

基于双色镜的 2.3 kW 光纤激光光束合成

何旭宝, 肖虎*, 马鹏飞, 张汉伟, 王小林, 许晓军

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 基于双色镜的光谱合成技术可突破单个光纤激光器输出功率极限的限制, 是获得高功率、高光束质量激光输出的有效技术手段。理论上, 初步探究了参与合成的光束位置偏移及倾斜误差对合成光束质量的影响, 结果表明光束倾斜误差对合成系统的输出特性影响显著。实验上, 开展了两路窄线宽光纤激光器的合成实验, 使用双色镜作为合成元件, 获得了最大输出功率为 2355 W 的高光束质量共孔径合成输出, 光束质量 M^2 为 1.9, 合成效率大于 99%, 实验验证了双色镜在反射和透射情况下具有较高的效率。通过进一步提高单路光纤激光的输出功率或增加合成路数, 可以实现更高功率和更好光束质量的共孔径激光输出。

关键词: 激光技术; 光纤激光器; 光谱合成; 双色镜

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200385

2.3 kW fiber laser spectral beam combination based on dichromatic mirror

He Xubao, Xiao Hu*, Ma Pengfei, Zhang Hanwei, Wang Xiaolin, Xu Xiaojun

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

Abstract: Spectral beam combining technology based on dichromatic mirror can overcome the limitation of the output power limit of one single-mode fiber laser, which is an effective technical means to obtain laser output with high power and perfect beam quality. Theoretically, the influence of the beam position shift and tilt error on the quality of the combined beam was preliminarily explored. The results show that the beam tilt error has a significant influence on the output characteristics of the combining system. In the experiment, the combining experiment of two narrow linewidth fiber lasers was carried out. Using dichromatic mirrors as the combining element, a high beam quality and common-aperture combining with 2355 W combined output power was achieved, the beam quality factor M^2 was 1.9, and the efficiency was greater than 99%, which proves that the dichromatic mirror has high efficiency for both the reflection and transmission cases. The experiment result shows that it is possible to achieve a common aperture laser output with higher power and better beam quality by further increasing the number and power of the channel.

Key words: laser technology; fiber laser; spectral beam combining; dichromatic mirror

0 引 言

由于受到非线性效应、热效应、模式不稳定等因素的限制,单路光纤激光输出功率存在理论极限^[1-3],在诸多领域已不能满足应用需求,对多束激光进行合成是提升激光亮度、功率的有效途径。作为非相干合成的一种重要方式,光谱合成^[4]能够将若干束中心波长不同、入射角不同、线宽较窄的激光,通过光谱合成元件合成为一束激光。在提升输出功率的同时保持良好的光束质量,对各路光束的相干性、功率一致性、功率稳定性均没有要求,不需要复杂的相位控制措施,是一种很有发展前途的光束合成方式^[5-6]。

然而,在现有的光谱合成研究方案中,通常采用基于光栅的光纤激光光谱合成技术,例如 2019 年,德国 Fraunhofer-IOF 研究所^[7]公开报道的三通道双光栅光谱合成实验,输出功率为 5.5 kW,光束质量为 $M^2 = 1.5$,全功率下合成效率为 94%。正如参考文献 [8] 所述,这种合成方式一方面为了保证光栅的衍射效率,对各路子光束的线宽、偏振态、光束质量要求较高,这限制了各路子光束的功率水平。另一方面,光栅作为光谱合成中承受光功率最高,压力最大的部分,其热变形会导致光轴的变化,在现有的光谱合成方案中,较难实现对合成光栅的高效热管理和对各路光轴的校正控制。但是,基于双色镜的光谱合成技术采用热负载能力强的双色镜作为合成元件,避免了由于合成元件色散所引起光束质量的退化,降低了单路光纤激光器光谱压缩的难度,同时系统光轴的校正控制较为容易、结构排布紧凑而灵活。

