功率. 作为光束合成技术的一种, 光谱合成技术通过利用棱镜、光栅或者双色镜等色散元件将不同频率(波长)的激光合束和进行共孔径输出^[11-13]. 该方法既能降低单链路激光功率的要求, 又能保持单链路激光良好的光束质量, 是一种提升输出激光功率的有效方法. 而双色镜主要通过镜片的前后

* 国家自然科学基金(批准号: 61905282, 62005315)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chinaphotonics@163.com

‡ 通信作者. E-mail: zefengwang_nudt@163.com

表面镀上不同的膜系, 分别实现两束不同波长激光的高反和高透. 通过膜系的设计和多组双色镜的组合, 可实现多路不同波长激光的合束^[14].

2018年, 美国密歇根大学 Regelskis 等^[15]利用双色镜方案实现了三路脉冲光纤激光器合成, 合成平均功率为 52 W, 脉冲能量为 1.9 mJ, 合成效率达到 90%. 2009年, 德国耶拿大学 Schmidt 等^[16]利用 3 个双色镜实现了四路脉冲激光的合束, 合成后输出平均功率 208 W, 脉冲能量 6.3 J. 2017年, 南京理工大学马骏课题组^[17]利用两路宽谱光纤激光进行双色镜合束, 单路激光器输出功率分别为 5.3 kW 和 4.9 kW, 光束质量 M^2 分别为 5.55 和 5.46, 最终实现了 10.12 kW 激光输出, 合成效率 98.9%. 由于所用的激光器是多模光纤激光器, 且合束镜较高的温升导致光束质量退化, 输出光束质量 $M^2 > 10$. 2021年, 国防科技大学何旭宝等^[18]基于双色镜方案实现了两路千瓦级窄线宽光纤激光合束, 输出功率 2.3 kW, 光束质量 M^2 约为 1.9, 合成效率大于 99%. 2022年, 国防科技大学杨保来等^[19]利用两路宽谱光纤激光进行双色镜合束, 实现了 8 kW 近单模输出, 光束质量 M^2 约为 1.5.

考虑到光纤激光器带宽以及色散元件制备工艺的限制, 为了保证合成效率和合成路数的要求, 当前大部分光谱合成和双色镜合成实验都是基于窄谱激光光源实现的. 通过适当放宽合成光源的光谱宽度和匹配高质量合成镜片, 采用宽谱光纤激光器和双色镜合成方案也是一种低成本高可靠性的技术途径. 本文通过对高功率光纤激光器模式和光谱进行有效控制, 在多个波长实现了近单模 5 kW 级高功率光纤激光输出. 并基于双色镜合成技术, 实现了两路自研宽谱近单模光纤激光放大器合成 10 kW 近单模激光输出, 合成效率约为 98%, 光束质量因子 M^2 约为 1.29. 为进一步提升功率, 采用三路激光实现了 13.52 kW 合束激光输出, 合成效率约为 96.8%, 光束质量因子为 M^2 约为 1.61. 实

验表明, 通过增加合成路数以及提高单路激光器的功率, 有望在保持高光束质量的情况下实现更高功率激光输出.

2 宽谱光纤激光放大器功率提升

为实现多路激光的双色镜合成, 首先对合成所需要的光源 (多波长高功率光纤激光器) 的功率提升进行研究. 如图 1 所示, 单路光源的搭建采用主振荡功率放大 (MOPA) 结构, 由种子级和放大级两部分组成. 众所周知, 目前高功率光纤激光器的功率提升受限于光纤中的非线性效应和模式不稳定效应 (TMI). TMI 效应主要是由于光纤中的热致瑞利散射导致基模 (LP_{01}) 和高阶模之间的能量耦合, 其中最为重要的表象就是输出功率的滞涨和光束质量的退化. 为了提升光纤激光器的 TMI 阈值, 采用中心波长为 981 nm 的泵浦源对激光器进行泵浦. 与常规 976 nm 或者 915 nm 泵浦源不同, 981 nm 泵浦源通过降低有源光纤单位长度的热负载, 能够显著提升光纤激光器的 TMI 阈值^[20].

对于两路合束而言, 色谱合束装置中只需要一片双色镜, 根据双色镜的透射曲线, 两路激光器 (Laser 1 和 Laser 2) 的中心波长选定为 1065 nm 和 1080 nm. 如图 1 所示, Laser 1 和 Laser 2 的激光器结构相同, 均采用双向泵浦 MOPA 结构. 增益光纤为 25/400 μm 掺镱双包层光纤 (YDF), 前后泵浦光分别通过一个 (6+1) \times 1 泵浦/信号合束器 (combiner) 注入到增益光纤中, 合束器的输入输出信号纤为 25/400 μm 和 25/250 μm , 泵浦臂尾纤尺寸为 220/242 μm . 放大器产生的激光经包层光剥除器 (CLS) 后从光纤端帽 (QBH) 输出. 对于 Laser 1 而言, 通过对前后向泵浦功率配比以及增益光纤弯曲半径的优化 (最小弯曲半径约为 8 cm), 实现了 4.83 kW 的信号光输出, 最高输出功率时的光谱如图 2 所示. 输出激光的中心波长

