

# 激光与光电子学进展

## 基于双色镜的光纤激光光谱合成研究进展

何旭宝<sup>1</sup>, 奚小明<sup>1,2,3</sup>, 张汉伟<sup>1,2,3</sup>, 王小林<sup>1,2,3\*</sup>, 许晓军<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

<sup>3</sup>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 光纤激光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。介绍了四种光谱合成技术的基本合成原理及研究进展, 对各类合成元件结构、限制因素和特点分别进行分析, 重点介绍了基于双色镜的光谱合成关键技术及其国内外研究进展, 最后展望了光纤激光光谱合成技术的发展前景。

**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/LOP202158.0900004

### Research Progress of Fiber Laser Spectral Combining Based on Dichromatic Mirror

He Xubao<sup>1</sup>, Xi Xiaoming<sup>1,2,3</sup>, Zhang Hanwei<sup>1,2,3</sup>, Wang Xiaolin<sup>1,2,3\*</sup>, Xu Xiaojun<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>3</sup>Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** Spectral combining technologies of fiber laser can overcome the limitation of the output power limit of a single-fiber laser, which is an effective technical means to obtain laser output with high power and perfect beam quality. The basic combining principles and research progress of the four spectral combining technologies are introduced. The structure, limiting factors, and characteristics of various synthetic components are analyzed separately. The key technologies of spectral combining based on dichromatic mirrors and their domestic and foreign research progress are introduced. The development prospects of spectral combining technologies are introduced.

**Key words** laser technology; fiber laser; spectral combining; dichromatic mirror

**OCIS codes** 140.3510; 140.3280; 140.3298; 050.1930

## 1 引 言

随着大模场(LMA)双包层掺杂光纤制造能力和高亮度泵浦源技术的不断提升, 光纤激光器得到

了快速发展, 其输出功率不断提高<sup>[1-4]</sup>。然而, 受非线性效应、热效应、模式不稳定、泵浦激光亮度以及光纤端面损伤等因素的限制, 单根光纤激光器的输出功率存在理论极限<sup>[5-9]</sup>。虽然光子晶体光纤和大

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-09-18; 录用日期: 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61735007)

\*E-mail: chinaphotonics@163.com

模场阶跃光纤在一定程度上减小了这些不利影响,但是随着激光技术应用领域的不断扩展,实际应用中激光输出功率和光束质量的要求越来越高。在诸多领域,单路激光的输出功率、亮度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。光束合成技术通常被分为相干合成技术和非相干合成技术两大类。相干合成技术是通过控制各子单元激光光束之间的相位同步实现相干输出,从而提升激光亮度。其所有的光源都具有相同的波长,获得的合成光束的峰值亮度最高,但高功率合成所需子束过多,系统较为复杂<sup>[10-16]</sup>。而光纤激光非相干合成技术主要包括几何并束、偏振合成、全光纤功率合成和光谱合成<sup>[17-19]</sup>。几何并束<sup>[20]</sup>是这几种合成方式中最简单的方式,很容易实现高功率输出,其原因是该方式不需要对输出光谱和相位进行严格控制,但是由于多束激光排布占空比低,无法实现共孔径功率输出,输出光束的发散角较大,难以满足远距离传输要求。在偏振合成中,可以采用偏振分束片使两束光在近场和远场叠加,而不必考虑其相位关系,然而该方案无法获得大功率激光输出,因此其拓展应用有限<sup>[21]</sup>。但若能通过控制两束光的相位使得合成后的光束还是偏振光,则可以实现合成路数的拓展。全光纤功率合成技术则是将多根单模光纤激光通过功率合束器合成到一根多模光纤中,其中功率合束器很大程度上决定了合成的效果。

作为非相干合成的一种重要方式,光谱合成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。光谱合成能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,而且能够实现合成光束的共孔径输出,远场能量集中度高,是一种很有发展前途的光束合成方式<sup>[22-23]</sup>。近年来,国内外研究机构对光纤激光光谱合成技术进行了大量研究,取得了一定成果。本文介绍了光谱合成技术的研究进展,给出了4种光谱合成技术的基本合成原理,对各类合成元件类型结构、限制因素和各自特点分别进行分析,重点介绍了基于双色镜的光谱合成关键技术及其国内外研究进展,最后展望了光谱合成技术的发展方向。

## 2 光纤激光光谱合成进展

光谱合成是利用光学元器件对不同波长激光的反射和透射特性实现对不同中心波长的光纤激光在近场和远场的同时合成,从而提高输出激光的功率和亮度。根据用于合成的光学元件的不同,光谱合成主要分为棱镜合成、双色镜合成、体布拉格光栅(VBG)合成以及反射式衍射光栅(MLDG)合成4种。

### 2.1 横向并联光谱合成

基于棱镜折射和反射式衍射光栅的光谱合成均属于横向并联型光谱合成,即所有入射激光光路均是经过棱镜折射或介质光栅衍射后被合成为一束,从而实现共孔径输出。

#### 2.1.1 棱镜光谱合成

棱镜是一种由两两相交但彼此均不平行的平面围成的透明物体,用以分光或使光束发生色散。由于同一种介质对各种单色光的折射率不同,所以通过棱镜时,各单色光的偏折角不同,利用该原理的逆向原理,可通过调节各路光束的入射角使得出射光束共轴输出,从而实现多光束合成。棱镜合成原理示意图如图1所示。

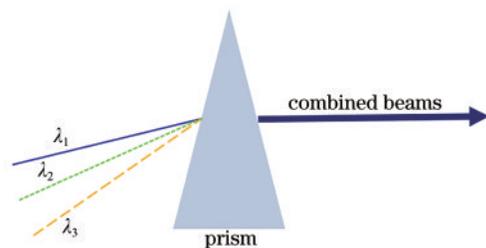


图1 基于棱镜的光谱合成示意图

Fig. 1 Diagram of prism-based spectral combining

自棱镜合成技术出现以来,国内外机构对其进行了相关研究,这些研究大多是以发明专利的形式公开报道<sup>[24-26]</sup>。2013年,von Elm报道了一种用于沿同一路径组合不同激光的合束器,如图2(a)所示,该合束器包括每个激光的定向棱镜( $P_1 \sim P_5$ )和一个合束棱镜( $P_w$ )。定向棱镜的作用是将激光光束传输到合束棱镜,合束棱镜和定向棱镜按照一定的方式进行排布,从而实现光束共路传输。图2(b)展示的是该合束器的实例,通过选择入射到透镜上的平行光束的间距和透镜的焦距,使不同波长的光束沿同一路径输出。

基于棱镜的光谱合成的光功率损耗较少,反射

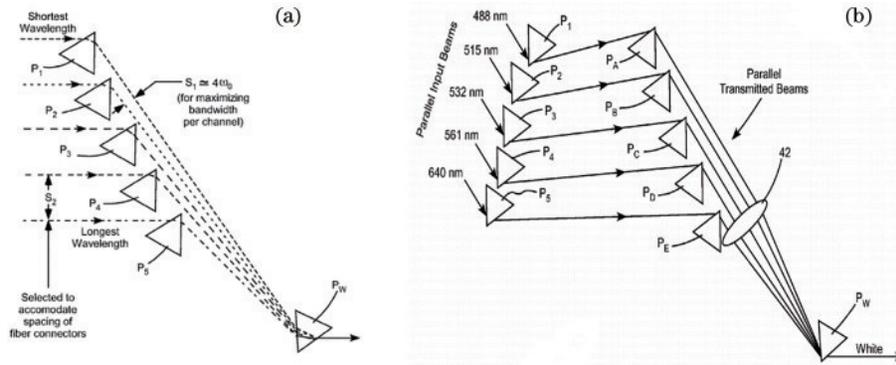


图 2 基于棱镜的合束器和合束器的优化实例<sup>[26]</sup>。(a)基于棱镜的合束器;(b)合束器的优化实例  
Fig. 2 Prism-based combiner and optimization example of combiner<sup>[26]</sup>. (a) Prism-based combiner;  
(b) optimization example of combiner

