

激光与光电子学进展

基于二向色镜的高功率激光组束实验研究

郑也^{***}, 何苗, 刘小溪, 马梓洋, 陈建华, 于淼, 李思源, 曹懿, 王军龙^{**}, 王学锋^{*}

北京航天控制仪器研究所, 北京 100094

摘要 开展了基于二向色镜的三路高功率激光组束实验研究, 将中心波长分别为 1059、1075、1090 nm 的 4 kW 近单模光纤激光器进行组束, 实现了 11.34 kW 的激光输出, 组束效率超过 95%。随着输出功率的提升, 二向色镜温升越来越高, 光束质量相较于子光束呈现逐步退化的趋势, 当满功率时, 组束激光在两个方向的光束质量分别为 $M^2_x=2.941$ 和 $M^2_y=3.183$ 。分析了影响组束效率和光束质量的原因, 并对二向色镜基底厚度对光束质量的影响规律进行了实验研究, 为进一步优化组束激光的光束质量提供重要参考。

关键词 激光器与激光光学; 光纤激光器; 二向色镜; 激光组束; 光束质量

中图分类号 TN012 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221900

Experimental Study on High-Power Laser Beam Combining Using Dichroic Mirrors

Zheng Ye^{***}, He Miao, Liu Xiaoxi, Ma Ziyang, Chen Jianhua, Yu Miao, Li Siyuan, Cao Yi, Wang Junlong^{**}, Wang Xuefeng^{*}

Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China

Abstract In this study, we experimentally investigate high-power laser beam combining based on dichroic mirrors. Three-channel 4 kW nearly single mode fiber lasers with central wavelengths of 1059, 1075, and 1090 nm are combined to a single beam. The combined power reaches 11.34 kW with a combining efficiency of 95%. Compared with the sub beam, the beam quality of the combined laser shows gradual degradation as the output power increases and the surface temperature of the dichroic mirror rises. When the full power is reached, the beam quality degrades to $M^2_x=2.941$ and $M^2_y=3.183$ in both directions. The reasons that affect the combining efficiency and beam quality are analyzed. The effect of substrate thickness of the dichroic mirror on the degradation of beam quality is experimentally studied. This provides an important reference for further optimizing the combined beam quality.

Key words laser and laser optics; fiber laser; dichroic mirror; laser beam combining; beam quality

1 引言

近年来, 工业制造及国防等领域对高功率高光束质量的激光光源都提出了迫切需求^[1-3]。光纤激光器是目前应用最多的高功率激光光源, 但是, 受限于非线性效应、热效应、端面损伤、模式不稳定等因素, 单纤单模激光输出功率存在理论极限^[4-5]。光谱组束是一种通过色散光学元件将多束激光进行共孔径组合的技术, 相比于相干组束, 牺牲了一定的光谱纯度, 但是对于子光束的波长、线宽、偏振态等参数要求较低, 具有结构简单、阵列扩展性强等优点, 被认为是突破单纤功率

上限、获得更高功率输出激光的有效技术路线^[6-8]。

可用于光谱组束的光学元件主要有棱镜、衍射光栅以及二向色镜。其中, 以衍射光栅为色散元件的光谱组束是研究最为广泛的光谱组束方案, 已经实现了数十千瓦至数百千瓦的输出功率^[9-11]。然而, 基于衍射光栅的光谱组束也存在着一定缺点: 一是对子束激光的线宽要求较高, 限制单束激光的功率; 二是组束光路所需的空间较大, 不利于系统集成; 三是衍射光栅对环境要求较高, 易于损坏, 维修性较差。基于二向色镜的光谱组束是利用镀膜特性, 允许在一定带宽的激光高效率透射, 其他波长的激光高效率反射, 从而实现

收稿日期: 2022-06-02; 修回日期: 2022-06-24; 录用日期: 2022-06-30; 网络首发日期: 2022-07-10

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U20B2058)