文中基于双色镜的光谱合成技术开展了两路窄线宽光纤激光器的合成实验。利用两路中心波长分别为 1071.5 nm 和 1080.5 nm、最大输出功率分别为 1198 W 和 1217 W 的窄谱光纤激光器,使用双色镜作为合成元件,通过精密调节合成光束光轴及双色镜角度使得两束激光在近场和远场重合,从而获得了最大输出功率为 2355 W 的高光束质量共孔径激光输出,光束质量 M^2 为 1.9,合成效率大于 99%。以实验的方式初步探究了基于双色镜的光谱合成方案在 2 kW 级的技术应用,为更高功率、更多路数的进一步合成打下基础。

1 理论研究

两路光束合成示意图如图 1 所示。根据高斯光

束在自由空间的传输公式,给出两路光束分别在各自空间坐标系中沿 Z 轴传输的表达式。其中一路为理想光束,另一路为存在位置偏移及倾斜误差的光束。对于两个坐标系其变换关系为:

$$X = x \cos \theta_y + z \sin \theta_y, \tag{1}$$

$$Y = x \sin \theta_x \sin \theta_y + y \cos \theta_x - z \sin \theta_x \cos \theta_y, \tag{2}$$

$$Z = -x \cos \theta_x \sin \theta_y + y \sin \theta_x + z \cos \theta_x \cos \theta_y, \tag{3}$$

式中: θ_x 为光束沿着 x 轴 (yoZ 平面) 转过的角度; θ_y 为光束沿着 y 轴 (xoz 平面) 转过的角度。

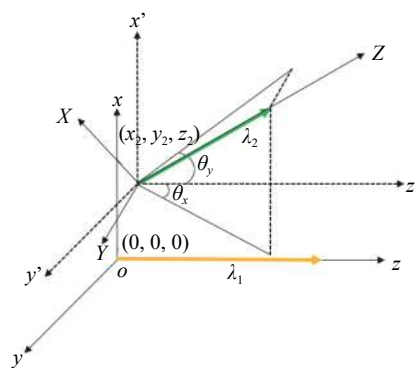


图 1 光束合成示意图

Fig.1 Schematic diagram of beam combining

因此,可以对两路中心波长不同的激光合成光束质量进行数值仿真。在仿真中,采用光束传输因子 (BPF) 作为光束质量的评价参数,其计算式为:

$$BPF = \frac{1.19P}{P_{total}} \tag{4}$$

式中: P 为目标处半径为 $1.22\lambda L/D$ 大小的桶中功率, L 为传输距离, D 为光束发射口径的外接圆直径。在仿真中,理想光束中心波长为 1080 nm,存在误差的光束中心波长为 1070 nm,计算时取二者均值,发射面每个光束直径为 d_0 ,具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真的具体参数

Tab.1 Simulation parameters

λ/nm	ω_0/cm	d_0/cm	L/m	D/cm
1075	0.5	2	1000	1.5

仿真中,使用国产光学系统虚拟仿真平台 seelight 软件模拟不同位置和倾斜误差情况下的光束传输,计算不同情况下的光束传输因子 BPF。

1.1 位置误差对合成光场的影响

位置误差是指各输出光束在保持平行的条件下,在输出面其相对位置发生变化,它反映了光轴整体的平移误差。在数值仿真过程中,相对位置的不确定度是通过在原中心位置坐标 (x_1, y_1) 上分别加上一个随机数组 $(\delta_{x_1}, \delta_{y_1})$ 实现的。计算结果如图 2 所示,仿真中以发射面光束直径为基准,光束坐标偏移成规则变化的情况。可以看到随着位置误差的增大,BPF 值越来越小,当位置误差控制在 1.95 以内时,可获得理想光束质量 95% 的效果,因此,为了获得较高的 BPF 值,有必要尽可能控制位置误差的偏移。

