

基于多路窄线宽光纤激光的 9.6 kW 共孔径光谱合成光源

马毅^{1,2} 颜宏^{1,2,*} 彭万敬^{1,2} 王小军^{2,3} 田飞^{1,2} 孙殷宏^{1,2} 赵磊⁴ 王树峰^{1,2}
李腾龙^{1,2} 梁小宝⁴ 王岩山^{1,2} 冉欢欢¹ 柯伟伟^{2,3} 冯昱骏⁵ 唐淳^{1,2} 张凯^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

³北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

⁴中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

⁵清华大学工程物理系, 北京 100084

摘要 理论和实验研究了一种基于双多层电介质膜(MLD)光栅色散补偿构型设计的光谱合成激光器,该激光器既实现了多路光纤激光高光束质量共孔径光谱合成输出,也降低了单路光纤激光的线宽要求。优化了该激光器的光束质量退化分析模型,分析了激光波长、光栅色散和光谱结构对光谱合成输出光束质量的影响,实验研究了不同功率水平下的光谱合成输出光束质量变化特性,获得了最大输出功率为 9.6 kW 的高光束质量共孔径合成输出,光束质量 M^2 为 2.9,合成效率达到 92.0%。通过进一步压缩每路光纤激光的线宽并提升其功率或增加合成路数,可以获得更高功率和更高光束质量水平的共孔径激光输出。

关键词 激光器; 光纤激光器; 光谱合成; 双光栅; 高光束质量

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0901009

9.6 kW Common Aperture Spectral Beam Combination System Based on Multi-Channel Narrow-Linewidth Fiber Lasers

Ma Yi^{1,2} Yan Hong^{1,2} Peng Wanjing^{1,2} Wang Xiaojun^{2,3} Tian Fei^{1,2} Sun Yinhong^{1,2}
Zhao Lei⁴ Wang Shufeng^{1,2} Li Tenglong^{1,2} Liang Xiaobao⁴ Wang Yanshan^{1,2}
Ran Huanhuan¹ Ke Weiwei^{2,3} Feng Yujun⁵ Tang Chun^{1,2} Zhang Kai^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

³Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China

⁴Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

⁵Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract A spectral beam combination (SBC) laser with dual multi-layer dielectric (MLD) grating dispersion compensation configuration is studied theoretically and experimentally, which can combine multiple-channel fiber lasers into a common aperture beam with high beam quality and reduce the linewidth requirement of the single channel fiber laser. The analysis model of the degradation of beam quality is optimized. The influences of the laser

收稿日期: 2016-03-29; 收到修改稿日期: 2016-05-24

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金(2015YZJJ-01)

作者简介: 马毅(1977—),男,硕士,副研究员,主要从事高功率固体激光和光纤激光技术方面的研究。

E-mail: rufinecn@caep.cn

* 通信联系人。E-mail: yanhong@caep.cn

wavelength, the dispersion of grating and the spectral structure on the output beam quality of the SBC laser are analyzed. The variation of the beam quality of the SBC system at different output power levels is also studied experimentally. The output combined beam with the maximum average output power of 9.6 kW is obtained, of which the beam quality factor M^2 is 2.9 and the combination efficiency is 92.0%. By reducing the linewidth and improving the output power of each channel fiber laser or increasing the number of channels, the common aperture SBC output beam can be further scaled with higher output power and higher beam quality.

Key words lasers; fiber lasers; spectral beam combination; dual-grating; high beam quality

OCIS codes 140.3510; 140.3298

1 引 言

近几年随着光纤材料、器件和系统集成技术的进步,在 $1\ \mu\text{m}$ 波段的高功率光纤激光器性能得到了大幅度的提升,连续宽谱单纤激光已能实现 10 kW 单模输出。但受限于非线性效应、光损伤和热效应等问题,进一步提升单纤激光输出功率面临极大的技术挑战,因此采用多纤功率合成成为进一步提升光纤激光输出功率的普遍共识。其中,共孔径光谱合成技术既降低了对合成用的单纤激光线宽、相位等方面的控制要求,也能在提升输出功率的同时保持良好的光束质量水平,已经成为多纤功率合成技术的一个重要发展方向。