损失可以忽略不计,合成效率高,同时棱镜本身的抗损伤阈值高,结构简单,适用于高功率激光合束;然而棱镜的色散能力较弱、分辨率低,难以分辨波长间隔在 1 nm 级的窄线宽激光,激光阵列的扩展性差、应用较少。

### 2.1.2 反射式衍射光栅光谱合成

光的衍射可以使不同波长的光经过光栅后沿不同方向出射,基于反射式衍射光栅的光谱合成就是此过程的逆过程,即通过在同一衍射级上将不同波长的光束排布在其对应的衍射角度上,使得所有光束以相同的衍射角出射,从而实现多光束光谱合成。基于反射式衍射光栅的光谱合成原理图如图 3 所示。

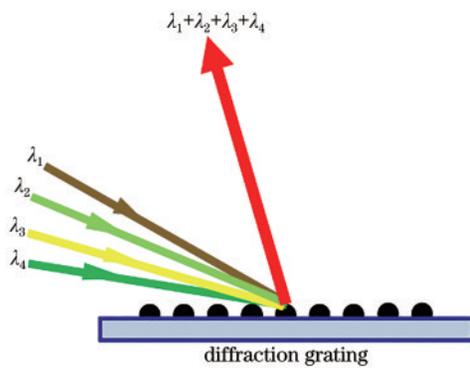


图 3 基于反射式衍射光栅的光谱合成示意图  
Fig. 3 Diagram of spectral combining based on reflective diffraction grating

当入射光与衍射光位于光栅法线同一侧时,光栅方程为

$$d(\sin \theta + \sin \varphi) = m\lambda, \quad (1)$$

式中: $\theta$ 和 $\varphi$ 分别是入射角和衍射角; $d$ 是光栅常数; $m$ 是衍射级数; $\lambda$ 是入射光波长。

当 $\theta = \varphi$ 时,满足 Littrow 衍射条件,此时光栅方程为

$$2d \sin \theta_{\text{Littrow}} = m\lambda, \quad (2)$$

式中: $\theta_{\text{Littrow}}$ 表示特定波长的 Littrow 角。在此结构中,某一波长的光以 Littrow 角入射时,衍射光沿着入射光束方向返回,其衍射效率最大。因此,若不同特定波长的入射光在其所对应的 Littrow 角附近入射,则所有入射光有可能重合为一个光束。

### 2.1.3 多层电介质膜反射式衍射光栅

多层电介质膜反射式衍射光栅具有相对较高的抗光损伤阈值,容易达到高功率输出。随着窄线宽激光技术的发展,多层电介质膜反射式衍射光栅与窄线宽激光技术的相互结合,受到了国内外诸多研究人员的广泛关注。2007 年,Loftus 等<sup>[27]</sup>报道了利用多层电介质光栅进行三路合成,合成光束的总功率为 522 W,合成效率为 93%。合成光束的光束质量因子 $M^2$ 在合成方向和垂直于合成的方向上分别为 1.18 和 1.22。2012 年,洛克希德·马丁公司实现了 12 路 280 W 光纤激光束的光谱合成,获得了 3.1 kW 的光纤激光高光束质量光谱合成输出, $M^2 < 1.4$ <sup>[28]</sup>;2014 年,该公司实现了 30 kW 激光输出的光谱合成系统。2016 年,中国科学院上海光学精密机械研究所基于多层电介质衍射光栅并采用自制的偏振无关多层电介质衍射光栅,对 8 路光纤激光进行光谱合成,合成光束的总功率可达 10.8 kW,系统的合成效率为 94%,合成光束的光束质量 $M^2 = 1.9$ <sup>[29]</sup>。

值得注意的是,在单光栅中:一方面,光栅的色散将引起具有较宽线宽的单纤子束经合成后光束质量出现严重退化的问题;另一方面,由于受激布里渊散射(SBS)的出现,单个窄线宽光源的输出功率受限,这使得基于单光栅的光谱合成技术发展缓慢。然而,通过加入第二个类似的光栅(正如

Madasamy 等<sup>[30]</sup>所提出的方案),可以突破谱线宽度的限制,这是因为第二个光栅补偿了第一个光栅衍射引起的单个光束的光谱发散,这就是基于双光栅的光谱合成。

2016年,中国科学院上海光学精密机械研究所对7路千瓦级光纤激光进行了光谱合成,最大输出功率为11.27 kW,总衍射效率为92.8%<sup>[31]</sup>。同年,中国工程物理研究院马毅等<sup>[32]</sup>基于双MLDG实现了多路窄线宽子束激光的高效率、高光束质量共孔径合成,合成光束的最大输出功率达到

9.6 kW,合成效率达到92.0%,合成光束质量 $M^2$ 为2.9。2019年,德国Fraunhofer-IOF研究所公开报道了三通道双光栅光谱合成实验,实验结构如图4所示,3路波长分别为1050,1070,1090 nm的2 kW全光纤窄线宽掺镱光纤放大器的输出光束分别经准直后通过两个宽带高反镜并耦合到光栅中,实验使用自主制造的偏振无关电介质反射光栅,输出功率为5.5 kW,光束质量 $M^2=1.5$ ,合成效率为94%,与双光栅结构中的合成效率的期望值接近<sup>[33]</sup>。

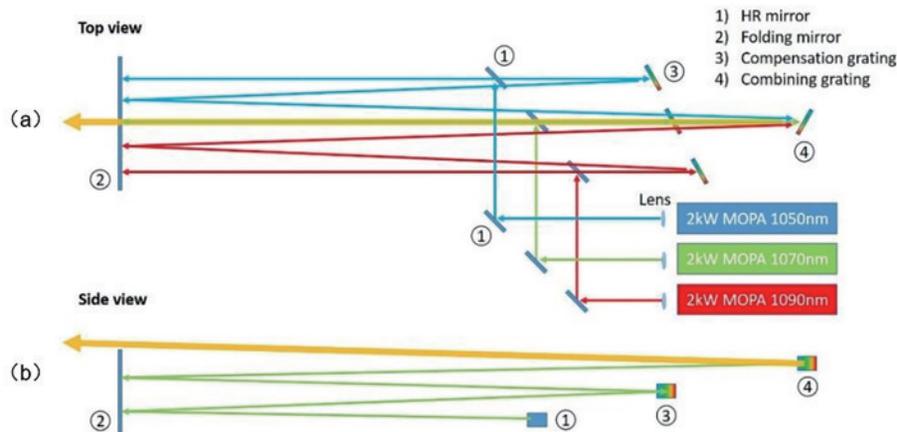


图4 三路双光栅光谱合成结构俯视图,以及1070 nm MOPA激光系统在垂直方向的侧视图<sup>[33]</sup>。(a)三路双光栅光谱合成结构俯视图;(b)1070 nm MOPA激光系统在垂直方向的侧视图

Fig. 4 Top view of structure of three-channel dual-grating-based spectral combining, and side view of 1070 nm MOPA laser system in vertical direction<sup>[33]</sup>. (a) Top view of structure of three-channel dual-grating-based spectral combining; (b) side view of 1070 nm MOPA laser system in vertical direction

#### 2.1.4 金属膜反射式衍射光栅

金属膜反射式衍射光栅是在光栅表面镀金属膜,金属反射膜制备工艺简单、工作波长范围宽,选择反射系数较大、光学性质较稳定的金属作为金属膜材料,这些金属膜材料可以在冷原子物理、中红外激光雷达和特殊材料加工等领域得到广泛应用。2017年,上海建桥学院机电学院和中国科学院上海光学精密机械研究所<sup>[34]</sup>采用自研的镀金膜反射式衍射光栅作为色散元件,对两束波长分别为1064 nm和1080 nm的单模光纤激光进行光谱合成,实现了合成光束的输出功率为13.64 W、合成效率为91.9%及合成光束的输出光束质量 $M^2$ 为1.53的高亮度输出(图5)。

基于反射式衍射光栅的光纤激光光谱合成技术,通过色散的逆过程在实现功率增长的同时保持良好的光束质量,这是获得高亮度激光的重要技术途径。早期研究普遍采用金属膜系反射式衍射光栅进行大量光谱合成实验,基于金属膜反射式衍射