通信作者: *xuefeng.wang@sina.cn; **wjl_casc@126.com; ***zhengye.no1@163.com

多路激光合束。二向色镜组束可将子束激光的线宽要求放宽至数个纳米,所需光学元件数量较少、光路排布方便、结构紧凑、易于集成。随着镀膜技术的发展,二向色镜的功率承受能力、陡峭度等性能大幅提升,可满足数千瓦至数万瓦级激光的合束,作为衍射光栅组束的完美替代,应用于机动灵活的作战场景^[12]。

国外研究人员开展了一系列高功率二向色镜组束的研究工作^[13-16],2008年,Regelskis等^[13]研究了三路脉冲光纤激光器的光谱组束,实现了52 W的输出功率,脉冲能量达到1.9 mJ,组束效率超过90%,且单个激光通道的光束质量得到了保留;2009年,Schmidt等^[14]采用干涉滤光片实现四路脉冲光纤放大器的光谱组束,输出平均功率为208 W,脉冲能量为6.3 mJ,由于双色镜基底的吸收温升,导致光束质量 M^2 从单路的1.2退化到2.3;2015年,Shah等^[15]采用两块二向色镜对三路掺铥光纤激光器进行了组束,实现了225 W的输出功率,组束效率为89%,组束激光的光束质量 $M^2 < 2$,相较于子束出现了一定的退化,并指出WMS-15基底材料的热透镜效应是导致光束质量退化的原因;2019年,Ludewigt等^[16]采用两块二向色镜实现了三路2 kW连续光纤激光的组束,输出功率为5.9 kW,光束质量 $M^2 = 1.9$,组束效率超过98%,整个装置集成在紧凑空间,体现出二向色镜组束的小型化优势。近年来,国内研究人员也在高功率二向色镜组束方面开展了一定的研究工作^[17-19]。2017年,Chen等^[17]和Ma等^[18]采用二向色镜对两路5 kW光纤激光器进行组束,实现了10.12 kW的输出功率,组束效率为98.9%,不

过光束质量退化比较严重,达到了 $M^2_x = 11.4$ 和 $M^2_y = 10.4$,对二向色镜的热性能进行了详细分析,为进一步优化光束质量提供有力支撑;2020年,何旭宝等^[19]开展了两路光纤激光的二向色镜组束研究,中心波长分别为1071.5 nm和1080.5 nm,最终实现了2.3 kW的输出功率,组束效率超过99%,采用蓝宝石基底降低了热吸收的影响,实现了光束质量 $M^2 = 1.9$ 的高光束质量组束激光输出。

本文采用两块二向色镜作为组束元件,开展了三路光纤激光器的光谱组束实验研究。将三路中心波长分别为1059、1075、1090 nm的4 kW近单模光纤激光器进行组束,实现了11.34 kW的激光输出,组束效率超过95%,光束质量相较于子束出现了一定的退化,达到了 $M^2_x = 2.941$ 和 $M^2_y = 3.183$,对影响组束效率和光束质量的因素进行了分析,并对二向色镜基底厚度对光束质量的影响进行了实验研究,为进一步优化光束质量提供重要依据。

2 实验装置

实验中采用两块高效率大陡度二向色镜作为组束元件,基底材质为康宁7980玻璃,厚度均为3 mm,工作角度为 10° 。其波长与透过率关系如图1所示,其中二向色镜1在1030~1065 nm波段范围具有大于97%的高透射率,而在大于1075 nm的较宽波段范围内均具有大于99%的高反射率;二向色镜2在1050~1080 nm波段范围具有大于99%的高反射率,在1087~1100 nm波段范围具有大于97%的高透射率。