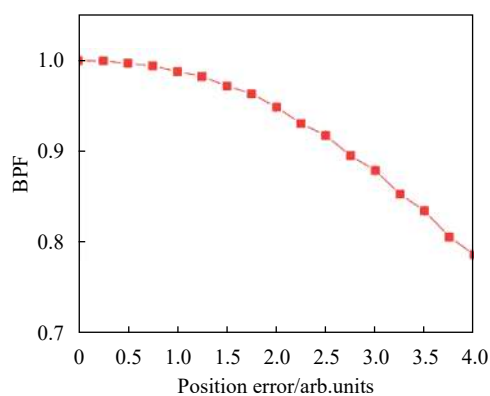


图 2 位置误差的影响

Fig.2 Influence of position error

1.2 倾斜误差对合成光场的影响

所谓倾斜误差,指各输出光束的光轴并不是完全平行的。实际上,由于实验操作和器件的误差要实现完全的平行也是不可能的。若假设一条理想光轴,那么这种倾斜误差可以看作是各输出光束的光轴与理想光轴之间的夹角。计算结果如图 3 所示,仿真中以

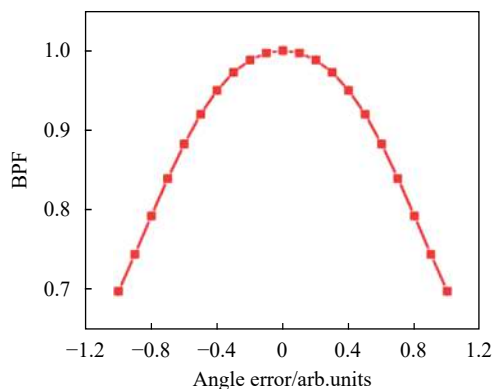


图 3 光轴倾斜误差的影响

Fig.3 Influence of optical axis tilt error

存在光轴倾斜的光束半发散角为基准,光轴倾斜误差成规则变化的情况。可以看到随着倾斜误差的相对增大,BPF 值越来越小,尤其是倾斜误差大于 0.4 时,合成光束质量显著退化。因此,为了获得较高的 BPF 值,需要精确控制光轴的倾斜。

2 实验结构

为达到实验要求,自行设计的双色镜采用蓝宝石作为基底,膜系结构为长波通,口径 50 mm,入射角为 14° ,高反波段为 1000~1070 nm,高透波段为 1080 nm,透射率大于 97%。该双色镜膜系曲线如图 4 所示。

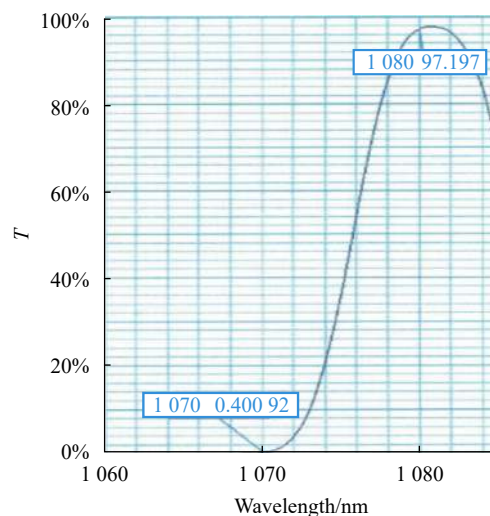


图 4 双色镜在不同波长下的透射率

Fig.4 Transmittance of the dichroic mirror at different wavelengths

基于双色镜的光谱合成实验结构如图 5 所示,整个系统包含三个部分:光源部分、合成部分和测量部分。中心波长分别为 1071.5 nm 和 1080.5 nm 的种子经过预放和主放链路进行功率放大后分别经过同一个双色镜(DM)反射和透射后重合,从而实现合成。合成后的激光经过反射率为 99.9% 的反射镜(HR2)后由 5 kW 功率计接收并实现功率的测量,透射光经过衰减后由光束质量测量仪进行整个合成系统光束质量的测量。高反镜(HR1 和 HR3)用来改变光束的传播方向,同时通过精密调节两路激光输出端的位置、高度及倾斜角度以确保在不同波长工作的两个掺镱光纤激光器输出光束在近场和远场重叠。参与合成的入射激光最大功率分别为 1198 W 和 1217 W。