光栅的光谱合成的优点在于光栅制作技术成熟、线密度设计灵活、工作的波长范围较宽,然而由于光栅光损耗较大、承受功率相对较低,该技术不被认为是一种理想的高功率光谱合成技术。得益于电介质光栅很高的衍射效率(可达99%)、热负载相对较小、光栅不易发生热变形、阵列扩展性强等优点,基于多层电介质反射式衍射光栅的激光光谱合成技术受到了国内外众多研究人员的青睐。进一步提升系统功率和亮度的关键在于:控制单路激光的输出光谱线宽以保持良好的光束质量;提升光栅的色分辨率、功率承受能力、热管理以及衍射效率,从而实现合成的激光数目的增加;优化合成系统光路的排布与调控,以使光束阵列系统足够紧凑且方便管理调节。

#### 2.2 纵向级联光谱合成

基于双色镜或体布拉格光栅的光谱合成则属于纵向级联型合成。纵向级联型合成需要通过设

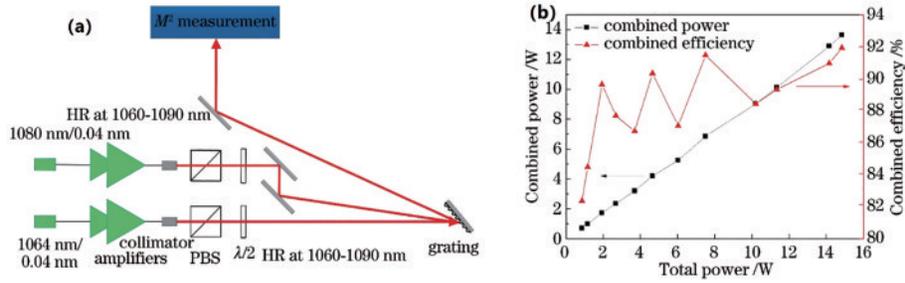


图 5 基于金属膜反射式衍射光栅的双光束光谱合成光学系统示意图及其合成功率与合成效率<sup>[34]</sup>。(a)基于金属膜反射式衍射光栅的双光束光谱合成光学系统示意图;(b)合成功率与合成效率

Fig. 5 Diagram of dual-beam spectral combining optical system based on metal film reflective diffraction grating, and combined power and combined efficiency<sup>[34]</sup>. (a) Diagram of dual-beam spectral combining optical system based on metal film reflective diffraction grating; (b) combined power and combined efficiency

计双色镜或体布拉格光栅阵列,在系统结构上采用多级合束,从而实现多波长光束的合成。

### 2.2.1 双色镜光谱合成

基于双色镜的高功率光纤激光光束合成技术是基于双色镜的分光原理,允许在双色镜透射谱范围内具有一定带宽的激光高效率透射,其他波长的激光高效率反射。通过合理设计双色镜的透/反射谱特性并调整入射光的角度,使得所有的光束共孔径输出,从而实现多光束合成。如图 6 所示,可利用双色镜将不同波长的激光通过透射和反射进行光谱合成。

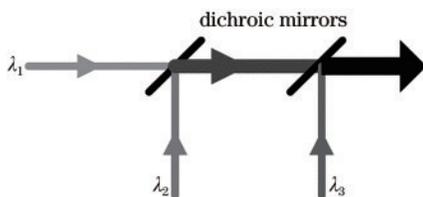


图 6 双色镜光谱合成

Fig. 6 Dichromatic mirror spectral combining

### 2.2.2 体布拉格光栅光谱合成

体布拉格光栅(VBG)光谱合成是利用 VBG 独特的衍射特性,当入射波长满足 VBG 的布拉格条件时,其衍射效率接近于 1,入射光以最大衍射效率发生衍射,而偏离布拉格波长的光的衍射效率接近于 0,可以高效率透射。如图 7 所示,VBG1 对  $\lambda_1$  波长的光高效率透射,对  $\lambda_2$  波长的光高效率衍射,VBG2 对  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  波长的光高效率透射,对  $\lambda_3$  波长的光高效率衍射,最后可得到多光束共孔径输出。基于体布拉格光栅的光谱合成的较早实验是在 2002 年, Ciapurin 等<sup>[35]</sup>利用一个透射式体布拉格光栅成功实现了两束中心波长在 1.1  $\mu\text{m}$  的百瓦级掺镱光纤激光光束合成,合成功率超过 155 W,合成效率大于 92%。

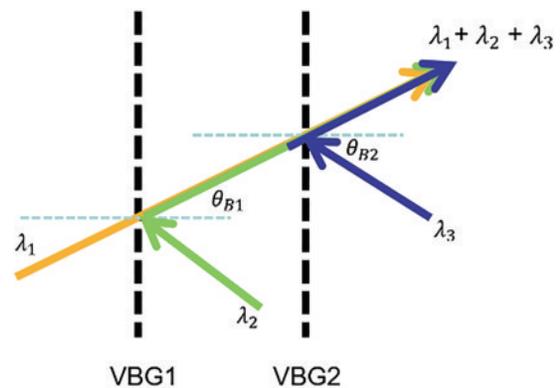


图 7 基于反射式体布拉格光栅光谱合成原理示意图<sup>[35]</sup>

Fig. 7 Diagram of spectral combining based on reflective

2016 年,中国工程物理研究院 Zhou 等<sup>[36]</sup>报道了采用三个反射式体布拉格光栅实现了四路近红外光谱合成的实验,得到的输出功率为 720 W、合成效率为 94.7%。合成激光具有近衍射极限的光斑光束质量,  $M^2 \sim 1.54$ 。系统结构如图 8 所示。

理论上,基于体布拉格光栅的光谱合成技术可以实现高效率、高光束质量的多光束合成,但是 VBG 作为系统合成的关键器件,其衍射效率特性和色散特性很大程度决定了合成的光束质量,强激光作用于光栅会使材料通过本征吸收产生热效应、改变光栅热梯度以及产生布拉格波长热致漂移,可以采取对各子光束进行整形来改变光栅温度梯度分布以及对体布拉格光栅主动冷却的措施来提高光束质量。可以看出:基于体布拉格光栅的光谱合成技术实现数千瓦高功率输出依旧存在技术瓶颈,其关键在于提高设计制作 VBG 的能力以及优化系统的热管理。

### 2.3 4 种光谱合成方式的比较分析

表 1 对比分析了 4 种光谱合成方式的优缺点。

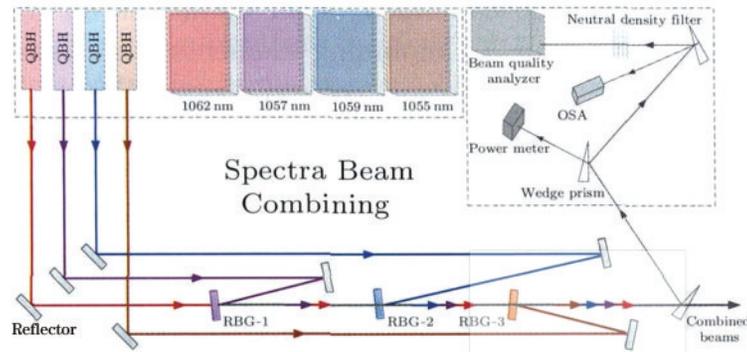
图 8 基于反射式体布拉格光栅的 4 路光束合成系统<sup>[36]</sup>Fig. 8 Four-channel beam combining system based on reflective volume Bragg grating<sup>[36]</sup>

表 1 不同光谱合成方法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of different spectral combining methods

Method	Advantage	Disadvantage
Prism	Simple structure, high combining efficiency	Weak dispersion ability, poor array scalability
Reflective diffraction grating	High diffraction efficiency, relatively small thermal load	Power level of each sub-beam is limited; thermal management of grating and control of each optical axis are difficult
Dichromatic mirror	Low requirements for single beam linewidth, optical power, structure	Control of cascaded system is difficult
Volume Bragg grating	High combining efficiency, good beam quality	Combined power is limited; thermal effect is prominent