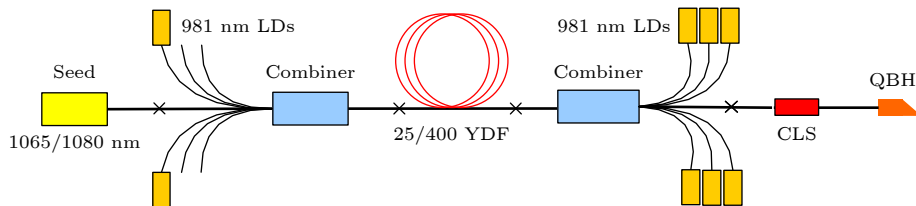


图 1 光纤激光放大器结构示意图

Fig. 1. Schematic of the fiber amplifiers.

为 1064.24 nm, 3 dB 和 20 dB 带宽分别为 5.27 nm 和 18.78 nm, 最高功率时的受激拉曼散射 (SRS) 抑制比约为 33 dB. 最高功率时测得两个方向上的光束质量 M^2 分别约为 1.17 和 1.28.

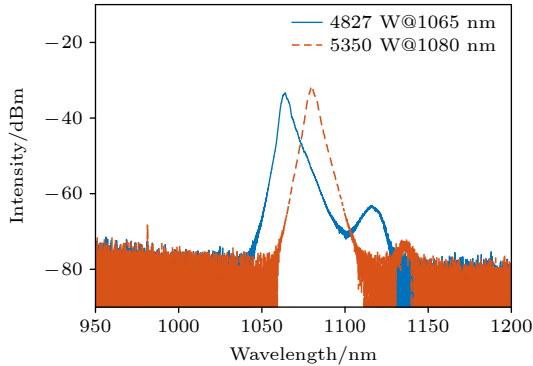


图 2 两路合束实验中激光器在最高输出功率时的光谱
Fig. 2. Optical spectra of the fiber amplifiers at the maximum output power for the dual-beam combination experiment.

对于 Laser 2 而言, 泵浦源和增益光纤同样采用 981 nm 半导体激光二极管 (LD) 和 25/400 μm 双包层掺镱光纤, 利用双向泵浦最高输出功率达到 5.35 kW, 测得中心波长为 1080.3 nm, 3 dB 和 20 dB 带宽分别为 4.61 nm 和 19.54 nm, 最高功率时的 SRS 抑制比为 32 dB. 最高功率时测试得到光束质量 M^2 分别约为 1.29 和 1.36.

三路激光合束实验需要用到两片不同的双色镜 (见后文图 8). 考虑到双色镜的透反曲线, 在两路激光合束实验的基础上对激光器的中心波长进行调整. 三路激光合束实验的光源 (Laser 3, Laser 4 和 Laser 5) 的中心波长分别为 1050 nm, 1069 nm 和 1085 nm. 对于 Laser 3 而言, 激光的中心波长比较接近镱离子的自发辐射峰, 需要特别注意激光器中的自发辐射效应 (ASE) 和 SRS 效应. 因此, 如图 3 所示, 为了控制激光器的非线性效应, 采用 976 nm 稳波长 LD 作为泵浦源, 从而大幅缩短种子和放大级光纤的长度, 并通过采用纯后向泵浦结构设计, 以获得较高的 TMI 和 SRS 阈值. 如图 4 所示, Laser 3 在最高功率 3.52 kW 时的中心波长为 1050.5 nm, 拉曼抑制比约 30 dB, 3 dB 带宽 3.89 nm. 最高功率时的光束质量 M^2 约为 1.32 和 1.21

Laser 4 和 Laser 5 沿用了两路合成实验中的光纤放大级, 只是对种子进行了更换. Laser 4 在最高功率为 4.83 kW 时的光光效率为 83.6%, 中心波长

为 1069.7 nm, 3 dB 和 20 dB 带宽分别为 5.42 nm 和 21.7 nm, 最高功率时的 SRS 抑制比为 31.5 dB. 最高功率时测试得到光束质量为 1.20/1.21. Laser 5 在最高功率为 5.33 kW 时的中心波长为 1085.7 nm, 3 dB 和 20 dB 带宽分别为 3.44 nm 和 20.9 nm, 最高功率时的 SRS 抑制比为 38.5 dB, 最高功率时测试得到光束质量 M^2 分别约为 1.19 和 1.26.