基于体布拉格光栅 (VBG 光栅) 和多层电介质膜衍射光栅 (MLD 光栅) 的光谱合成是目前实现共孔径光谱合成的两种主要技术路线。美国中央佛罗里达大学等国外研究机构以及国内的中国工程物理研究院激光聚变研究中心、国防科学技术大学光电科学与工程学院、军械工程学院光学与电子工程系等单位对基于 VBG 光栅的光谱合成进行了研究^[1-7]。2008 年和 2015 年,美国中央佛罗里达大学的 Andrusyak 和中国工程物理研究院激光聚变研究中心的梁小宝等先后利用 VBG 光栅实现了 773 W 和 856 W 的高功率光谱合成输出。但是,大口径超低吸收的高质量 VBG 光栅制作难度较大,而且高功率运转条件下 VBG 光栅热效应将导致光束质量和效率明显退化。近几年研究人员虽然进行了持续的研究,但未见基于 VBG 光栅的光谱合成实现 1 kW 以上的高光束质量输出的报道。美国 Aculight 公司、德国 Fraunhofer 研究所和美国 Lockheed Martin 公司等单位对基于 MLD 光栅的光谱合成进行了深入的研究^[8-12],先后取得了多项令人瞩目的研究成果。2011 年,德国 Fraunhofer 研究所的 Wirth 等^[10]采用 MLD 光栅实现了 4 路 2.1 kW 光子晶体光纤激光的光谱合成,获得了 8.2 kW 的高功率激光输出,不过其合成光束质量并不理想(输出功率为 7.3 kW 时光束质量 $M^2=4.3$)。2012 年,美国 Lockheed Martin 公司的 Honea 等^[11]采用 MLD 光栅实现了 12 路 280 W 光纤激光光束的光谱合成,获得了 3 kW 的高光束质量合成,光束质量 $M^2<1.4$ 。根据 Lockheed Martin 公司 2014 年 1 月的报道,该公司已经实现了 30 kW 高光束质量光谱合成输出。根据公开的文献报道,目前基于 MLD 光栅实现数千瓦高功率光谱合成输出的系统主要采用单 MLD 光栅构型设计,但具有较宽线宽的光束合成后,MLD 光栅的色散将引起合成光束质量的严重退化^[12]。为了获得良好的光谱合成光束质量水平,必须将参与合成的光纤激光的线宽严格控制到 10 GHz 水平,这极大地增加了高功率合成用的窄线宽光纤激光的研制难度。

本文研究了一种双 MLD 光栅色散补偿构型设计的多路窄线宽光纤激光共孔径光谱合成激光器,获得了 9.6 kW 高光束质量共孔径光谱合成激光输出。

2 理论分析

基于双 MLD 光栅色散补偿的光纤激光光谱合成系统原理示意图如图 1 所示,两块 MLD 光栅平行放

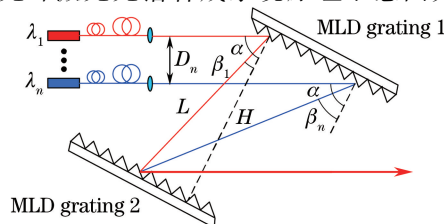


图 1 基于双 MLD 光栅色散补偿的光纤激光光谱合成原理示意图

Fig. 1 Schematic of the dual-MLD-grating dispersion compensation based spectral beam combination of fiber lasers

置,第二块 MLD 光栅将对第一块 MLD 光栅产生的色散进行有效的补偿。中心波长分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 的 N 路窄线宽光纤激光(以下称为“子束”)准直后按照空间等间隔平行入射到第一块 MLD 光栅上,第一块 MLD 光栅的色散使不同波长子束的 1 级衍射光束入射到参数完全相同的第二块 MLD 光栅的相同位置上而产生重叠,而经过第二块 MLD 光栅的衍射后使不同波长子束的输出光束具有相同的出射角度,最终实现多路不同波长子束的共孔径光谱合成输出。第二块 MLD 光栅对第一块 MLD 光栅产生的色散补偿作用,使得子束线宽对输出光束的影响主要体现在增大近场光束尺寸而不是增大远场发散角上,从而较大幅度地降低了系统对具有较宽线宽合成子束的光束质量的退化程度,确保系统合成光束可获得较高的质量水平。另外,为了使子束获得较高的衍射效率,子束的入射角尽量靠近光栅在闪耀波长处的 Littrow 角(通常两者相差小于 3°)。