### 3 基于双色镜的光谱合成关键技术及其国内外研究进展

基于双色镜的光纤激光合成技术是一种结构简单的光谱合成技术,在提高输出功率的同时可以保持良好的光束质量,具有极大的潜力。尤其是随着双色镜膜系设计和镀膜技术的突破,采用级联阵列规模扩展时可以实现高功率、高亮度合成。因此,国内外研究人员对此展开了大量研究。

#### 3.1 基于双色镜的光纤激光光谱合成关键技术分析

基于双色镜的光纤激光合成技术利用双色镜将不同波长的激光通过透射和反射实现光谱合成,其自身特点在于:1)由于双色镜没有色散特性,因此色散不会引起光束质量的退化。作为光谱合成技术的一种,将基于双色镜的光纤激光合成技术运用到光纤激光光谱合成中具有保持单路激光光束质量的潜力;2)单路激光带宽只要小于双色镜的通带宽度(纳米量级)就可以利用其对激光进行合成,与光栅光谱合成相比,基于双色镜的光纤激光合成技术对单路光束光谱宽度的要求不高,从而降低了单路光纤激光器功率提升的难度;3)作为合成元件的双色镜承受的光功率高、热变形不严重,这使得

对系统进行高效热管理和对各路光轴的校正控制较为容易;4)基于双色镜的光谱合成系统的光路排布紧凑而灵活,工程应用范围广。

本课题组于 2019 年基于双色镜提出了一种大功率激光高亮度光谱合成系统,该系统包括  $N$  个双色镜、1 个会聚透镜和 1 个光电位置探测器<sup>[37]</sup>(图 9)。 $N$  束光束经过透射、反射后通过会聚透镜被聚焦在光电位置探测器上,形成  $N$  个光点;通过调节  $N$  路入射激光的光轴,使光电位置探测器上的  $N$  个光点重合在一起,实现光谱合成。该方案的独特性在于采用强光反射式设计,绝大部分激光能量都是只经过双色镜的反射,透过双色镜的只有单路光束,这使得双色镜承受的功率压力较小、产生的热效应不明显、不会显著影响输出光束质量;同时该方案采用了光轴一体化控制,只需要一个光电探测器(PSD)就能够简便、有效地把各路光束的光轴控制在同一方向上。

对于光纤激光光谱合成技术而言,单路激光功率和光束质量是所有合成技术的限制因素。为了在保持合成路数最少和结构相对简单的基础上获得尽可能高的合成功率,则要求参与合成的单路光束有尽可能高的功率水平和较好的光束质量。除此之外,基于双色镜的光纤激光光谱合成技术在系统功率和亮度提升方面还受三个因素的制约:

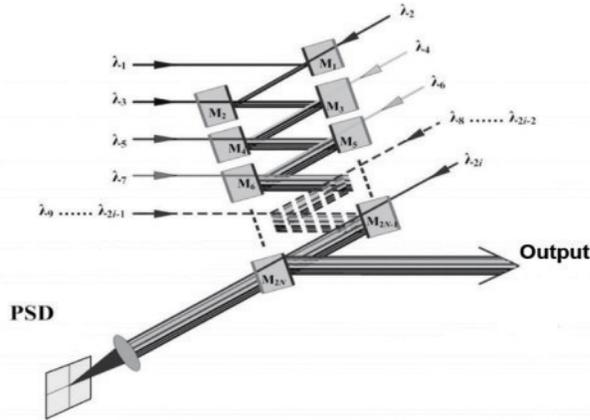


图 9 大功率激光高亮度光谱合成系统示意图<sup>[37]</sup>

Fig. 9 Diagram of high-brightness spectral combining system for high-power laser<sup>[37]</sup>

1) 双色镜应具备较高的光谱效率、较高的激光损伤阈值和良好的热稳定性。良好的热稳定性意味着由热透镜效应引起的波前像差、透射光束的会聚和反射光束的发散得到控制,从而提高输出光束质量,同时为了将阵列激光束的规模进行扩展,要求双色镜透射带宽更窄、边沿更陡峭。

2) 热管理能力。当对  $N$  路激光进行合成时,需要通过以下方式对  $N-1$  个双色镜分别进行热管理:(1)增加主动冷却装置;(2)进行被动补偿光学系统设计。

3) 光学系统的控制,包括双色镜的调整、各路子光束的位置偏移和角度控制、系统的紧凑排布,这很大程度上影响着合成光束的光束质量和输出功率。相信随着上述技术的重大突破,基于双色镜的光纤激光合成技术将得到飞跃式发展。

### 3.2 国内外研究进展

早在 1979 年,日本 NTT (Nippon Telegraph and Telephone) 电信公司的研究人员 Nosu 等<sup>[38]</sup>就报道了将二向干涉滤光镜纵向级联合成的结构用于多路复用器(图 10、11),实现 6 路激光二极管的合成,这便是最早的雏形。在这一结构中,每路激光二极管的波长均不相同。二向干涉滤光镜透射特定波长的激光,并反射其他波长的激光。

文中提及一种使用多反射多分离复用器的干涉滤波器件的新开发,这种器件中的光束在相互连接的大块玻璃元件中传播,其组分的折射率几乎相同。因此,这里描述的多路复用器具有低损耗特性,不需要在每个组件上涂一层防反射涂层,并且该器件不受外部干扰。

详细地讲,滤光片 1 反射的光束在经过滤光片

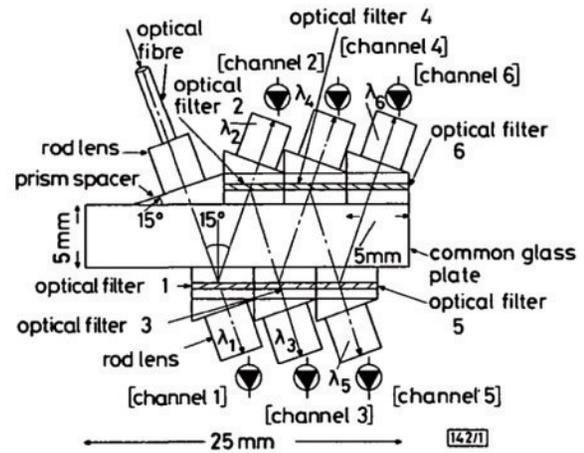


图 10 复用器的结构<sup>[38]</sup>

Fig. 10 Structure of multiplexer<sup>[38]</sup>

2 时,只有波长为  $\lambda_2$  的光波被透射,波长为  $\lambda_3 \sim \lambda_6$  的光束经反射后通过共衬底传输到滤光片 3。以此类推,波长分别为  $\lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$  的光波通过滤光片 3、4、5、6 依次分离。6 个滤光片的特性如图 12 所示,通过配置更多的滤光片可实现更多光波的复用,并且每个滤光片的中心波长不同。

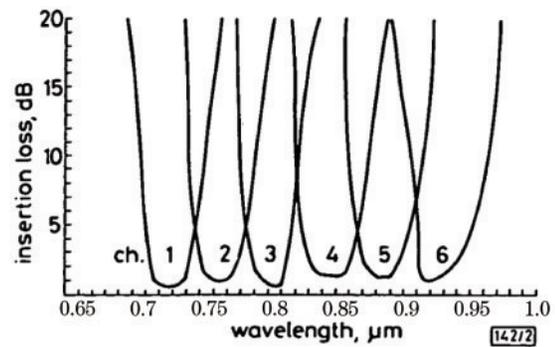


图 11 滤波器多路复用的特性<sup>[38]</sup>

Fig. 11 Characteristics of multiplexing of filter<sup>[38]</sup>

2008 年,美国密歇根大学 Regelskis 等<sup>[39]</sup>利用基于双色镜的光谱合成方案实现了三路脉冲光纤激光器光谱合成,提出了一种基于双色镜的光谱合成方案,将光纤放大器的多个输出信号组合在一起。基于双色镜的光谱合成方案不受空间光束的色散影响,与基于光栅的光谱合成方案相比具有显著的优势,因为它允许使用已经能够承受数千瓦平均功率的薄膜元件合成光谱较宽、功率较高的激光。该实验证明了将光谱展宽的光纤激光合成为具有较高光束质量的单束合成激光的可行性,其合成效率大于 90%,获得的平均功率为 52 W,脉冲能量为 1.9 mJ。