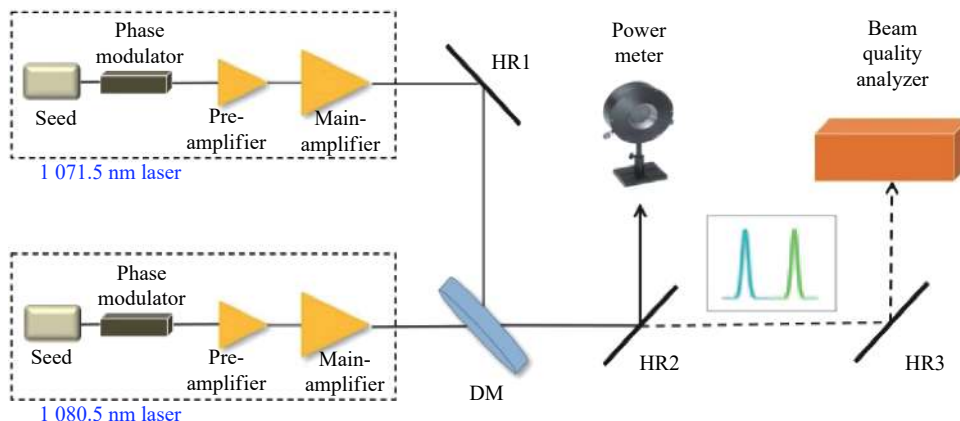


图 5 基于双色镜的光谱合成实验装置图

Fig.5 Experimental device diagram of spectrum beam combining based on dichromatic mirror

自行搭建的两路激光器结构相同,以 1071.5 nm 激光器为例,如图 6 所示给出了激光器结构示意图。单频种子激光首先通过了一个相位调制器 (Phase modulator) 后,依次通过四级预放大器 (P-A1 到 P-A4) 将输出激光的功率放大到 50 W 量级,每一级输出激光

经过包层光滤除后,利用带通滤波器进行滤波,再经过隔离器 (ISO1-ISO4) 隔离后输出。经过预放大系统的信号激光通过一个高功率耦合器 (Coupler) 后注入到主放大器中,其输出端与前向监测端的耦合比分别为 99.9% 与 0.1%。

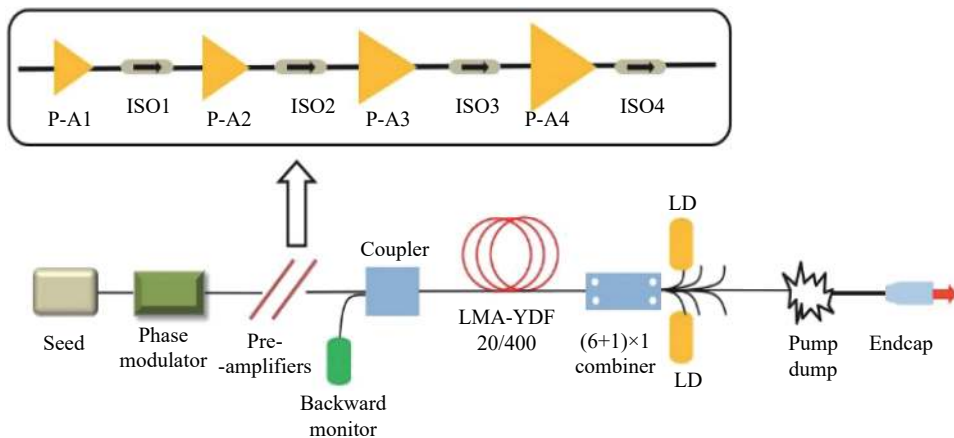


图 6 激光器结构图

Fig.6 Laser structure

主放大器使用一个 $(6+1)\times 1$ 的信号泵浦合束器 ($(6+1)\times 1$ Combiner) 将信号激光与泵浦激光同时耦合到增益光纤中, 2 组中心波长在 976 nm 的稳波长半导体激光器 (LD) 为主放大器提供泵浦源。所使用的大模场增益光纤纤芯直径为 20 μm , 内包层直径为 400 μm 。输出激光经过包层光滤除后, 熔接光纤端帽 (Endcap) 和准直器输出。