设子束的初始入射角为 α ,经光栅 1 后的衍射角分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$,则不同波长子束的衍射角必须满足光栅方程

$$d(\sin \alpha + \sin \beta_n) = \lambda_n, n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中 d 为光栅刻线间距。

同时,为了使所有子束经光栅 1 衍射后能在光栅 2 上完全重叠,每路子束的空间排布还需要满足图 1 所示的几何关系,即

$$D_n = H \cos \alpha (\tan \beta_n - \tan \beta_1), n = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

式中 H 为两块光栅的间距(垂直距离)。

记任意一个子束入射光场为 $u(x, y)$,这里 x, y 为垂直于入射光轴的平面上的坐标,并且定义垂直于光栅刻线方向为 x 方向,同时假定:子束光谱结构关于中心 λ_0 对称分布,在子束光谱范围内所有波长的光强空间分布均相同且呈轴对称结构分布。对于图 1 所示的非相干光谱合成系统,当具有一定光谱宽度的光束入射后,原理上双光栅设计不会改变该光束 y 方向的特性,而由双光栅造成的不同波长输出光束远场发散角在 x 方向的变化基本可以忽略,但输出光束在 x 方向近场光斑尺寸会出现扩展,导致子束经双光栅后输出光束的二阶矩束宽变为

$$w^2 = \frac{1}{P} \iint x^2 \rho(\lambda) |u(x + \Delta x, y)|^2 dx dy d\lambda = w_0^2 + \frac{L^2 \cos^2 \alpha}{d^2 \cos^4 \beta} \int \rho(\lambda) (\lambda - \lambda_0)^2 d\lambda, \quad (3)$$

式中 P 为子束光场积分获得的总功率, $\rho(\lambda)$ 为归一化处理后的子束光谱分布, Δx 为输入光束因双光栅色散导致的在 x 方向的一个平移量, w_0 为子束初始的二阶矩束宽, λ_0 为子束中心波长, L 为子束在两块光栅间传输的距离, α 和 β 分别为入射角和衍射角。

由(3)式可获得单路子束经双 MLD 光栅后的光束质量退化为

$$M^2 = \frac{w\theta}{\lambda/\pi} = M_0^2 \sqrt{1 + \frac{L^2 \cos^2 \alpha}{w_0^2 d^2 \cos^4 \beta} \int \rho(\lambda) (\lambda - \lambda_0)^2 d\lambda}, \quad (4)$$

式中 θ 为子束初始的远场发散角, M_0^2 为子束初始光束质量。

对子束光谱进行归一化处理其光谱积分总功率 $\int \rho(\lambda) d\lambda = 1$,因此,用二阶矩定义的子束光谱宽度可表示为

$$(\Delta\lambda)^2 = \frac{\int \rho(\lambda) (\lambda - \lambda_0)^2 d\lambda}{\int \rho(\lambda) d\lambda} = \int \rho(\lambda) (\lambda - \lambda_0)^2 d\lambda, \quad (5)$$

则有

$$M^2 = M_0^2 \sqrt{1 + \left(\frac{L \Delta\lambda \cos \alpha}{d w_0 \cos^2 \beta} \right)^2}. \quad (6)$$