图 12 中显示了由三个大模场掺镱光纤放大器和双色镜组成的光谱合成结构, 双色镜陡峭的透射、反射特性允许激光通道之间约 2 nm 的光谱分离。输入光束经双色镜 F1 和 F3 后分为三个分量。使用额外的双色镜 F2 和 F4 来消除约 2 nm 间隔的相邻光谱通道之间的光谱重叠。经放大处理后, 将每个光谱分量分别进行准直 [半峰全宽 (FWHM) 约为 2 nm], 然后用双色镜 F5 和 F6 进行光谱复用。通过选择合适的光束入射角, 可使不同光谱分量的边缘精确对准。

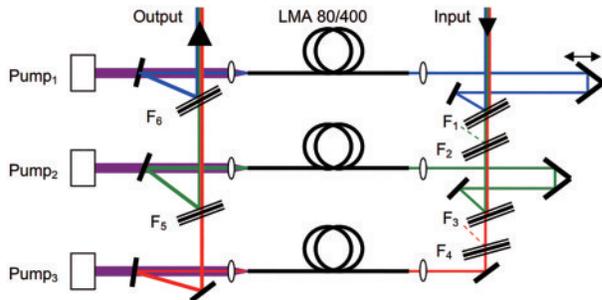


图 12 实验装置示意图<sup>[39]</sup>

Fig. 12 Diagram of experimental setup<sup>[39]</sup>

三路光束合成实验中采用波长可调谐激光器, 测量得到的三路光束合成的总透射率大于 95%, 反射率大于 99.97%。在重复频率为 100 kHz、脉宽为 2 ns 脉冲内总的输出功率为 52 W, 此时蓝色通道的

合成效率为 97%, 绿色通道为 91%, 红色通道为 92.1%。另一个单独的实验在较低的重复频率和较长的脉冲持续时间下获得约 1.9 mJ 的能量。三个通道的输入光束光谱和经过合束后的输出光束光谱如图 13 所示, 光谱合束后的光束强度分布表明, 尽管光谱明显较宽, 但经过光谱合成滤波后, 单个激光通道的光束质量得到了保留。

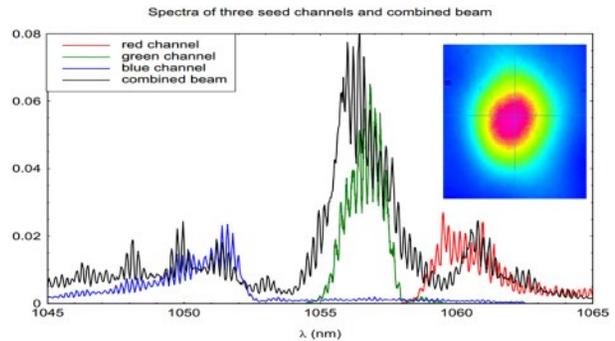


图 13 三个通道的输入光束光谱和合束后的输出光束光谱, 以及合束后的光束强度分布<sup>[39]</sup>

Fig. 13 Spectra of input beam and output beam of three channels, and beam intensity distribution after beam combining<sup>[39]</sup>

2009 年, 德国耶拿大学 Schmidt 等<sup>[40]</sup> 利用双色镜成功实现四路脉冲光纤放大器的光谱合成, 合成平均功率为 208 W, 当重复频率降低到 10 kHz 时, 可提取到 6.3 mJ 的脉冲能量。实验装置和传输曲线如图 14 所示。

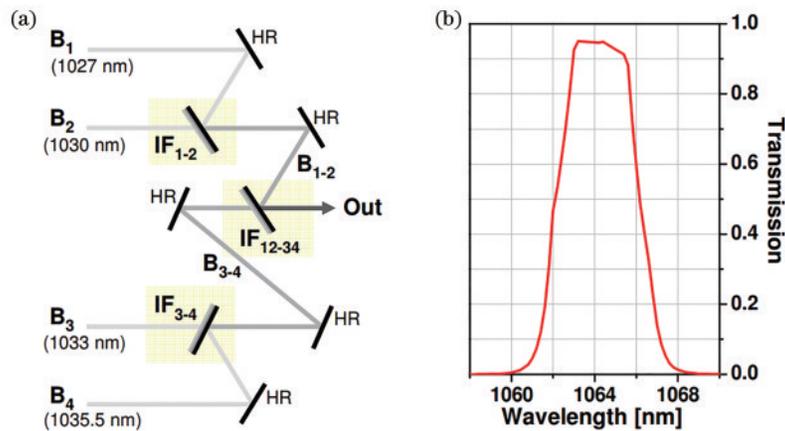


图 14 实验装置和传输曲线<sup>[40]</sup>。(a) 实验装置示意图; (b) 传输曲线, 显示了 3 nm 的频谱带宽和陡峭的边缘

Fig. 14 Diagram of experimental setup and transmission curve<sup>[40]</sup>. (a) Diagram of experimental setup; (b) transmission curve, showing 3 nm spectral bandwidth and steep edges

实验中通过选择反射光束的入射角, 使得两束光束在近场和远场中叠加。前两个双色镜 (IF<sub>1-2</sub> 和 IF<sub>3-4</sub>) 很容易调节, 这是因为透射光束只包含一个波长。IF<sub>12-34</sub> 更复杂是因为该双色镜必须透射两个波

长 [ $\lambda(B_3)$ ,  $\lambda(B_4)$ ]。为了获得较高的合成效率, 必须在透射光和反射光的损失之间找到一种平衡。实验过程中测量了不同输出功率水平下双色镜合成的总效率, 并将其保持在 86% 左右。

然而,各路光束通过双色镜的总效率仅为 86%。这就意味着一部分光功率被双色镜吸收,从而导致其自身的温升,而这个温升将使得通过双色镜的光束特性发生改变。从实验装置图可以看出,双色镜吸收一部分透射光后,其折射率会发生一定的变化,热吸收进而导致产生了热形变和热透镜效应。这将导致透射光束在传输过程中会聚,而反射光束由于受到双色镜形变的影响而发生散射。因此,合成光束的光束质量将发生明显退化。当合成光束的功率达到 208 W 时,双色镜温度增加至 21 K,合成光束质量如图 15 所示,  $M^2$  因子由单路的 1.2 增加至 2.3。

2015 年,国防科技大学 Ma 等<sup>[41]</sup>利用主动锁相和宽带双色镜,搭建了光纤激光相干合成和光谱合成的混合合成系统。系统结构如图 16 所示。8 路输出功率为 20 W 的线偏振激光经过偏振合成后,利用双色镜进行光谱合成,得到的输出功率达到

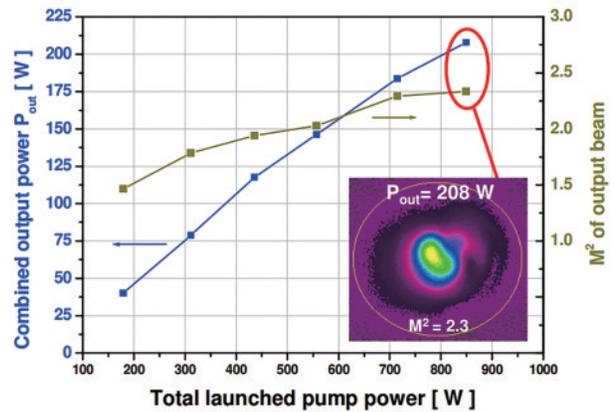


图 15 泵浦功率、合成输出功率与合成光束质量的关系图 (插图显示了输出功率为 208 W 时的光斑形态)<sup>[40]</sup>

Fig. 15 Relationship among pump power, combined output power, and combined beam quality (illustration shows spot pattern at output power of 208 W)<sup>[40]</sup>