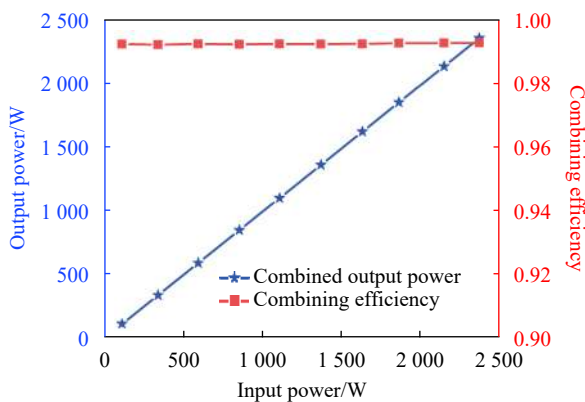
成输出功率, 得到合成激光的输出功率及光-光转换效率如图 7(a) 所示。从结果可知, 合成光束的输出功率几乎随参与合成的两路光纤激光功率的增加而线性增加。在参与合成激光达到最大功率条件下, 可获得大于 2.3 kW 的激光输出, 此时的合成效率大于 99%, 证明了双色镜对不同中心波长激光的透射和反射是高效的。需要说明的是, 为了消除电流不稳定、人为读数误差等外部因素对合成效率的影响, 同时监测了中心波长分别为 1071.5 nm 和 1080.5 nm 激光器经过双色镜的透射和反射功率, 保证记录的数据具有

3 结果与讨论

将两路激光功率从 0 增加到最高功率时, 测试合

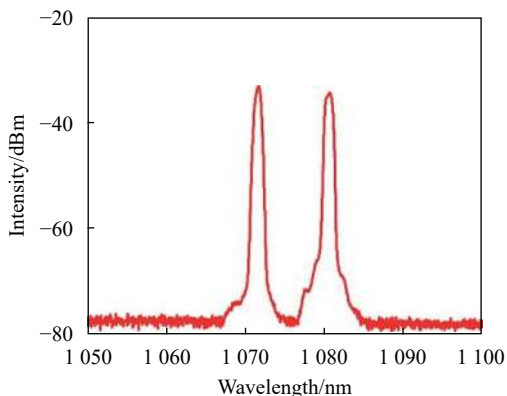
实时性。具体计算式为 $\eta = P_s / (P_s + P_l)$, P_s 表示合成激光输出功率, P_l 表示经过双色镜后漏掉的功率。

M_y^2 分别为 1.85 和 1.63, 且随着电流的增加, 合成光束的光束质量变化不大。对比单路光束质量, 即波长为 1071.5 nm 和 1080.5 nm 光纤激光器达到最大输出功率时 M_x^2 、 M_y^2 分别为 1.22、1.18 和 1.42、1.37, 可以看到合成光束质量恶化较为严重。因此, 单路光束光束质量对合成光束质量变化影响较小。图 8(b) 显示的是合成功率率为 2355 W 时合成光束的光斑远场分布图, 可以看出此时光斑形态已发生变化。