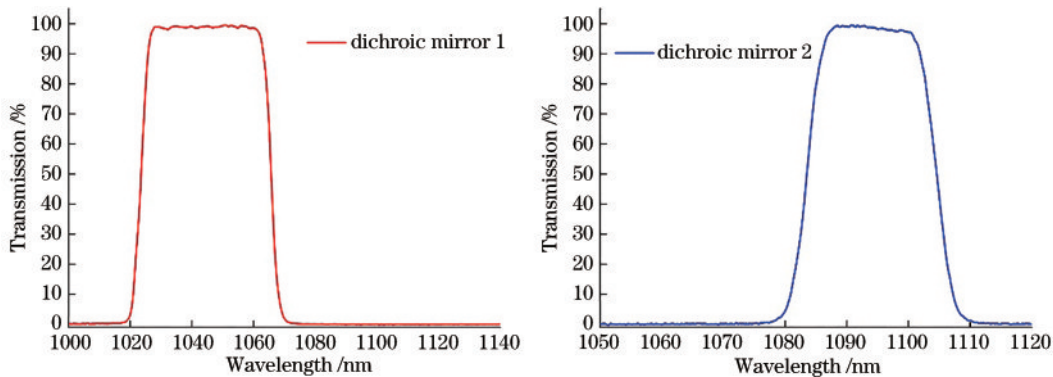


图1 二向色镜镀膜测试曲线图

Fig. 1 Coating test curves of dichroic mirrors

采用三台4 kW近单模光纤激光器作为组束单元,中心波长分别为1059、1075、1090 nm。光路如图2所示,采用振荡腔种子源加一级放大器的主振荡功率放大器(MOPA)结构,有利于对激光的谱线宽度、光束质量进行控制。主放大级采用双向泵浦结构,以976 nm锁波长激光二极管(LD)作为泵源,25/400光纤作为增益光纤,同时主光路中采用拉曼抑制光栅,用于提高受激拉曼散射(SRS)抑制比。

三路子束的输出功率分别为4060、3960、3910 W,

同时均实现了较窄的谱线宽度、较高的SRS抑制比以及近衍射极限的光束质量。以1059 nm激光为例,输出光谱如图3所示,3 dB线宽小于5 nm,10 dB线宽小于10 nm,可保证较高的组束效率,SRS抑制比超过35 dB,有利于提高组束效率以及抑制热晕效应^[20-21]。满功率时的光束质量测试结果如图4所示,两个方向的光束质量分别为 $M^2_x = 1.264$ 和 $M^2_y = 1.316$,实现了近衍射极限输出。

组束方案如图5所示,1059、1075、1090 nm三路激光

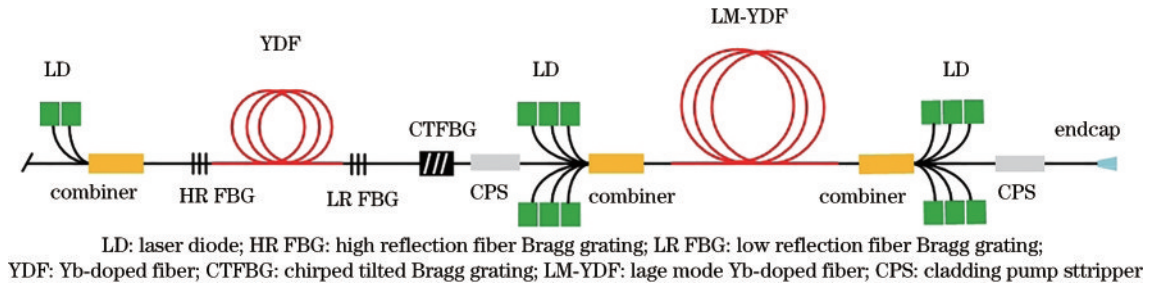


图 2 子束光纤激光器光学方案示意图

Fig. 2 Diagram of optical setup of incident fiber laser

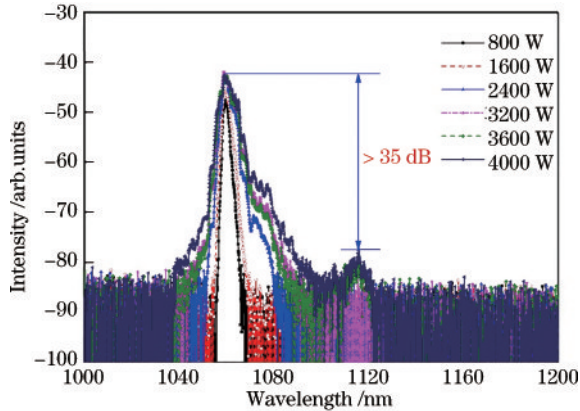


图 3 1059 nm 光纤激光输出光谱图

Fig. 3 Output spectra of 1059 nm fiber laser

经过准直镜整形为直径为 9 mm 的准直光斑。1059 nm 和 1075 nm 激光各自经过一对高反镜,以 10°角入射到二向色镜 1 表面同一位置,1075 nm 激光被二向色镜 1 高效率反射,1059 nm 激光高效率透过二向色镜 1,两束