142.1 W, 合成效率大于 90%, 合成光束质量  $M_x^2 \approx 1.1, M_y^2 \approx 1.1$ 。

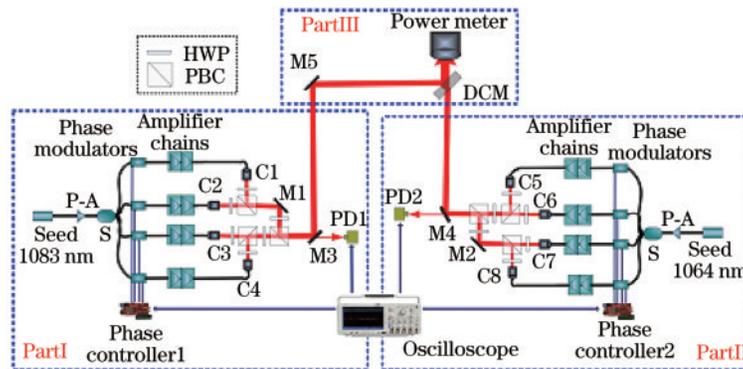


图 16 混合光束合成系统结构示意图<sup>[14]</sup>

Fig. 16 Structural diagram of hybrid beam combining system<sup>[14]</sup>

在国内,南京理工大学也对基于双色镜的光束合成进行了实验研究。2017 年,Chen 等<sup>[42]</sup>演示了一种使用双色镜作为合成元件来实现两束高功率宽

线宽激光光谱合成的方案(图 17)。单路光束由三个主振荡功率放大器通过全光纤合束获得,两路最大输出功率分别为 5.3 kW 和 4.9 kW,合成光束

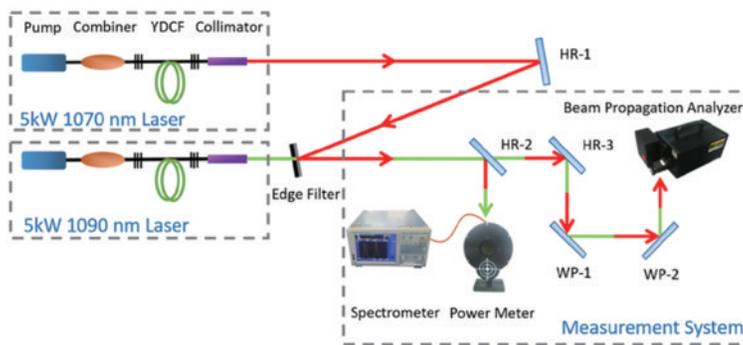


图 17 基于双色镜的光谱合成方案的实验配置示意图<sup>[42]</sup>

Fig. 17 Experimental setup diagram of spectral combining scheme based on dichromatic mirror<sup>[42]</sup>

的输出功率为 10.12 kW, 光束质量  $M_x^2 = 11.4$ ,  $M_y^2 = 10.4$ 。尽管单通道发射谱较宽, 但合成效率达到 98.9%, 这证明了该双色镜在反射和透射两种情况下都具有很高的效率。该研究还进行了详细的热性能分析, 以优化光束质量。

图 18 给出了双色镜的结构和不同表面粗糙度下的反射曲线。可以看出: 随着表面粗糙度的增大, 双色镜的反射率曲线向短波长方向偏移, 上升

沿趋于平缓, 这对合成效率产生负面影响。为了提高合成效率, 两表面的粗糙度应该小于 1 nm。该团队通过实验测量得到当表面粗糙度为 0.89 nm 时实际反射率曲线(实验)与模拟曲线吻合较好。在这种情况下, 双色镜理论上具有较高的损伤阈值, 从双色镜的反射率曲线可以看出透射波长与反射波长之间具有较小的带宽范围, 这增大了基于双色镜的光谱合成技术的潜力。

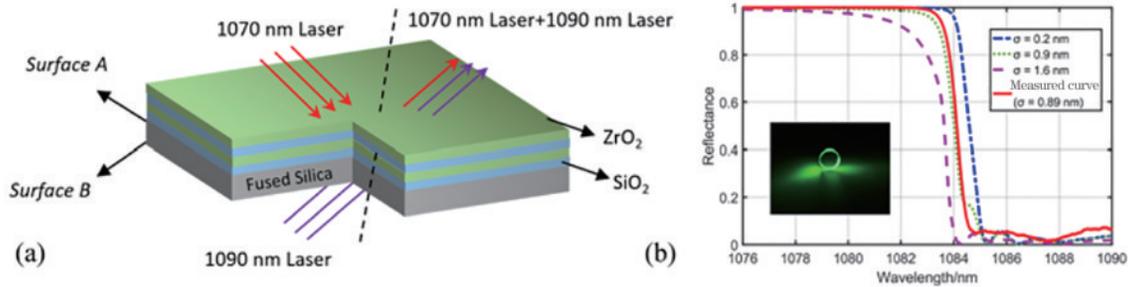


图 18 双色镜的结构图, 以及不同表面粗糙度下双色镜的反射率曲线<sup>[42]</sup>。(a) 双色镜的结构图; (b) 不同表面粗糙度下双色镜的反射率曲线

Fig. 18 Structural diagram of dichromatic mirror, and reflectance curves of dichromatic mirror under different surface roughness<sup>[42]</sup>.

(a) Structural diagram of dichromatic mirror; (b) reflectance curves of dichromatic mirror under different surface roughness

该团队利用相似的实验方案, 在 2019 年实现了 10.25 kW 的功率输出, 合成效率为 97%,  $M_x^2$  接近 12,  $M_y^2$  超过 14<sup>[43]</sup>。图 19 显示了单路光束和合成光束的光束质量随上升电流的变化。当输出功率超过 3.4 kW (电流为 14 A) 时, 随着电流的增加, 合成光束质量有明显的恶化迹象。在最大输出功率时, 合成光束质量几乎是入射光束的两倍, 为了进一步探究光束质量恶化的原因, 实验分别测量了透射光束和反射光束的光束质量。可以看出, 在整个合成过程中, 反

射光束(1070 nm)的光束质量保持良好, 相反, 透射光束的光束质量出现明显的下降, 类似于合成光束质量的变化。因此, 透射光束对合成光束质量的劣化起主要作用, 这为基于双色镜的光谱合成技术提供了具体的指导。此外, 通过探究还发现光束质量因子在  $x$  轴和  $y$  轴上的退化是不同的。这主要是由于入射激光的强度分布近似于高斯分布, 横向和纵向的束腰宽度略有不同。在这种情况下, 合成光束的强度分布不是完全对称的, 因此双色镜的温度梯度分布是不均匀的。

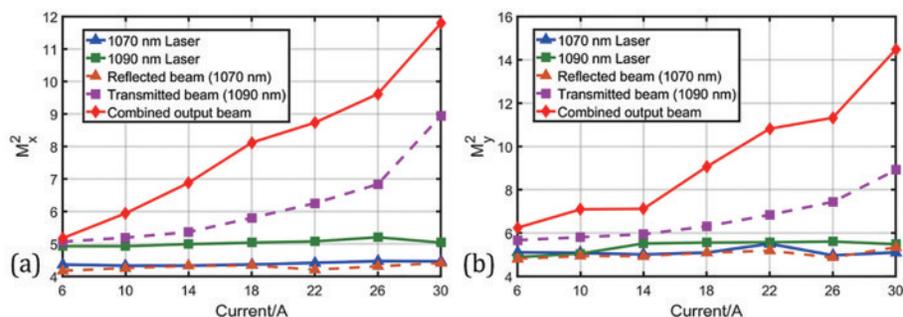


图 19 输出光束质量与电流的关系<sup>[43]</sup>。(a)  $M_x^2$ ; (b)  $M_y^2$

对于功率超过 5 kW 的激光器, 随着入射功率的增加, 合成光束的光束质量退化是很明显的, 于是该团队重点研究了光束质量退化的原因并提出了优化的方案。随着运行时间和输出功率的增

加, 双色镜温度上升和表面变形都更加明显, 双色镜的热透镜效应造成光束退化, 这种效应不仅会产生不均匀的波前像差, 而且会导致透射光束的会聚和反射光束的发散。当它们被聚焦后, 所产