基于以上模型可对双 MLD 光栅光谱合成系统的参数进行设计,并对合成输出光束质量水平进行理论分析和评估。

图 2 为两种光栅刻线密度(分别为 1200 lp/mm 和 1700 lp/mm)下 30 路子束合成时对应的工作波长分

布情况的理论计算结果,计算数据表明,子束波长间隔分布表现为短波长偏大、长波长偏小的特点,并且较低刻线密度光栅的子束波长分布更加均匀。图2计算条件为:波长范围为1040~1080 nm,子束间距为8 mm,MLD光栅的刻线密度分别取为1200 lp/mm和1700 lp/mm,入射角分别与光栅在1060 nm处的Littrow角相差3°。在实际合成系统中,采用较低刻线密度光栅有利于减少各子束波长间隔的差异,同时子束工作波长的选择受到有源光纤的高效增益波段范围和MLD光栅高效衍射带宽的限制,本文将合成系统的子束工作波长范围设定为1055~1070 nm。

图3为两种光栅刻线密度下10路子束经过合成系统后的光束质量退化情况的理论计算结果。图3计算条件为:波长范围为1055~1070 nm,子束初始光束质量 M_0^2 为1.5,子束二阶矩线宽 $\Delta\lambda$ 为0.5 nm,子束初始二阶矩束宽 w_0 为2 mm,其他计算条件同图2。图3的理论计算表明,子束光束质量退化长波长段要大于短波长段,若采用较高刻线密度的光栅其差异更明显。在实际的合成系统中,光栅色散的选择需要兼顾考虑合成输出光束质量水平和系统紧凑性要求。另外,由于每路子束光轴指向性、中心波长漂移等差异也会影响光谱合成输出光束的质量水平,因此在实际系统中也需要对于每路子束光轴指向性、中心波长漂移等进行有效的控制。

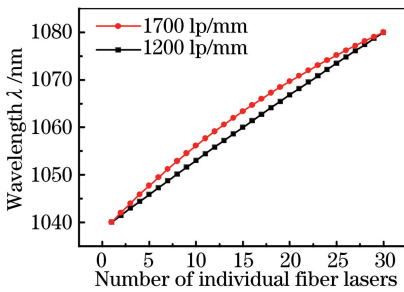


图2 两种不同光栅刻线密度下工作波长分布情况

Fig. 2 Distribution of the working wavelength of the individual fiber lasers for two different grooved density grating configurations

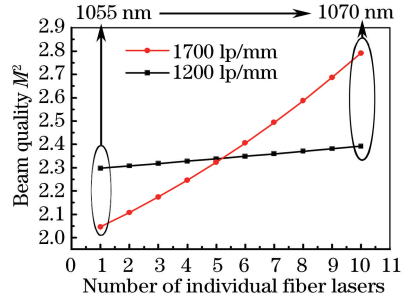


图3 两种不同光栅刻线密度下不同子束光束质量退化情况

Fig. 3 Degradation of the beam quality of the individual fiber lasers for two different grooved density grating configurations

3 实验装置

搭建的实验装置结构如图4所示,该装置主要由中心波长从1055 nm到1070 nm的10路千瓦级全光纤结构的高功率窄谱子束光纤激光器和两组双MLD光栅光谱合成单元组成,10路子束工作的中心波长平均间隔约为1.6 nm,每路子束束宽约为2 mm。其中,每路子束光纤激光器采用主振荡功率放大器(MOPA)设计,MOPA是由基于窄带光纤布拉格光栅(FBG)的窄线宽振荡器和一级功率放大器构成,每路的输出功率大于1 kW,输出光束质量 $M_0^2 < 1.6$ 。双MLD光栅光谱合成单元选用了偏振相关MLD光栅,其刻线密度为1740 lp/mm,在1 μm 波段近15 nm范围内可以保持约98%的平均衍射效率。10路不同中心波长的子束激光准直后通过多个棱镜拼接方式实现密集组束排布,相邻子束中心间隔约为8 mm。密集组束后的光束随后利用偏振镜 P_1 将其分为偏振态分别为p和s的两束偏振激光,然后分别通过扩束单元将光束进行适当扩展。扩展后的s偏振光注入双MLD光栅光谱组束单元实现共孔径光谱合成。另一路p偏振光先通过90°石英旋光片旋转为s偏振光后再注入双MLD光栅光谱组束单元实现共孔径光谱合成,随后再通过90°石英旋光片将合成后的s偏振光旋转为p偏振光,最后通过偏振镜 P_2 实现两组光谱合成激光的共孔径偏振合束输出。