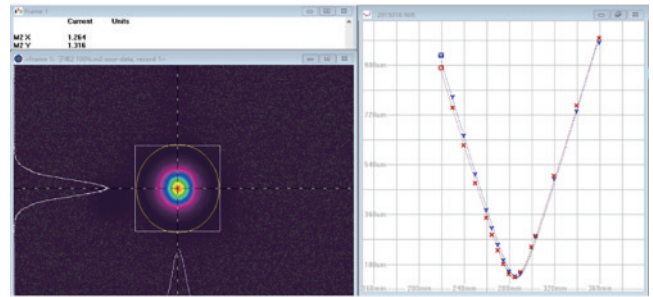


图 4 1059 nm 激光输出功率 4 kW 时的光束质量

Fig. 4 Beam quality of 1059 nm fiber laser at 4 kW output power

光合为一束,以 10°角入射到二向色镜 2 表面并被高效率反射,同时 1090 nm 激光以 10°角入射并高效率透过二向色镜 2,三路激光组合为一束激光输出。通过分束镜对组束激光进行分束,超过 99.9% 的激光进入功率计测试功率,并通过功率计表面漫反射测试光谱,0.1% 的光进入光束质量分析仪进行光束质量测试。

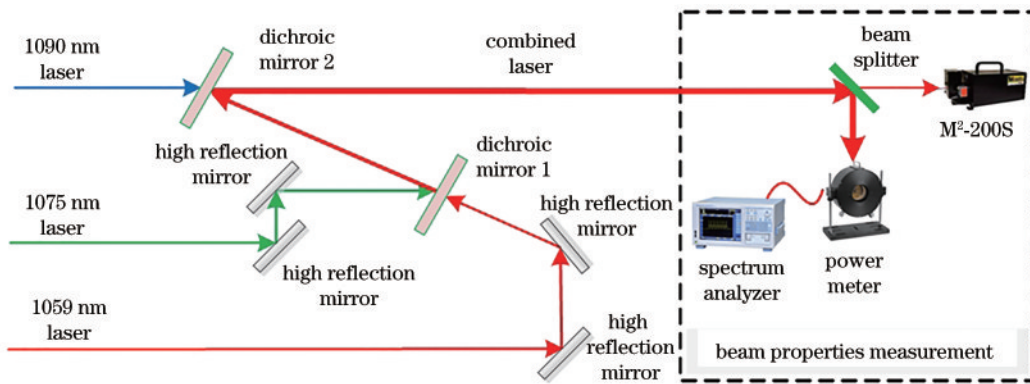


图 5 基于二向色镜的三路激光组束光路示意图

Fig. 5 Diagram of optical setup of three-channel laser beam combining using dichroic mirrors

3 结果分析与讨论

对组束激光功率进行测试,结果如图 6 所示,随着子束功率逐渐提升,组束功率线性增加,当子束满功率,且总入射激光功率为 11.92 kW 时,组束激光功率达到 11.34 kW。从组束效率随入射激光功率的变化趋势可以看出,在功率较低时,组束效率超过 98%,与

二向色镜自身效率相匹配,但是随着组束功率不断提升,组束效率呈现出小幅度下降趋势,最终下降至 95%,已经低于二向色镜效率。通过分析子束激光的光谱特性以及所采用的二向色镜的镀膜曲线,可以得出子束激光的光谱展宽是导致组束效率下降的原因。从二向色镜 1 镀膜曲线可以看出,在低于 1061 nm 的光谱范围透过率大于 98%,斜坡区域为 1061~