生的发散光束和会聚光束将形成具有不同束腰半径的聚焦光束,从而使得  $M^2$  值增加。为了减小热透镜效应、优化合成光束质量,采用三点固定的方法固定双色镜,并在系统中加入风冷装置,从而使得双色镜表面的热变形部分得到解决,光束质量得到改善。

如图 20 所示,由于空气冷却只能在表面冷却,它不能克服热透镜问题,为了减小热透镜的影

响,该团队实现了基于  $\text{CaF}_2$  窗的被动热补偿光学系统,获得了较好的光束质量。实验结果图如图 21 所示,在最高功率时,输出光束水平方向的光束质量恶化(BQD)系数减小了 52%,垂直方向减小了 101%,这验证了优化方案的可行性。利用薄膜沉积技术对系统进行进一步优化是可行的,并可以实现与单个光纤激光器同样好的合成光束质量。

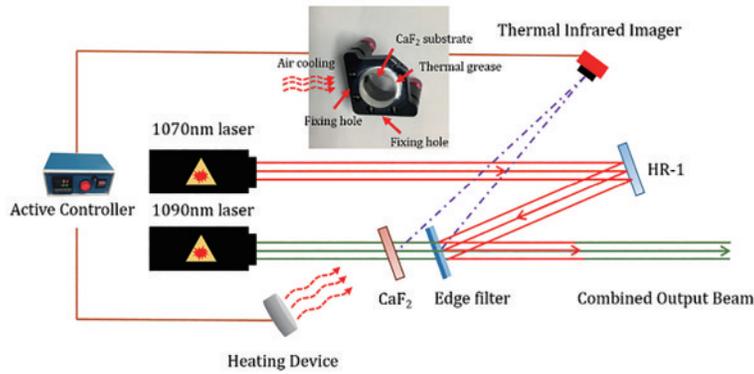


图 20 热透镜被动补偿方案<sup>[43]</sup>

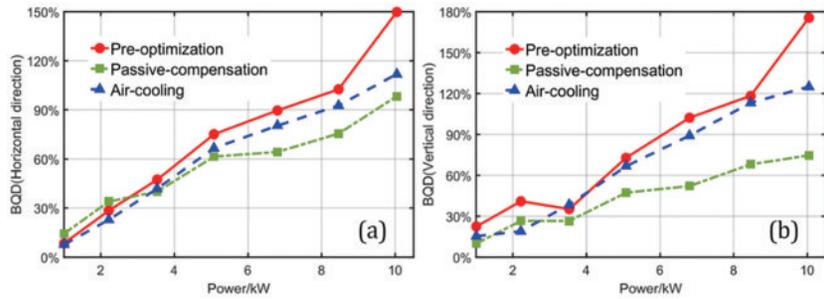


图 21 不同条件下 BQD 系数随输出功率的变化<sup>[43]</sup>。(a) 水平方向; (b) 垂直方向

Fig. 21 BQD coefficient varies with output power under different conditions<sup>[43]</sup>. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

2019年,该团队第一次将双色镜应用到高亮度连续波非相干光束合成领域<sup>[44]</sup>。采用高损伤阈值 ( $>20 \text{ MW/cm}^2$ ) 和陡峭上升沿 ( $<2 \text{ nm}$ ) 的双色镜作

为合成元件,实现了近场和远场两束输出光束的重叠。入射激光的功率分别为 5.5 kW 和 833 W,合成功率率为 6.2 kW,合成效率达到 97%,实验图如图 22 所示。

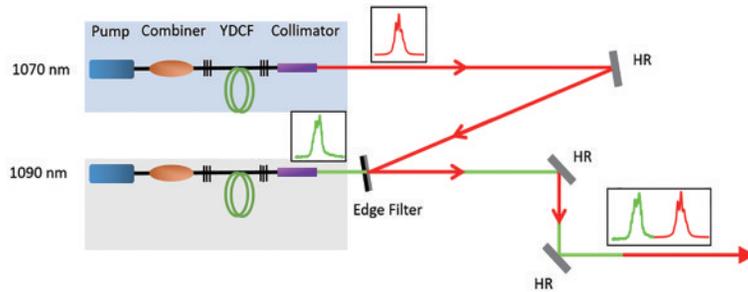


图 22 基于双色镜的光谱合成实验图<sup>[44]</sup>

Fig. 22 Experimental setup diagram of spectral combining based on dichromatic mirror<sup>[44]</sup>

实验同时研究了合成光束的输出功率和光-光转换效率,测量得到由双色镜特性决定的合成效率大于 97% (图 23)。实验证明了自行设计的双色镜具有较高的效率和损伤阈值,得到了合成功率为 6.2 kW 时的发射谱。通常基于光栅的光谱合成对

激光的线宽要求很高,而光纤中的 SBS 效应和四波混频使得在高功率输出的情况下难以维持窄线宽。然而,此实验验证了基于双色镜的光谱合成方案可以有效地合成较宽光谱和较高功率的激光,这明显优于基于光栅的光谱合成方案。

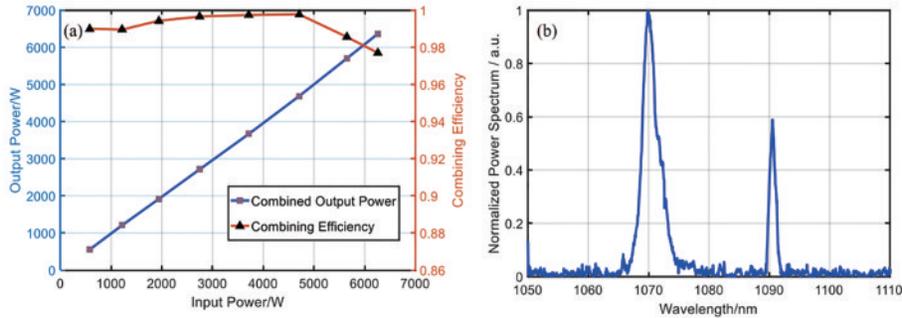


图 23 输出功率、合成效率与输入功率的关系图,以及输出功率为 6.2 kW 时的发射光谱<sup>[44]</sup>。(a) 输出功率、合成效率与输入功率的关系图;(b) 输出功率为 6.2 kW 时的发射光谱,分辨率带宽为 0.2 nm

Fig. 23 Relationship among output power, combining efficiency, and input power, and emission spectrum at 6.2 kW<sup>[44]</sup>.

(a) Relationship among output power, combining efficiency, and input power; (b) emission spectrum at 6.2 kW with resolution bandwidth of 0.2 nm

图 24 显示了输出光束在水平和垂直方向的光束质量相对于上升电流的变化。测得的合成光束质量分别为 5.7 和 6.9,这与 1070 nm 激光变化一致。可以

看到,随着电流的增加,入射激光和输出光束的光束质量保持不变,几乎没有恶化,这也为通过增加子束的数量和功率来进一步提高输出功率提供了可能。

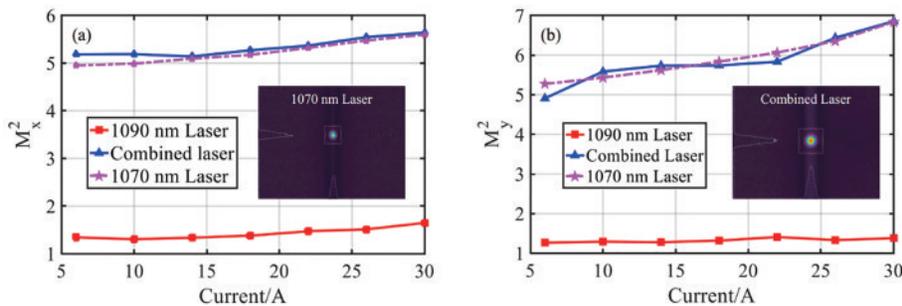


图 24 输出光束质量与电流的关系(插图显示了最大输出功率下 1070 nm 光束和合成光束的焦点位置处的能量分布图像)<sup>[44]</sup>。

(a)  $M_x^2$ ; (b)  $M_y^2$

Fig. 24 Relationship between output beam quality and current (insets show energy distributions at focus position of 1070 nm laser and combined laser at maximum output power)<sup>[44]</sup>. (a)  $M_x^2$ ; (b)  $M_y^2$

