

高功率光纤激光光谱合成技术的研究进展

郑也^{1,2}, 杨依枫¹, 赵翔^{1,2}, 公维超^{1,2}, 柏刚^{1,2}, 张璟璞^{1,2}, 刘恺^{1,2},
陈晓龙¹, 赵纯¹, 漆云凤¹, 晋云霞¹, 何兵^{1,3}, 周军^{1,3,4}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038;

⁴南京中科神光科技有限公司, 江苏 南京 210038

摘要 受热损伤和非线性效应等因素的制约, 单个光纤激光器的单模输出功率受到限制。将多个光纤激光器的输出通过一定的方式进行光束合成, 是实现更高功率激光输出的必然选择。介绍了光谱合成技术的发展历程和研究现状, 给出了几类常见光谱合成系统的基本原理、关键要素和优缺点。介绍了中国科学院上海光学精密机械研究所在窄线宽光纤激光及其光谱合成方面的最新进展, 并对高功率光纤激光光谱合成技术的发展前景进行了展望。

关键词 激光技术; 光纤激光器; 光谱合成; 衍射光栅

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201002

Research Progress on Spectral Beam Combining Technology of High-Power Fiber Lasers

Zheng Ye^{1,2}, Yang Yifeng¹, Zhao Xiang^{1,2}, Gong Weichao^{1,2}, Bai Gang^{1,2}, Zhang Jingpu^{1,2},
Liu Kai^{1,2}, Chen Xiaolong¹, Zhao Chun¹, Qi Yunfeng¹,
Jin Yunxia¹, He Bing^{1,3}, Zhou Jun^{1,3,4}

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing, Jiangsu 210038, China;

⁴Nanjing Zhongke Shengguang Technology Co. Ltd., Nanjing, Jiangsu 210038, China

Abstract Constrained by such factors as thermal damages and nonlinear effects, the single-mode output power of one single fiber lasers is limited. Spectral beam combining technology to integrate different laser outputs based on some means is believed to be an inevitable choice to achieve high power laser output. The development process and current status of spectral beam combining technology are introduced and the basic principle, key factors, advantages and disadvantages of several common kinds of spectral beam combining systems are presented. The latest progresses on narrow linewidth high power fiber laser and its spectral beam combining in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, are also introduced, and the development prospects of spectral beam combining technology of high power fiber lasers are prospected.

收稿日期: 2016-09-14; 收到修改稿日期: 2016-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(U1330134, 61308024)、科技部重点专项(2016YFB0402201)、上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200)、江苏省科技支撑计划(BE2014001)、江苏省重点研发计划(BE2016005-4)

作者简介: 郑也(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光光谱合成技术方面的研究。

E-mail: zhengye.nol@163.com

导师简介: 周军(1972—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率光纤激光器和准分子激光器方面的研究。

E-mail: junzhousd@siom.ac.cn(通信联系人)

Key words laser technique; fiber lasers; spectral beam combining; diffraction grating

OCIS codes 140.3510; 140.3280; 140.3298; 050.1950

1 引 言

自半导体激光抽运技术和双包层光纤问世以来,光纤激光技术发展迅速,已广泛应用于各个领域。与常规全固态激光器相比,光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、热管理方便、结构紧凑等优点,在民用和国防领域均获得了长足发展^[1-3]。然而,受介质非线性效应、光纤端面损伤、热致损伤以及模式不稳定性等因素的制约,单个光纤激光器的输出功率存在理论极限^[4-6]。光纤激光器合成技术可以突破这些极限,它可以使多路激光束叠加,在提高激光输出功率的同时保证优良的光束质量^[7-11]。近年来,光纤激光及其合成技术已成为激光技术领域的研究热点之一。目前,主流的合成方法分为非相干功率合成、主动相干合成、被动相干合成和非相干光谱合成。基于空间光束拼接的非相干合成采用自适应转向镜阵列实现光束的拼接,可使子光束阵列会聚于目标上。运用此方法可得到目前合成技术的最高输出功率,但无法实现亮度的提升^[12]。采用光纤信号合束器的合成方式是另一种非相干功率合成方式,其环境稳定性较好,但由于一般输出尾纤纤芯的尺寸较大,光束质量较差^[13]。主动相干合成即通过相位控制的方法使各路光纤激光器达到一致的相位,并在远场实现相干;由于艾里斑相比子光束尺寸较小,因此可实现输出亮度的大幅提升^[14-22]。被动相干合成一般采用全光反馈环型腔结构,通过单模光纤滤波器进行相位滤波,使同相光腔内损耗最小;通过此种自组织的相位选择方式得到各路光纤激光器的相位锁定,远场亮度同样得到大幅提升^[23-26]。光谱合成即采用一块或多块衍射光栅将多路子光束衍射至同一孔径内,从而实现单一孔径输出,得到较好的光束质量。光谱合成技术对相位没有要求,无需复杂的相位控制机制,其结构简单稳定,具有重要的应用价值^[27-30]。