4 实验结果与分析

实验中,利用日本YOKOGAWA公司的AQ6370光谱仪测试合成子束激光的光谱和线宽特性,利用自研的一套光瞳光轴探测装置来记录和判断各路子束近场和远场状态数据,利用美国Spiricon公司的 M^2 -200测试仪器来测试子束激光以及光谱合成和偏振合束后光束的质量水平,利用以色列Ophir公司的NOVA II/FL500A型功率计测试激光的输出功率水平。

每路子束实际光谱形态并非理想对称的高斯分布,而且由于子束设计、集成工艺等方面的差异,每路子

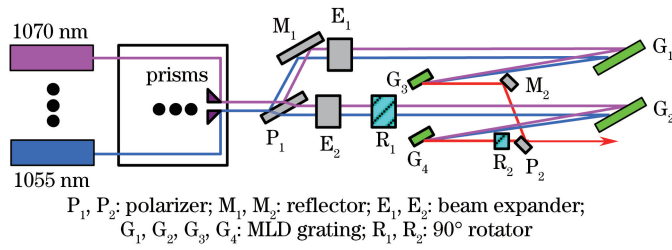


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of the experiment setup

束输出的线宽和光谱结构不尽相同。如果采用常用的 3 dB 线宽表征光谱合成系统中子束的光谱特性,则难以反映出 3 dB 线宽外具有一定光功率比例的光谱成分对光谱合成输出总光束质量的影响。图(5)所示的两种光谱结构的子束 3 dB 线宽均为 0.28 nm,但当其分别注入双 ML D 光栅光谱合成单元后,发现具有图 5(a)所示光谱结构的子束的光束质量退化了约 1.5 倍(由 $M_0^2=1.3$ 退化到 $M^2=2.0$),而图 5(b)所示子束的光束质量则退化了约 2.4 倍(由 $M_0^2=1.8$ 退化到 $M^2=4.3$)。通过研究子束光谱数据发现,图 5(b)所示的子束位于 3 dB 线宽外的光谱成分所占功率 η 比图 5(a)所示的子束多约 7%,这是导致其出现更严重的光束质量退化的主要原因。

如果采用二阶矩线宽表征光谱合成系统中子束的光谱特性,则能更全面地反映有效光谱范围内的光谱信息,从而能更准确地评估不同线宽子束通过双 ML D 光栅光谱合成单元后光束质量的退化程度。图 5(a)、(b)所示的两种子束激光的二阶矩线宽分别为 0.42 nm、0.50 nm。采用该线宽值利用(6)式估算的两子束经双 ML D 光栅光谱合成单元后的光束质量退化程度分别约为 1.6 倍和 2.1 倍,基本与实验结果相吻合。因此,建议将二阶矩线宽作为评估光谱合成系统中合成子束的线宽评价标准。

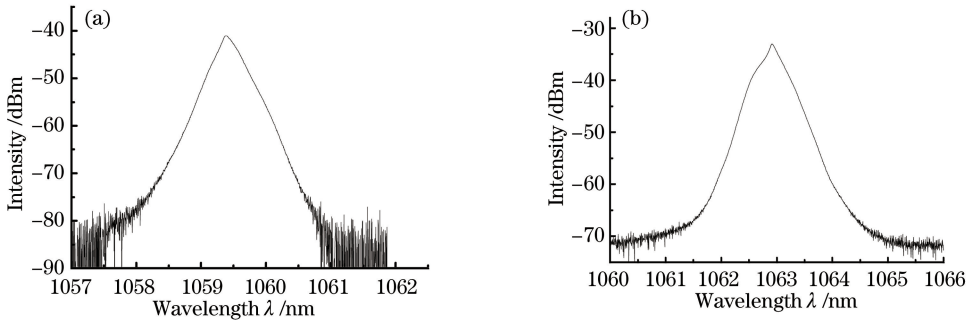


图 5 具有相同 3 dB 线宽的两种子束激光注入双 ML D 光栅光谱合成单元前的光谱形态。(a) $\eta=42\%$; (b) $\eta=49\%$

Fig. 5 Spectral profiles of two sub-beams with the same 3 dB linewidth before dual-ML D-grating.