(a) 合成功率与合成效率

(a) The output power and the combining efficiency as a function of input power



(b) 合成功率率为 2 355 W 时光谱图

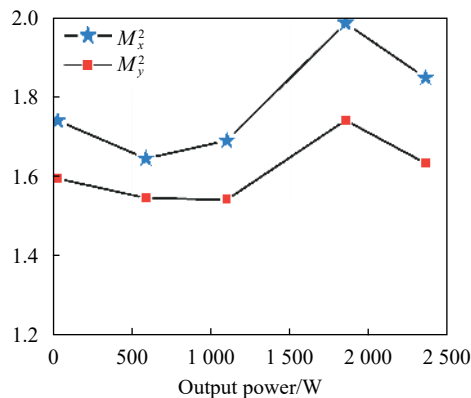
(b) Emission spectrum at 2 355 W

图 7 合成功率、合成效率以及光谱图

Fig.7 The output power, combining efficiency and emission spectrum

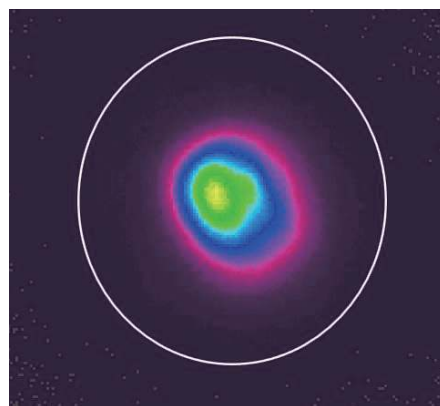
通过分析可以看出此时影响输出功率进一步提升的限制因素是参与合成的单路激光的最大功率, 具体于此次实验搭建的激光器而言在于泵浦功率的进一步提升。合成功率率为 2355 W 时的输出光谱如图 7(b) 所示。波长为 1071.5 nm 和 1080.5 nm 光纤激光 3 dB 线宽分别为 0.734 nm 和 0.944 nm, 从光谱图中可以看到合成光束仅仅包含参与合成的两个中心波长。同时, 基于双色镜的光谱合成方案可以高效地将较宽的光谱和较大的光束共口径输出, 这为更高功率的光纤激光合成提供了可行方案。

图 8(a) 是实验过程中测量的合成激光的光束质量随合成功率的变化。当输出功率达到最大 2355 W (输入电流为 10 A) 时, 测得的合成光束质量 M_x^2 、



(a) 光束质量变化图

(a) Beam quality of the combined output beam versus the rising current



(b) 合成功率率为 2 355 W 时光斑图

(b) Spot pattern at 2 355 W

图 8 光束质量及光斑远场分布图

Fig.8 Beam quality and the distribution of far-field spot

同时, 在合成光束质量测量过程中发现, 单路光纤激光器光轴的变化对合成光束质量的影响显著, 这是由于基于双色镜的光谱合成实验必须保证参与合成的各路激光在近场和远场实现重合, 若光轴发生微小变化, 这会直观体现在合成光束质量上, 引起光束质量的恶化。此次实验是由于光路调节硬件器材及整个系统稳定性的影响, 使得合成光束质量 M^2 接近

1.9, 若通过使用更为精密和稳定的固定装置以及调整设备降低各路激光器光轴偏移和倾斜误差, 同时保持系统稳定性, 合成光束质量会进一步接近单路光束质量, 这也在一定程度上为后续多路光束合成工作提出了更高的要求。

为提高合成系统的输出功率, 对系统进行拓扑结构设计是行之有效的方法, 可以通过增加合成的路数达到输出功率的提高。因此文中给出基于双色镜的七路光束合成结构图, 如图 9 所示, 为简化加工制作

难度, 高反镜可采用全波段反射, 各级双色镜的反射谱设计要求为满足前级短波长激光高效率反射, 下一级激光高效率透射 (图中只给出了第四级双色镜的反射谱)。这种结构设计满足了每一级双色镜只允许单束激光透射, 其他光束高效率反射, 在一定程度上提高了双色镜本身耐热性的容忍度。由此可见, 通过压缩参与合成激光的带宽, 增加合成的路数, 可以实现更高功率输出。