从研究进展来看,当前基于双色镜的光纤激光光谱合成技术在系统功率和亮度提升方面取得了较快的发展,输出功率已超过 10 kW,但依旧存在一些问题,最突出的问题就是输出光束质量的严重恶化。随着输出功率的提升,双色镜的热透镜效应愈发明显,合成光束质量退化严重。目前研究中参与合成的子束较少,国内研究大多是基于两路合成开展实验,对多路合成的探索较少,这限制了输出功率的进一步提高。此外,多个双色镜级联合成时光路的设计以及光轴的控制也是新的挑战。如果能

够通过提高光纤激光器本身的光束质量和功率、压缩线宽来增加参与合成的光束数量,同时对双色镜的热效应进行有效控制,则有望得到更窄的光谱、更好的光束质量和更高的合成功率。

## 4 结束语

光谱合成技术弥补了单根光纤激光输出功率受限的缺陷,在保持良好光束质量的同时提升系统的输出功率,是实现高功率光纤激光输出的重要技术路径之一。目前,光纤激光器光谱合成亟待解决

的技术核心有三点:一是高功率窄线宽光纤激光器技术的谱线拓展、功率提升与线宽压缩;二是高效率、高损伤阈值、小吸收系数的光谱合成元件的制作;三是系统结构紧凑化设计及自动化控制。

基于双色镜的高功率光纤激光光束合成技术作为光谱合成技术的一种,将其运用到光纤激光光谱合成中避免了由合成元件色散所引起的光束质量的退化,该技术在一定程度上具有保持单路激光光束质量的潜力,降低了单路光纤激光光谱压缩的难度,同时系统光轴的校正控制较为容易、结构排布紧凑而灵活。相信,随着双色镜膜系设计和制作工艺的提升,高功率窄线宽光纤激光器技术的发展,系统热管理以及各路子光束校正控制技术的突破,基于双色镜的高功率光纤激光光束合成技术将实现更高输出功率的高亮度光谱合成。

#### 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 P, Xiao H, Leng J Y, et al. High-power fiber lasers based on tandem pumping [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(3): A29-A36.
- [3] Tünnermann A, Schreiber T, Limpert J. Fiber lasers and amplifiers: an ultrafast performance evolution [J]. Applied Optics, 2010, 49(25): F71-F78.
- [4] Shi W, Fang Q, Zhu X S, et al. Fiber lasers and their applications [J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [5] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers [J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18645-18654.
- [6] 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.
- [7] Ke W W, Wang X J, Bao X F, et al. Thermally induced mode distortion and its limit to power scaling of fiber lasers [J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14272-14281.
- [8] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [9] 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.
- [10] Bagayev S N, Trunov V I, Pestryakov E V, et al. Optimisation of wide-band parametric amplification stages of a femtosecond laser system with coherent combining of fields [J]. Quantum Electronics, 2014, 44(5): 415-425.
- [11] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array [J]. Optics Letters, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [12] Kienel M, Müller M, Klenke A, et al. 12 mJ kW-class ultrafast fiber laser system using multidimensional coherent pulse addition [J]. Optics Letters, 2016, 41(14): 3343-3346.
- [13] Brocklesby W S, Nilsson J, Schreiber T, et al. ICAN as a new laser paradigm for high energy, high average power femtosecond pulses [J]. The European Physical Journal Special Topics, 2014, 223(6): 1189-1195.
- [14] Kong H J, Park S, Cha S, et al. Conceptual design of the Kumgang laser: a high-power coherent beam combination laser using SC-SBS-PCMs towards a dream laser [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, 3: e1.
- [15] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, et al. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. Optics Letters, 2006, 31(9): 1247-1249.
- [16] Lou Q, Zhou J, He B, et al. Fiber lasers and their coherent beam combination [J]. Optics and Photonics News, 2008, 19(5): 46-51.
- [17] Klenke A, Seise E, Demmler S, et al. Coherently-combined two channel femtosecond fiber CPA system producing 3 mJ pulse energy [J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24280-24285.
- [18] Limpert J, Klenke A, Kienel M, et al. Performance scaling of ultrafast laser systems by coherent addition of femtosecond pulses [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 268-277.
- [19] Zhou X F, Chen Z L, Wang Z F, et al. Beam quality analysis of incoherent beam combining by a  $7 \times 1$  all-fiber signal combiner [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(20): 2265-2268.
- [20] Yan P, Gong M L, Xiao Q R, et al. High beam quality signal light fiber beam combiner and manufacture method thereof: CN102778729A [P].

- 2012-11-14.  
闫平, 巩马理, 肖起榕, 等. 高光束质量信号光光纤合束器及其制作方法: CN102778729A [P]. 2012-11-14.
- [21] Xin G F, Pi H Y, Shen L, et al. Beam incoherence combination of high power laser diode [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(10): 101404.  
辛国锋, 皮浩洋, 沈力, 等. 高功率半导体激光器光束非相干合成技术进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(10): 101404.
- [22] 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.
- [23] Augst S J, Ranka J K, Fan T Y, et al. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1707-1715.
- [24] Pickring R D. Beam combining prism: US2983183 (A) [P]. 1961-05-09.
- [25] Gold R S, Jachimowicz K E. Beam combining/splitter cube prism for color polarization: US5067799 [P]. 1991-11-26.
- [26] von Elm R, Marois C. Beam-combiner for fiber-delivered laser-beams of different wavelengths: US8599487 [P]. 2013-12-03.
- [27] 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.
- [28] Afzal R S, Honea E, Savage-Leuchs M, et al. Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency, and brightness [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8547: 854706.
- [29] 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.
- [30] Madasamy P, Jander D R, Brooks C D, et al. Dual-grating spectral beam combination of high-power fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 337-343.
- [31] 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.  
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.
- [32] Ma Y, Yan H, Peng W J, 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.
- [33] 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 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10897: 108970E.
- [34] Chen Y, Yang Y F, Zheng Y, et al. Spectral combining of laser based on reflective diffraction grating coated with gold film [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0906004.  
陈颖, 杨依枫, 郑也, 等. 基于镀膜反射式衍射光栅的激光光谱合成 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0906004.
- [35] Ciapurin I V, Glebov L B, Stickley M. High-power incoherent beam combining with Bragg grating in photosensitive glasses [EB/OL]. (2002-01-01) [2020-07-25]. [https://www.researchgate.net/publication/228858873\\_High-power\\_incoherent\\_beam\\_combining\\_with\\_Bragg\\_grating\\_in\\_photosensitive\\_glasses](https://www.researchgate.net/publication/228858873_High-power_incoherent_beam_combining_with_Bragg_grating_in_photosensitive_glasses).
- [36] Zhou T D, Liang X B, Li C, et al. Spectral beam combining of fiber lasers by using reflecting volume Bragg gratings [J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(12): 72-76.
- [37] Xu X J, Han K, Liu Z J, et al. High-power laser high-brightness spectrum synthesis system: CN105762632B [P]. 2019-06-07.  
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.
- [38] Nosu K, Ishio H, Hashimoto K. Multireflection optical multi/demultiplexer using interference filters [J]. *Electronics Letters*, 1979, 15(14): 414-415.
- [39] 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: 1-2.
- [40] 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.
- [41] Ma P F, Jiang M, Wang X L, et al. Hybrid beam combination by active phasing and bandwidth-controlled dichromatic mirror [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(19): 2099-2102.
- [42] 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.
- [43] Chen F, Zhang J Y, Ma J, et al. Beam quality analysis and optimization for 10 kW-level spectral beam combination system [J]. Optics Communications, 2019, 444: 45-55.
- [44] Chen F, Ma J, Zhu R H, et al. 6.2 kW spectral beam combination by means of edge filters [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11333: 1133306.