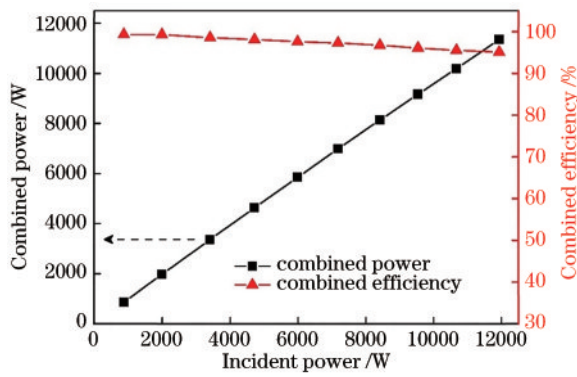


图6 组束功率及效率随入射功率的变化趋势

Fig. 6 Variation trend of combined power and efficiency versus incident power

1069 nm, 透过率快速下降, 在高于 1069 nm 的光谱范围透过率小于 1%, (即反射率大于 99%), 对于 1059 nm 激光, 满功率输出时激光的 10 dB 线宽约 10 nm, 也就是说 1059 nm 激光中低于 1064 nm 的光谱分量透过率会比较低, 影响整体的组束效率; 同样地, 从二向色镜 2 镀膜曲线可以看出, 在低于 1079 nm 的光谱范围反射率大于 98%, 斜坡区域为 1079~1087 nm, 反射率快速下降, 在高于 1087 nm 的光谱范围反射率小于 3%, (即透过率大于 97%), 对于 1090 nm 激光, 满功率输出时激光的 10 dB 线宽约 10 nm, 也就是说 1090 nm 激光中低于 1087 nm 的光谱分量透过率会比较低, 进而影响整体的组束效率。进一步的研究工作可以从压窄子束的谱线宽度以及增大二向色镜陡度两个方面来优化组束效率。

光束质量是评价激光组束效果优劣的另一重要指标, 首先对每个子束通过二向色镜后的光束质量变化趋势进行测试, 如表 1 所示。可以看出, 三束光经过组束系统后, 光束质量均出现了一定的退化, 1059 nm 和 1090 nm 两路激光的光束质量退化量相对较大, 超过了 0.3, 而 1075 nm 激光的光束质量退化量较小, 仅有 0.05。这是因为 1075 nm 激光在组束系统中经过两块二向色镜均为高效率反射, 基底对高功率激光的吸收很少, 热影响较小。而 1059 nm 激光需要透过二向色镜 1, 1090 nm 激光需要透过二向色镜 2, 不可避免地发

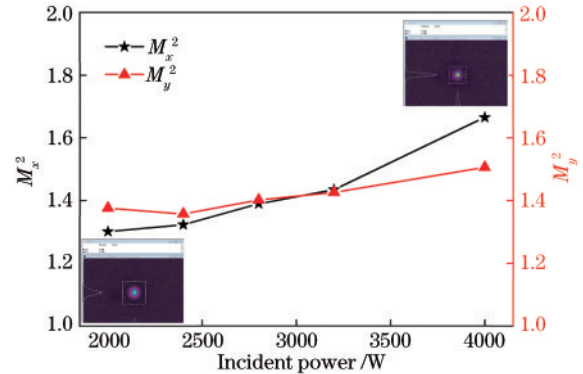
表 1 子光束通过组束系统前后光束质量对比

Table 1 Comparison of beam quality of sub-beams before and after beam combining system

Beam quality at full power	Original value	After beam combining system
Sub-beam 1 (1059 nm)	M_x^2 1.264 M_y^2 1.316	1.665 1.506
Sub-beam 2 (1075 nm)	M_x^2 1.383 M_y^2 1.412	1.412 1.463
Sub-beam 3 (1090 nm)	M_x^2 1.456 M_y^2 1.539	1.740 1.900