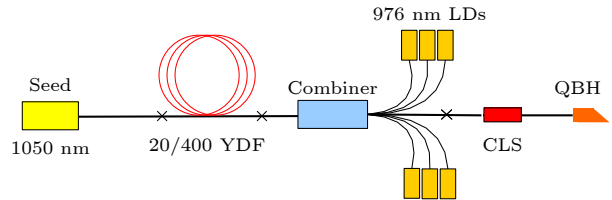


图 3 1050 nm 光纤激光放大器结构示意图
Fig. 3. Schematic of the 1050 nm fiber amplifier.

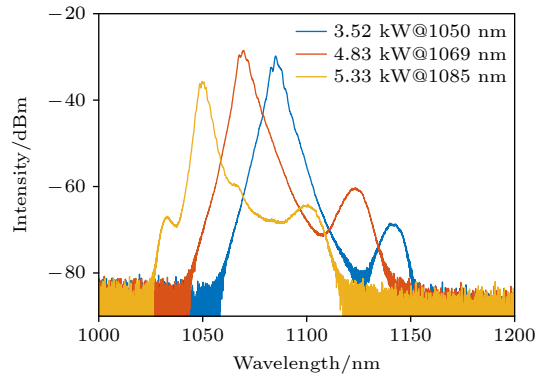


图 4 三路合束实验中单路激光器最高功率时的光谱
Fig. 4. Optical spectra of the fiber amplifiers for the three-beam combination experiment.

3 两路宽谱激光色谱合束实验研究

两路激光合束实验的实验结构见图 5, 合束系统包括双色镜 (DM), 准直器 (CO)、光源 Laser 1 和 Laser 2, 以及高反镜 M1 和 M2. 装置中, Laser 1 输出激光通过准直器 (CO) 后经 M1 反射, 并入射到 DM 的前表面. 双色镜 (DM) 能够实现 Laser 1 激光的高反以及 Laser 2 激光的高透, 从而实现两路激光的合成. 合束后的激光到达 M2 后, 绝大部分激光被反射, 并利用扩束镜对其扩束, 扩束后的激光利用功率计进行功率测量. 少部分透射的激光利用光束质量测量仪 (LQM) 对其进行光束质量测量. 通过精密调节高反镜和双色镜的反射角度, 可以实现两路激光光瞳和光轴的重合, 即完成两路激光的合束.

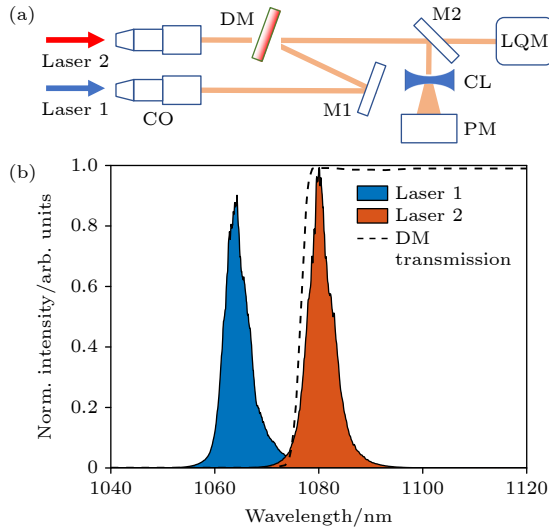


图 5 (a) 两路激光合束装置示意图和 (b) 双色镜透射曲线 (CL, 凹透镜; PM, 功率计)

Fig. 5. (a) Schematic diagram of the dual-beam combining setup; (b) transmission curve of the dichromatic mirror (CL, concave lens; PM, power meter).

实验采用中国科学院光电技术研究所提供的双色镜作为合束镜片. 为了降低镜片的热效应, 选择高纯度白宝石作为基片, 基片的吸收率约为 400 ppm ($1 \text{ ppm} = 10^{-6}$). 采用磁控溅射法在基片两面分别镀有高透膜和透反膜. 膜系在透射和反射波段的吸收率分别约为 200 ppm 和 50 ppm. 镜片的透过率曲线如图 5(b) 所示, 双色镜的透射截止波长在 1079 nm 附近, 透过率曲线的陡度 (从 99% 下降至 0.1% 的光谱宽度) 约为 11 nm. Laser 1 和 Laser 2 的中心波长约为 1065 nm 和 1080 nm. 这两个波长对应的透射率分别为 0.01% 和 99.8%. 对于 Laser 1, 一部分位于长波方向的激光由于超过了透射截止波长, 这部分激光将会被双色镜反射, 而对于 Laser 2 而言, 部分短波的激光成分将会经双色镜透射而泄漏. 对于合束系统来说, 这两部分激光将作为废光, 无法被利用. 因此合束系统的合束效率可以定义为

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \times 100\%. \quad (1)$$

若忽略双色镜的吸收和高反镜的透射等其他损耗, 色谱合束系统的合成效率也可写为

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} = 1 - \frac{P_{\text{leak}}}{P_{\text{output}}} \times 100\%,$$

其中 η 为合成效率, P_{input} 为合束系统注入的激光总功率, P_{output} 为合束系统输出的总功率, P_{leak} 为合束镜片泄漏的激光总功率.