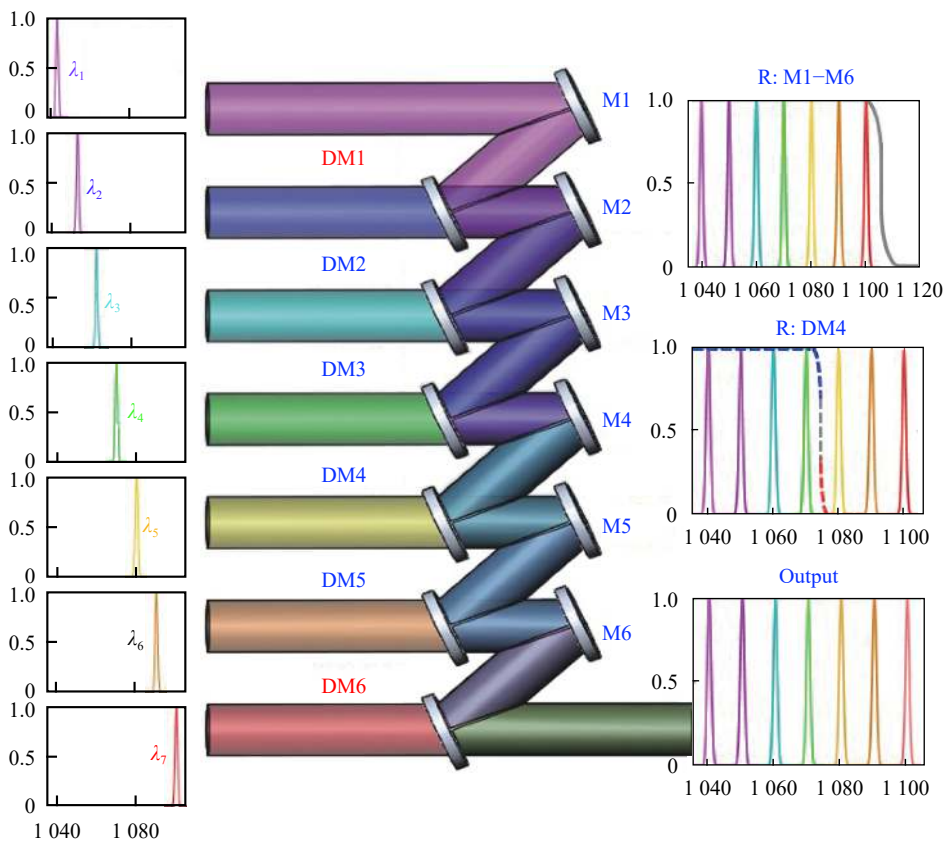


图 9 基于双色镜的级联设计

Fig.9 Cascade design based on dichromatic mirror

4 结 论

通过数值仿真, 建立了两束光束的光谱合成模型, 初步探究了参与合成的光束位置偏移及光轴倾斜误差对合成光束质量的影响, 随着位置误差和倾斜误差的相对增大, BPF 值越来越小, 尤其是当倾斜误差大于 0.4 时, 合成光束质量显著退化。

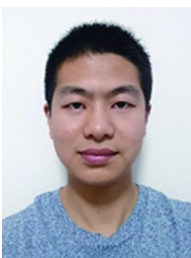
开展了基于双色镜的两路窄线宽光纤激光器的合成实验, 获得了最大输出功率为 2355 W 的高光束

质量共口径合成输出, 光束质量 M^2 为 1.9, 合成效率大于 99%, 实验验证了双色镜在反射和透射情况下具有较高的效率。可以看出, 当前限制合成功率进一步提升的因素主要在于单路激光输出功率以及系统合成路数; 限制合成光束质量进一步提升的因素在于单路激光光束质量以及精确调节合成光束远场近场重合, 其中, 单路激光光束质量决定了合成光束质量的上限, 而实验过程中合成光束远场及近场的重合程度影响更大。因此, 通过进一步提高单路激光的输出功

率及光束质量、增加参与合成的路数以及精确控制系统各路光轴,均可以实现更高功率、更好光束质量的共孔径激光输出。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [3] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13218-13224.
- [4] 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.(in Chinese)
- [5] 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.
- [6] Augst S J, Ranka J K, Fan T Y, et al. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers (Invited) [J]. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 2007, 24(8): 1707-1715.
- [7] 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]//Proc SPIE 10897, Fiber Lasers XVI: Technology and Systems, 2019, 10897: 108970E.
- [8] 许晓军, 韩凯, 刘泽金, 等. 大功率激光高亮度光谱合成系统: CN105762632B[P]. 2019-06-07.



第一作者简介: 何旭宝 (1995-), 男, 国防科技大学前沿交叉学科学院学员, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器及光谱合成方面的研究, 先后获得国防科技大学光信息科学与技术专业学士、光学工程硕士。参与国家自然科学基金项目, 以第一作者发表学术论文两篇。Email: hexubao123@163.com



导师简介: 许晓军 (1973-), 男, 国防科技大学高能激光技术研究所所长, 国家重点研发计划 X 重点专项专家组组长, 国防科技创新特区 X 领域专家。主持和参与国家 863、973 等多项重大科研任务, 先后获国家科技进步一等奖 1 项, 省部级一等奖 4 项。入选教育部新世纪优秀人才, 军队高层次学科拔尖人才和国防科技卓越青年基金计划。Email: xuxiaojun@nudt.edu.cn