(a) $\eta=42\%$; (b) $\eta=49\%$

理论分析和实验研究表明,FBG 振荡器输出的种子光在子束放大器中引起光谱展宽的主要物理机制是多纵模输出之间的四波混频(FWM)效应,子束输出光谱二阶矩线宽与纵模数量近似呈线性关系^[13]。另外,子束多纵模结构的光学拍容易引起受激拉曼散射(SRS)阈值的降低和输出强度的强烈抖动,且纵模个数越多,光学拍强度抖动越剧烈。因此,子束振荡器采用了少纵模的结构设计,结合放大器光纤直径和长度等参数的优化,10 路合成子束在千瓦级功率输出时的二阶矩线宽基本控制在 0.6 nm 以内,SRS 抑制比优于 28 dB。后续可以通过选用高边模抑制比的窄带 FBG 光栅,进一步降低振荡器线宽和纵模数量来优化子束放大器输出光谱,但少纵模的设计还需要进一步权衡对放大器受激布里渊散射(SBS)阈值的影响。另外,子束也可以采用基于单频种子源相位调制的设计来避免放大器中光谱的显著展宽。

通过对子束拼接组束棱镜、双 ML D 光栅等的精细调谐和参数优化,实现了 10 路窄谱子束的共孔径高光束质量光谱合成输出,当子束激光总注入功率达到 10.4 kW 时,共孔径光谱合成输出功率最高达到 9.6 kW,合成效率达到 92.0%,光束质量 M^2 为 2.9。子束拼接后的近场光斑形态如图 6(a)所示,当合成系统输出功率分别在 30.0 W、4.3 kW 和 9.6 kW 时输出光束远场形态分别如图 6(b)、(c)、(d)所示,可以看出,

在中低功率水平,该系统光斑形态良好,但在 9.6 kW 的高功率条件下运行时,由于散射光对扩束镜镜架上下两端的加热作用,光斑远场 y 方向产生了热畸变,通过改进镜架的装夹设计可以解决这一问题。在 30.0 W、4.3 kW 和 9.6 kW 三种不同功率水平下光谱合成输出光束质量 M^2 分别为 1.3、2.3 和 2.9,随着输出功率的提升,光束质量水平不断降低,其主要原因为子束线宽随着输出功率的提升也逐步增大,当系统达到最大输出功率 9.6 kW 时,每路子束输出的二阶矩线宽基本在 0.5~0.6 nm。根据该线宽数据理论计算获得的光束质量值与实验测量获得的数据基本吻合。进一步的理论模拟分析表明:如果子束光束质量 $M_0^2 < 1.5$,同时将子束二阶矩线宽控制在 0.3 nm 以内,则光谱合成输出光束质量可进一步提升到近 2 倍衍射极限。

目前,该实验装置的输出功率主要受限于合成子束的输出功率和合成路数,增加合成子束的功率或合成路数均可进一步提升系统的输出功率,其中,提升合成子束功率将给予束线宽控制带来较大的技术难度。而当系统输出功率进一步提高时,为了有效降低系统中的透射式光学元件对激光的吸收、热畸变等热效应造成的不利影响,一方面可以采用选择超低吸收的高纯石英材料作为光学元件基材,扩展光学元件上光斑尺寸以降低功率密度等技术措施;另一方面,也可以直接采用耐强光的偏振无关 MLD 光栅进行光谱合成来减少透射式偏振元件的使用。