用于合束的光源为两路自研的 5 kW 级近单模光纤激光放大器. 其中, Laser 1 和 Laser 2 的中心波长分别为 1065 nm 和 1080 nm, 3 dB 线宽分别为 5.27 nm 和 4.61 nm. 两路激光的线性归一化光谱以及双色镜的透射曲线如图 5(b) 所示. 合成后的功率、效率以及光谱如图 6 所示, 在两路激光输出功率分别为 4.83 kW 和 5.35 kW 时, 合束后输出功率达到 10.01 kW, 泄漏光功率约为 170 W. 最高功率时合成效率约为 98.3%. 如图 7 所示, 实验测得单路光源以及合束激光的光束质量因子 M^2 分别为 1.23, 1.33 和 1.29. 可以看出合束系统保持了输入光源近单模的光束质量特性.

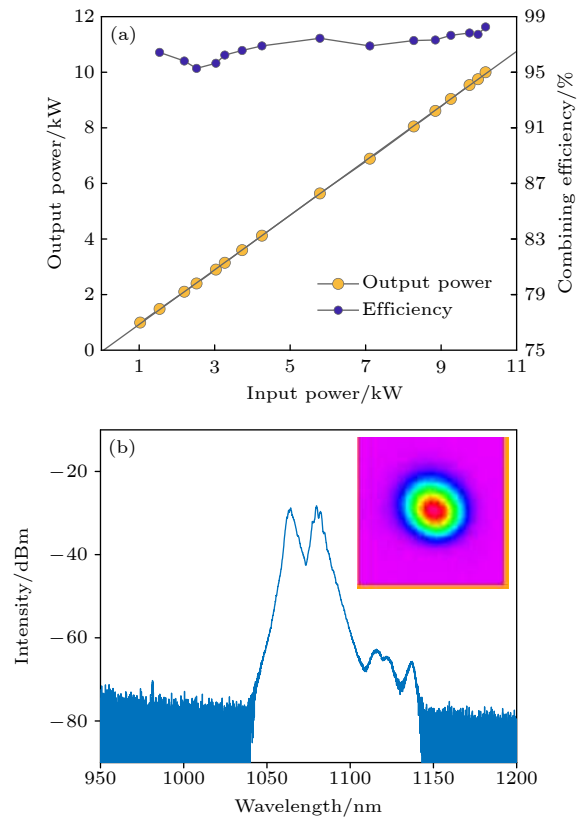


图 6 两路合成实验结果 (a) 功率与效率; (b) 合成输出光谱和光斑

Fig. 6. Results of the dual-beam combining experiment: (a) Optical power and combining efficiency; (b) output spectrum and beam profile.

4 三路宽谱激光色谱合束实验研究

为验证色谱合束系统的扩展性和功率提升能力, 在两路激光色谱合束实验的基础上将合束系统扩展到三路. 如图 8 所示, 合束系统包括双色镜 DM1 和 DM2, 光源 Laser 3, Laser 4 和 Laser 5,

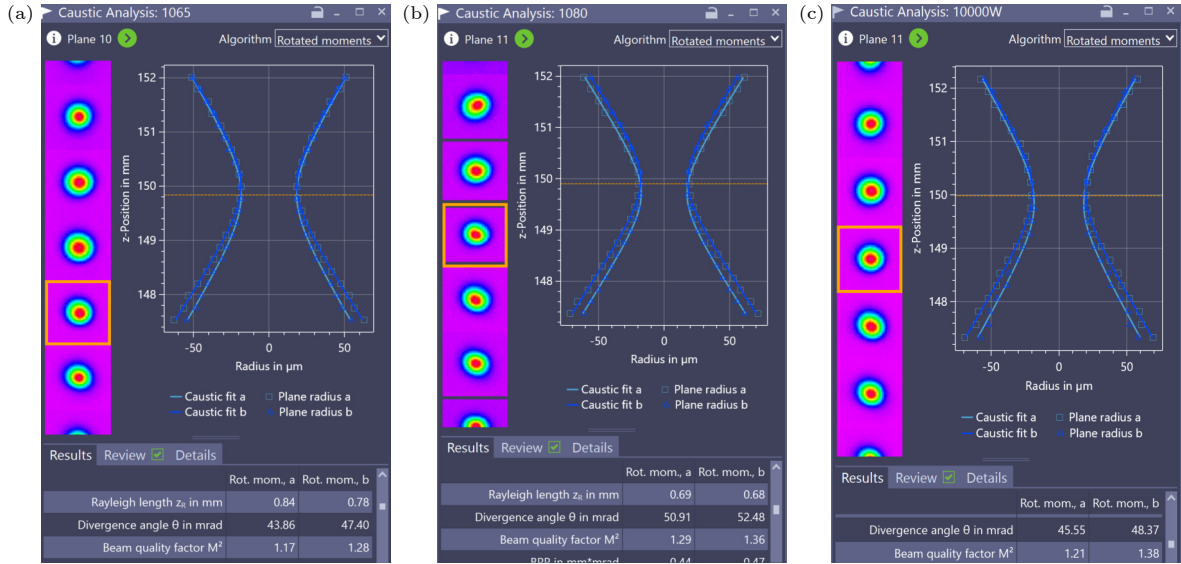


图 7 两路合束系统中单路 (a), (b) 和合束后 (c) 激光的光束质量测量结果

Fig. 7. Measured beam quality of the (a), (b) fiber amplifiers and the (c) dual-beam combined laser.