生较强烈的基底吸收, 导致二向色镜温度升高, 进而产生热透镜效应, 引起光束质量的下降。

本文还对 1059 nm 激光经过组束系统后的光束质量随功率的变化进行了测试, 如图 7 所示, 随着入射功率的逐渐增加, 基底材料所吸收的激光能量不断增加, 表面温度逐渐升高, 导致光束质量呈现随功率升高不断退化的趋势。不过, 尽管通过组束系统的高功率激光的光束质量因子 M^2 出现一定退化, 但仍可以保持在 2 以下, 证明了所采用的二向色镜可以承受 4 kW 功率的透射激光, 实现较好的组束光束质量。

图7 不同输入功率下 1059 nm 激光经过组束系统后的光束质量
Fig. 7 Beam quality of 1059 nm laser after beam combining system at different input powers

对满功率时的组束激光的光束质量进行了测试, 结果如图 8 所示, 相较于子束激光的光束质量, 组束激光出现了明显的退化, 达到了 $M_x^2=2.941$ 和 $M_y^2=3.183$ 。尽管每块二向色镜只存在一路激光透射, 但是当反射光和透射激光同时作用时, 表层膜系的吸收仍会增加, 此外, 子束激光在满功率工作时光谱宽度逐渐增加, 部分光谱分量的激光超出了二向色镜高效率的工作带宽, 从而增加了基底材料的吸收, 这些因素共同导致了二向色镜表面温度的升高。采用红外热像仪 (FLIR-XX) 对二向色镜表面温度进行了测试, 未开激光时, 表面温度与室温一致, 约 23 °C。满功率工作时, 二向色镜 1 表面最高温度达到了 40 °C, 二向色镜 2 表面最高温度达到了 80 °C, 较高的温升产生了一定的热透镜效应, 导致二向色镜面型畸变, 并对从中透射的光束和经表面反射的光束产生不同程度的影响, 从而使组束激光的光束质量劣化。此外, 组束系统内的热效应还会使高反镜、二向色镜等光学元件的角度发生偏移, 导致各子束激光的指向出现偏差, 并且用于调整各子束激光位置的光学元件放置位置不同, 偏移量会各不相同, 使得三路激光的近场和远场重合度下降, 进一步导致了组束激光的光束质量退化。因此, 组束系统光学元件的热畸变、二向色镜热效应对透射和反射光束的作用差异以及三路激光重合度下降是造成组束激光高功率运转时光束质量明显下降的原因。在未来的设计中需要降低组束系统中光学元件的热吸收, 选用

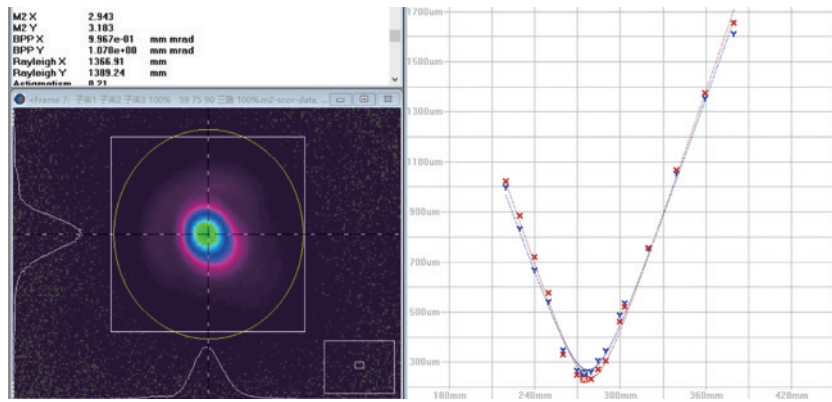


图 8 满功率时的组束激光光束质量

Fig. 8 Beam quality of combined laser at full power

热稳定性高的光机组件或者添加闭环控制系统来保持各子束激光指向的稳定。

二向色镜作为组束系统中的关键光学元件,决定了组束激光的功率上限和光束质量。二向色镜的性能与基底材料、镀膜工艺、厚度以及入射激光功率密度等息息相关。本文对不同基底厚度的二向色镜性能进行了对比研究,所采用的两块二向色镜基底材料均为康宁 7980,厚度分别为 10 mm 和 3 mm,以 3 kW 窄线宽光纤激光器作为测试光源,中心波长为 1054 nm, 3 dB 线宽小于 0.3 nm, 10 dB 线宽小于 2 nm,全部能量均处于二向色镜的高效率透射带,入射光斑直径为 9 mm。测试结果如图 9 所示,随着入射激光功率的逐