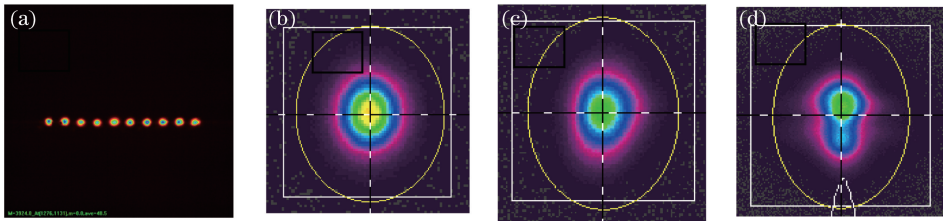


图 6 合成光束光斑分布图。(a)10 路子束激光通过棱镜组束后的光斑近场分布;(b)、(c)、(d)分别为 30.0 W、4.3 kW、9.6 kW 光谱合成后光斑远场分布

Fig. 6 Spot profiles of the combined laser beam. (a) Near field of the 10-channel fiber lasers through prisms; (b), (c), (d) far fields of the spectral combined beam at 30.0 W, 4.3 kW, 9.6 kW, respectively

5 结 论

对基于多路窄线宽光纤激光的双 MLD 光栅光谱合成光源进行了理论和实验研究,合成子束振荡器采用少纵模结构设计,较好地控制了高功率条件下的输出线宽。通过对系统参数的优化设计和精细装调,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。通过更严格地控制合成子束的线宽和提升子束功率或增加合成路数,可以获得更高功率和更高光束质量水平的共孔径激光输出。同时,研究表明,合成子束的光谱结构将对光谱合成系统输出光束质量造成显著影响,采用常用的 3 dB 线宽定义难以反映出 3 dB 线宽外具有一定光功率比例的光谱成分对光谱合成输出总光束质量的影响,采用二阶矩线宽定义可以更准确有效地评估子束线宽水平对光谱合成输出光束质量的影响。

参 考 文 献

- 1 Andrusyak O, Ciapurin I, Smirnov V, *et al.* External and common-cavity high spectral density beam combining of high power fiber lasers[C]. SPIE, 2008, 6873: 687314.
- 2 Andrusyak O, Smirnov V, Venus G, *et al.* Spectral combining and coherent coupling of lasers by volume Bragg gratings [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15(2): 344-353.
- 3 Ott D, Divliansky I, Anderson B, *et al.* Scaling the spectral beam combining channels in a multiplexed volume Bragg grating[J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29620-29627.
- 4 Drachenberg D R, Andrusyak O, Venus G, *et al.* Thermal tuning of volume Bragg gratings for spectral beam combining of high-power fiber lasers[J]. Applied Optics, 2014, 53(6): 1242-1246.
- 5 Pu Shibing, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun. Numerical analysis of spectral beam combining by volume Bragg grating[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(5): 721-724.

- 蒲世兵, 姜宗福, 许晓军. 基于体布拉格光栅的光谱合成的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(5): 721-724.
- 6 Wang Junzhen, Wang Yuefeng, Bai Huijun. Study on multi-channel spectral beam combined characteristics based on volume Bragg gratings[J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 593-596.
王军阵, 汪岳峰, 白慧君. 多路激光体布拉格光栅光谱合成特性研究[J]. 激光技术, 2012, 36(5): 593-596.
- 7 Liang Xiaobao, Chen Liangming, Li Chao, *et al.* High average power spectral beam combining employing volume Bragg gratings[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(7): 071012.
梁小宝, 陈良明, 李超, 等. 体布拉格光栅用于高功率光谱组束的研究[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(7): 071012.
- 8 Madasamy P, Loftus T, Thomas A, *et al.* Comparison of spectral beam combining approaches for high power fiber laser systems[C]. SPIE, 2008, 6952: 695207.
- 9 Loftus T H, Thomas A M, Hoffman P R, *et al.* Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2007, 13(3): 487-497.
- 10 Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, *et al.* High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW [J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3118-3120.
- 11 Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, *et al.* Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency and brightness[C]. SPIE, 2012, 8547: 854706.
- 12 Tian F, Yan H, Chen L, *et al.* Investigation on the influence of spectral linewidth broadening on beam quality in spectral beam combination[C]. SPIE, 2014, 9255: 92553N.
- 13 Huang Z H, Liang X B, Li C Y, *et al.* Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrow-linewidth multilongitudinal-mode oscillators[J]. Applied Optics, 2016, 55(2): 297-302.