以及高反镜 M1, M2 和 M3. 利用 DM1 实现 Laser 3 和 Laser 4 的合成, 合成后的激光再利用 DM2 实现与 Laser 5 的合成. 考虑到双色镜透射截止波长以及对合成效率的影响, 将 Laser 4 的中心波长设置为两条曲线的中间 (~ 1069 nm), 短波 (Laser 3) 和长波 (Laser 5) 光源的中心波长在两路合成实验的基础上尽量拉开与 Laser 4 的距离, 确定了单路激光的中心波长分别为 1050 nm, 1069 nm 和 1085 nm.

当三路激光器满功率输出时, 测得的输出功率分别为 3.52 kW, 4.83 kW 和 5.33 kW. 如图 9 所示, 在最高功率时, 三路激光器在 x 和 y 两个方向上的光束质量分别为 1.32/1.21@1050 nm, 1.20/1.21@1069 nm 以及 1.19/1.26@1085 nm. 通过三路色谱合成系统后, 最高输出功率为 13.52 kW, 测得光束质量约为 1.50/1.71. 三路合成后的光谱和光束质量如图 10 所示. 此时, 两个双色镜泄漏的光功率约为 443 W, 根据 (1) 式计算得到合成效率约为 96.8%. 由于镜片镀膜工艺的限制以及双色镜透反曲线和激光器光谱的不匹配, 功率加载过程中, 两个合束镜片均存在一定的温升, 并在 14 min 后接近热平衡. DM1 和 DM2 的最高温度分别为 35.9 °C 和 34.4 °C. 得益于镜片较小的温度梯度 (中心-边沿温度差约 3 °C), 合成激光在出光的 30 min 内光束质量几乎保持不变.

由此可以看出, 利用宽谱激光作为光源进行色谱合束能够满足高效合束的需求, 且合束后的光束能够保持入射激光高光束质量的特性. 虽然在合成

路数和合成效率方面, 窄谱激光光源具有一定的优势, 但由于非线性效应和模式不稳定效应的限制, 窄谱光纤激光的功率提升难度要比宽谱激光大得多. 因此, 利用宽谱激光进行合束可以显著提升合束输出功率的同时大大降低系统研制难度.

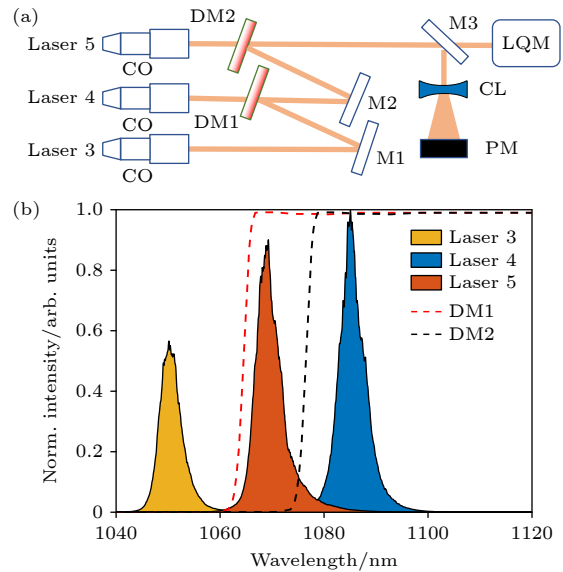


图 8 (a) 三路激光合束装置示意图; (b) 三路激光光谱以及双色镜的透射曲线

Fig. 8. (a) Schematic of the three-beam combining setup; (b) beam spectra and transmission curve of the dichromatic mirrors.