渐增加,经过厚度 10 mm 二向色镜的远场光斑出现了严重退化,最强能量位置逐渐从光束中心移向边缘,而经过厚度 3 mm 二向色镜的远场光斑未出现明显退化,基本可以保持子光束原有状态。对表面温度进行测试,厚度 10 mm 的二向色镜的温度达到 70 °C,而厚度 3 mm 的二向色镜的温度只有 40 °C。可见,在保证光学元件其他性能的前提下,适当减小基底厚度可以有效降低温升,进而实现良好的光束质量。在未来的研究中,通过增大入射光斑尺寸、优化基底材料、优化膜系、减小厚度并结合接触式散热等多种优化措施,有望通过二向色镜实现更高功率更高光束质量的组束激光。

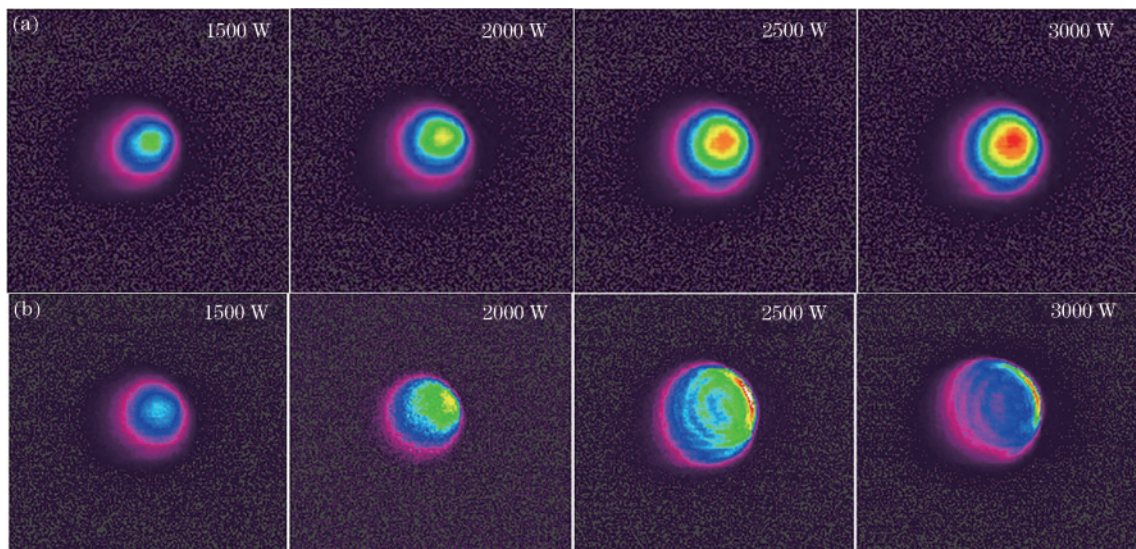


图 9 不同基底厚度对透射激光远场光斑的影响。(a) 3 mm; (b) 10 mm

Fig. 9 Influence of different substrate thicknesses on far field beam pattern of transmitted laser. (a) 3 mm; (b) 10 mm

4 结 论

采用两块二向色镜作为组束元件,对三路中心波长分别为 1059、1075、1090 nm 的 4 kW 近单模光纤激光器进行了光谱组束实验研究,实现了 11.34 kW 的组束激光功率输出,组束效率超过 95%,在两个方向的

光束质量分别为 $M^2_x=2.941$ 和 $M^2_y=3.183$ 。研究发现,随着子束功率的提升,组束效率出现一定幅度的下降(从 98% 降至 95%),此外,满功率时,组束激光的光束质量相较于子束激光出现了明显退化。经分析,子束激光的光谱展宽是造成组束效率下降的原因,在低功率时,光谱分量全部处于二向色镜的高效率通带,而