进一步提升输出功率的途径主要包括提高单路激光器的功率和增加合成路数. 分析认为两者都面临较大的难度. 一方面, 受限于模式不稳定导致

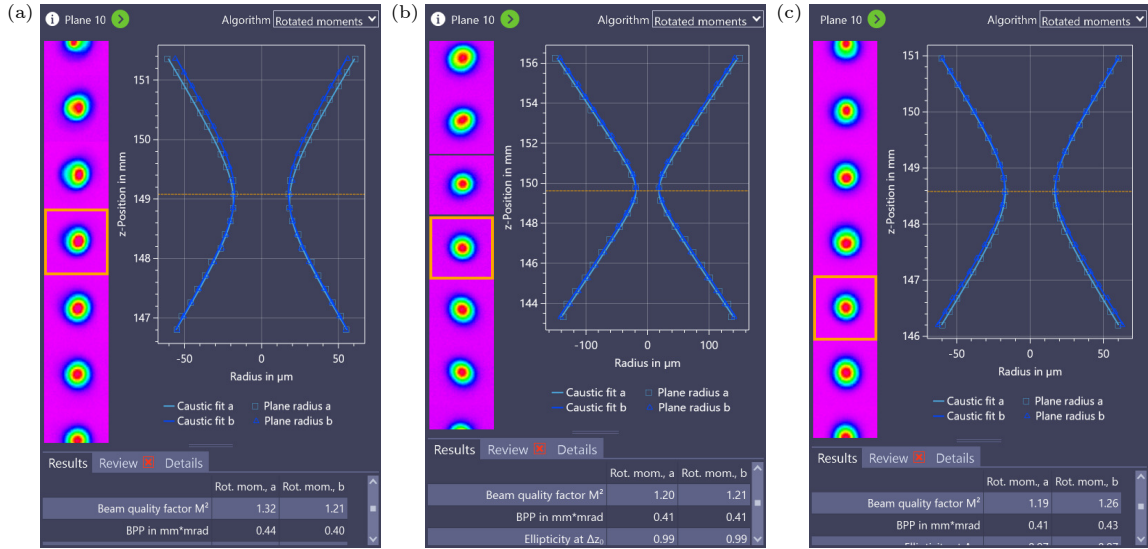


图9 单路激光光束质量测量结果 (a) 1050 nm; (b) 1069 nm; (c) 1085 nm

Fig. 9. Measured beam quality of the pre-combining lasers: (a) 1050 nm; (b) 1069 nm; (c) 1085 nm.

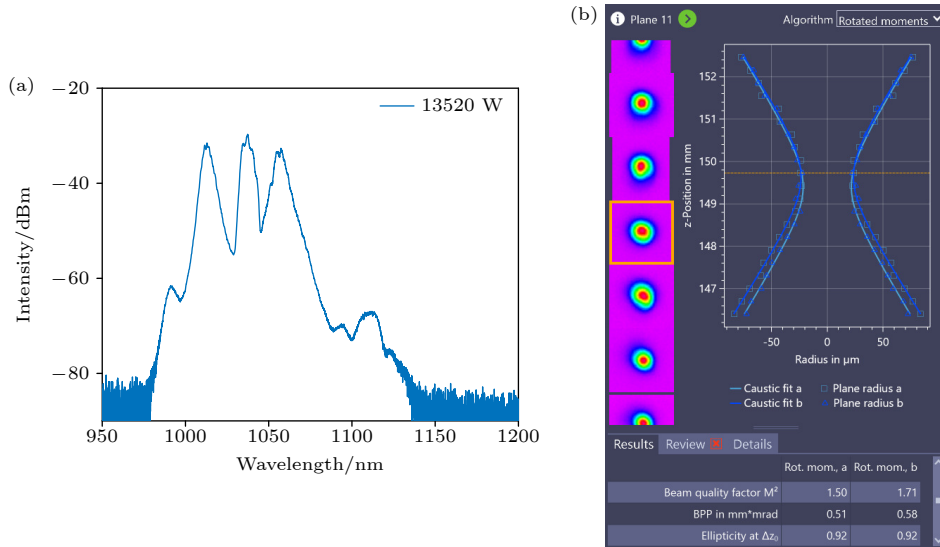


图10 三路合束激光的 (a) 光谱和 (b) 光束质量

Fig. 10. Optical spectrum (a) and beam quality (b) of the three-beam combined laser.

的功率滞涨和非线性效应导致的光谱展宽. 另一方面, 更多路数的合成给系统的稳定性和可靠性提出了更高的要求. 同时新增的短/长波激光在功率提升方面也存在一定难度. 但是也可看出, 这两种措施是不同维度的举措, 可以共同作用. 因此, 也可认为本方案在提升合成激光输出功率方面还存在较大的空间.

5 结论

本文采用双色镜色谱合成技术, 基于两路自研的近单模宽谱光纤激光放大器实现了 10 kW 近单

模激光合成输出. 两路激光的中心波长分别为 1065 nm 和 1080 nm, 合成激光的光束质量因子 M^2 约为 1.29, 合成效率约为 98.3%. 在此基础上, 本文还探究色谱合成方案的扩展能力, 并采用三路自研宽谱光纤激光实现了 13.52 kW 合束激光输出, 三路激光的中心波长分别为 1050 nm, 1069 nm 和 1085 nm, 合成激光的光束质量因子 M^2 约为 1.61, 合成效率约为 96.8%. 最高功率时合束镜片温升约为 14 $^{\circ}\text{C}$. 实验结果表明, 基于宽谱激光的双色镜合成装置简单、鲁棒性强, 无需复杂的控制电路和精密的光学装校, 且在保持光束质量不退化的情况

下能够实现较高的合成效率. 选择宽谱激光作为光源进行合束, 也大大降低了对光源研制的要求, 提升了合成激光的功率. 通过增加合成路数以及提高单路激光器的功率, 有望在保持高光束质量的情况下实现更高功率激光输出.

参考文献

- [1] Nilsson J, Payne D 2011 *Science* **332** 921
- [2] Shi W, Fang Q, Zhu X, Norwood R A, Peyghambarian N 2014 *Appl. Opt.* **53** 6554
- [3] Zervas M N 2014 *Inter. J. Mod. Phys. B* **28** 1442009
- [4] Richardson D, Nilsson J, Clarkson W A 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 63
- [5] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, Stutzki F, Jansen F, Otto H J, Schmidt O, Schreiber T, Limpert J, Tünnermann A 2011 *Opt. Express* **19** 1321
- [6] Smith A V, Smith J J 2011 *Opt. Express* **19** 10180
- [7] Xiao H, Pan Z Y, Chen Z L, Xi X M, Huang L J, Wang M, Yang H, Yan Z P, Leng J Y, Wang X L, Wang Z F, Zhou P, Xu X J, Chen J B 2022 *Chin. J. Lasers* **49** 1616002 (in Chinese) [肖虎, 潘志勇, 陈子伦, 奚小明, 黄良金, 王蒙, 杨欢, 闫志平, 冷进勇, 王小林, 王泽峰, 周朴, 许晓军, 陈金宝 2022 中国激光 **49** 1616002]
- [8] Lin A X, Xiao Q R, Ni L, Li D, Peng K, Qi T C, Yu J, Tian J D, Leng X X, Wu Y L, Wang X L, Wang L L, Dai X J, Xiang H, Yan P, Gong M L 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 0916003 (in Chinese) [林傲祥, 肖起榕, 倪力, 李丹, 彭昆, 齐天澄, 俞娟, 田佳丁, 冷晓晓, 吴与伦, 王小龙, 王乐乐, 戴晓军, 向恒, 闫平, 巩马理 2021 中国激光 **48** 0916003]
- [9] Li F Y, Li Y, Song H Q, Yi Y Q, Chu Q H, Zhang H Y, Huang S, Guo C, Shu Q, Yan D L, Tao R M, Huang Z M, Pang L, Shen Y Z, Shi Y, Gao C, Liu N, He H L, Li Y W, Liu Y, Wu W J, Wang Q H, Wen J, Wang Z, Lin H H, Wang J J, Jing F 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 2116002 (in Chinese) [李峰云, 黎玥, 宋华青, 衣永青, 楚秋慧, 张昊宇, 黄珊, 郭超, 舒强, 颜冬林, 陶汝茂, 黄智蒙, 庞璐, 沈一泽, 史仪, 高聪, 刘念, 贺红磊, 李雨薇, 刘珂, 吴文杰, 王旗华, 温静, 汪卓, 林宏奂, 王建军, 景峰 2021 中国激光 **48** 2116002]
- [10] Wang Y, Chen G, Li J 2018 *High Power Laser Sci. Eng.* **6** 40
- [11] Zheng Y, Yang Y F, Zhao X, Gong W C, Bai G, Zhang J P, Liu K, Chen X L, Zhao C, Qi Y F, Jin Y X, He B, Zhou J 2017 *Chin. J. Lasers* **44** 0201002 (in Chinese) [郑也, 杨依枫, 赵翔, 公维超, 柏刚, 张璟璞, 刘恺, 陈晓龙, 赵纯, 漆云凤, 晋云霞, 何兵, 周军 2017 中国激光 **44** 0201002]
- [12] He X B, Xi X M, Zhang H W, Wang X L, Xu X J 2021 *Laser Optoelectron. Prog.* **58** 0900004 (in Chinese) [何旭宝, 奚小明, 张汉伟, 王小林, 许晓军 2021 激光与光电子学进展 **58** 0900004]
- [13] Mu R X, Zhang J, Long J Y, Li G, Bu Y H, Han Y F, Shou S J 2022 *J. Appl. Opt.* **43** 792 (in Chinese) [穆让修, 张佳, 龙井宇, 李刚, 卜英华, 韩耀锋, 寿少峻 2022 应用光学 **43** 792]
- [14] Xu X J, Han K, Liu Z J, Wang X L, Ma Y X, Zhang X Z, Ning Y, Zhou P 2019 CN Patent 105762632B (in Chinese) [许晓军, 韩凯, 刘泽金, 王小林, 马阎星, 张恒焜, 宁禹, 周朴 2019 CN 105762632B]
- [15] Regelskis K, Hou K, Raciukaitis G, Galvanauskas A 2008 *Conference on Lasers and Electro-Optic San Jose, USA, May 4–9, 2008* p1
- [16] Schmidt O, Wirth C, Nodop D, Limpert J, Schreiber T, Peschel T, Eberhardt R, Tünnermann A 2009 *Opt. Express* **17** 22974
- [17] Chen F, Ma J, Wei C, Zhu R, Zhou W, Yuan Q, Pan S, Zhang J, Yize W, Dou J 2017 *Opt. Express* **25** 32783
- [18] He X B, Xiao H, Ma P F, Zhang H W, Wang X L, Xu X J 2021 *Infrared Laser Eng.* **50** 20200385 [何旭宝, 肖虎, 马鹏飞, 张汉伟, 王小林, 许晓军 2021 红外与激光工程 **50** 20200385]
- [19] Yang B L, Wang P, Zhang H W, Xi X M, Wang X L, Shi C, Xu X J, Chen J B 2022 *Chin. J. Lasers* **49** 0816001 [杨保来, 王鹏, 张汉伟, 奚小明, 王小林, 史尘, 许晓军, 陈金宝 2022 中国激光 **49** 0816001]
- [20] Yang B L, Wang P, Zhang H W, Xi X M, Shi C, Wang X L, Xu X J 2021 *Opt. Express* **29** 26366