随着功率提升,光谱逐渐加宽,部分光谱分量延伸至二向色镜的斜坡区域,导致效率下降。激光功率密度、二向色镜基底材料和厚度、膜系设计等因素与组束激光的光束质量退化直接相关,热吸收导致二向色镜升温,进而产生热透镜效应劣化光束质量。开展了 3 mm 和 10 mm 两种基底厚度对光束质量影响的实验研究,相同条件下,经过 10 mm 厚度的二向色镜的光斑发生了明显畸变,而经过 3 mm 厚度的二向色镜的光斑保持良好状态。在接下来的研究工作中,通过压窄子束激光的谱线宽度、提高二向色镜陡度,可以实现更高的组束效率并且能够支持更多的组束路数。通过优化二向色镜膜系设计、基底材料、基底厚度,结合入射激光功率密度的优化,可以大幅降低热吸收的影响,提高组束激光的光束质量。

参 考 文 献

- [1] Tünnermann A, Schreiber T, Röser F, et al. The renaissance and bright future of fibre lasers[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2005, 38(9): S681-S693.
- [2] Limpert J, Roser F, Klingebiel S, et al. The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 537-545.
- [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): 219-241.
- [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 average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [5] 尹智, 延凤平, 刘硕, 等. 2 μm 波段单频拉曼光纤放大器中受激布里渊散射研究[J]. *导航与控制*, 2015, 14(1): 100-105.
Yin Z, Yan F P, Liu S, et al. Research of stimulated Brillouin scattering effect in 2 μm band single-frequency Raman fiber amplifier[J]. *Navigation and Control*, 2015, 14(1): 100-105.
- [6] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 567-577.
- [7] 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(2): 0201002.
Zheng Y, Yang Y F, Zhao X, et al. Research progress on spectral beam combining technology of high-power fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201002.
- [8] 姜曼, 马鹏飞, 粟荣涛, 等. 激光光谱合成技术研究进展与展望(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(12): 20201053.
Jiang M, Ma P F, Su R T, et al. Research progress and prospect of spectral beam combining(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201053.
- [9] Honea E, Afzal R S, Leuchs M S, et al. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9730: 97300Y.
- [10] 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.
- [11] Zheng Y, Zhu Z D, Liu X X, 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.
- [12] Jiao H F, Niu X S, Zhang X M, et al. Design and fabrication of a superior nonpolarizing long-wavelength pass edge filter applied in laser beam combining technology[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(5): A162-A166.
- [13] Regelskis K, Hou K C, Raciukaitis G, et al. Spatial-dispersion-free spectral beam combining of high power pulsed Yb-doped fiber lasers[C]//2008 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science, May 4-9, 2008, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [14] Schmidt O, Wirth C, Nodop D, et al. Spectral beam combination of fiber amplified ns-pulses by means of interference filters[J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 22974-22982.
- [15] Shah L, Sims R A, Kadwani P, et al. High-power spectral beam combining of linearly polarized Tm: fiber lasers[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): 757-762.
- [16] Ludewigt K, Liem A, Stuhr U, et al. High-power laser development for laser weapons[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11162: 1116207.
- [17] Chen F, Ma J, Wei C, et al. 10 kW-level spectral beam combination of two high power broad-linewidth fiber lasers by means of edge filters[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32783-32791.
- [18] Ma J, Chen F, Wei C, 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(10): 2152.
- [19] 何旭宝, 肖虎, 马鹏飞, 等. 基于双色镜的 2.3 kW 光纤激光光束合成[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(2): 20200385.
He X B, Xiao H, Ma P F, et al. 2.3 kW fiber laser spectral beam combination based on dichromatic mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200385.
- [20] 郑也, 倪庆乐, 张琳, 等. 受激拉曼散射对高功率激光传输特性影响研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0701005.
Zheng Y, Ni Q L, Zhang L, et al. Influence of stimulated Raman scattering on propagation properties of high-power laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0701005.
- [21] Zheng Y, Liu X X, He M, et al. Investigation on the thermal blooming effect in a high power spectral beam combining fiber laser system[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(4): 954-959.