Over 10-kW fiber laser spectral beam combination based on dichromatic mirrors^{*}

Xi Xiao-Ming¹⁾²⁾³⁾ Yang Bao-Lai¹⁾²⁾³⁾ Wang Peng¹⁾²⁾³⁾ Zhang Han-Wei¹⁾²⁾³⁾
Wang Xiao-Lin¹⁾²⁾³⁾† Han Kai¹⁾²⁾³⁾ Wang Ze-Feng¹⁾²⁾³⁾‡
Xu Xiao-Jun¹⁾²⁾³⁾ Chen Jin-Bao¹⁾²⁾³⁾

1) (*College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

2) (*Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

3) (*Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 23 April 2023; revised manuscript received 19 June 2023)

Abstract

Owing to the advantages of good beam quality, high conversion efficiency, convenient thermal management and compact structure, high power fiber lasers have been widely desired in industrial processing. So far, the output power has been strictly limited by the nonlinear effects and transverse mode instability. In order to break through the power limitation, here we experimentally demonstrate a power boosting technology called spectral beam combination based on dichromatic mirrors. Firstly, high power fiber amplifiers with different central wavelengths are established for the spectral combination. Secondly, utilizing a dual-beam combined system and two homemade high power fiber amplifiers, an output power of 10 kW is achieved, with a remarkable combination efficiency of 98.3% and a beam quality of $M^2 \sim 1.33$. Secondly, using a three-beam combined system, an output power of 13.5 kW is obtained with a combination efficiency of 96.8% and beam quality of $M^2 \sim 1.61$. By increasing the number of input beams and their output power as well, we believe that a higher output power can be achieved based on dichromatic mirror spectral beam combination.

Keywords: high power, fiber laser, dichromatic mirror, spectral beam combination

PACS: 42.81.-i, 42.55.Wd, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.72.20230657

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61905282, 62005315).

† Corresponding author. E-mail: chinaphotonics@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: zefengwang_nudt@163.com



万瓦级光纤激光双色镜合成技术

奚小明 杨保来 王鹏 张汉伟 王小林 韩凯 王泽锋 许晓军 陈金宝

Over 10-kW fiber laser spectral beam combination based on dichromatic mirrors

Xi Xiao-Ming Yang Bao-Lai Wang Peng Zhang Han-Wei Wang Xiao-Lin Han Kai Wang Ze-Feng
Xu Xiao-Jun Chen Jin-Bao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 184203 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230657

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230657>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

国产光纤实现同带抽运3000 W激光输出

3000 W tandem pumped all-fiber laser based on domestic fiber

物理学报. 2018, 67(2): 024205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171676>

高功率垂直外腔面发射半导体激光器增益设计及制备

Design of gain region of high-power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser and its fabrication

物理学报. 2020, 69(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191787>

高功率宽带射频调制连续激光源

High-power wideband radio-frequency intensity modulated continuous wave laser

物理学报. 2018, 67(3): 034203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172017>

基于氧化石墨烯的瓦级调Q锁模Tm: LuAG激光器

Watt-level passively Q-switched mode-locked Tm: LuAG laser with graphene oxide saturable absorber

物理学报. 2019, 68(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182224>

光纤激光器中包层功率剥离器散热性能的优化

Optimization of thermal performance of cladding power stripper in fiber laser

物理学报. 2020, 69(1): 014204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191093>

激光二极管直接后向泵浦的高光束质量万瓦光纤激光器

Laser diode directly backward pumped high-beam-quality 10-kW fiber laser

物理学报. 2022, 71(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221433>