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的研究^[31-52]。本文着重介绍了光谱合成技术的发展历程和最新进展,对各类光谱合成技术的光学系统结构、衍射元件类型、光源类型以及优缺点进行了对比分析,展望了光谱合成技术的发展方向,并对百千瓦及以上功率的高亮度光谱合成方案作出了预判。

2 窄线宽光纤激光器最新研究进展

光谱合成技术的基本构成部分包括高功率光纤激光光源、衍射光栅、光束拼接系统和自适应光束指向系统。高功率光纤激光光源采用主振荡功率放大(MOPA)结构将窄线宽种子进行高能量放大,在放大的过程中涉及模式、线宽、偏振、波长等一系列输出特性的变化,因此窄线宽光纤光源的光谱、光束质量和功率等特性决定了光谱合成的效果。受制于合成光光束质量,光谱合成一般要求光源的光谱宽度小于 100 pm,因此获得多波长、近衍射极限输出的高功率、窄线宽光纤激光光源是光谱合成中的关键技术之一。在窄线宽光纤光源主振荡的高功率级联放大过程中,自相位调制(SPM)、四波混频(FWM)、交叉相位调制(XPM)等非线性效应一般会引入频率转换,造成输出光线宽展宽从而降低合成光束质量,因此减少放大过程中的线宽展宽、获得符合光谱合成要求的线宽输出是该技术的难点。国内外研究机构对窄线宽激光器进行了大量的研究并取得了显著的成果^[53-71]。2007年,美国康宁公司报道获得了 502 W 的单频激光输出,光束质量因子为 1.4,采用的主放级增益光纤的纤芯直径为 20 μm ^[57]。同年,南安普顿大学采用纤芯直径为 25 μm 的保偏光纤,获得了线宽为 60 kHz、光束质量因子为 1.1、输出功率为 402 W 的激光输出;同时,采用纤芯直径为 43 μm 的非保偏光纤,获得了光束质量因子为 1.6、输出功率为 511 W 的单频激光输出^[58]。2009年,美国诺格公司采用纤芯直径为 25 μm 的光纤,获得了线宽小于 5 MHz、光束质量因子为 1.05 ± 0.03 、输出功率为 608 W 的激光输出^[59]。2010年,Nufern公司采用 25 μm 芯径非保偏光纤,获得了线宽为 3.5 GHz、输出功率为 1 kW 的窄线宽光纤激光器^[60]。2011年,美国 Fibertek 公司报道获得了输出功率为 1 kW、光束质量因子为 1.4、线宽为 450 MHz 的激光输出,所采用的主放级增益光纤的纤芯直径为 35 μm ^[61]。2014年,美国空军实验室报道了采用声场和增益裁剪的光子晶体光纤来抑制受激布里渊散射(SBS),实现了 811 W 的单频激光输出^[62];随后采用伪随机序列进行相位调制,实现了线宽为 3 GHz、光束质量因子为 1.2、输出功率为 1.17 kW 的激光输出^[63]。2015年,德国耶拿大学通过白噪声相位调制展宽种子激光线宽方法,获得了 2.3 kW 的近衍射极限激光输出,其线宽为 45 GHz,光-光转换效率达到了 87%,并且在最高输出功率时,两

个方向的光束质量因子稳定在 1.3 和 1.15^[64]。2016 年,IPG 公司实现了中心波长在 1030~1070 nm 内、输出功率大于 1.5 kW、线宽小于 15 GHz、光束质量因子小于 1.1、插拔效率达到 40% 的整机化窄线宽光纤激光器^[65]。2016 年,美国空军实验室报道了通过伪随机序列相位调制的方案实现线宽为 3.5 GHz、输出功率为 1 kW、中心波长为 1034 nm 的激光输出,这对短波长窄线宽高功率光纤激光器的研究有着重要的指导意义^[66];随后采用两个相位调制种子源的增益竞争,得到了可用于光束合成的线宽为 2.5 GHz、输出功率为 1 kW 的激光输出结果^[67]。2016 年,耶拿大学采用自主研制的大芯径 24.5 μm 的光纤,并利用空间结构获得了线宽为 45 GHz、光束质量因子为 1.3、输出功率为 3 kW 的激光输出^[68]。2016 年,国防科技大学报道了 1.89 kW 的激光输出,线宽为 45 GHz^[69]。中科院上海光学精密机械研究所(SIOM)也在 2016 年分别实现了线宽为 11.6 GHz、输出功率为 1.5 kW 的激光输出以及线宽小于 50 GHz、输出功率为 2.5 kW 的激光输出,且光束质量接近衍射极限^[70-71]。国内外主流研究机构对光谱合成高功率窄线宽光纤激光光源的研究进展总结见表 1。

表 1 高功率窄线宽光纤激光器的发展

Table 1 Progress of high-power narrow-linewidth fiber lasers

Year	Research department	Output power	Linewidth
2007	Corning	502 W	Single frequency
2007	University of Southampton	402 W	60 kHz
2007	University of Southampton	511 W	Single frequency
2009	Northrop Grumman Aerospace Systems	608 W	5 MHz
2010	Nufern	1 kW	3.5 GHz
2011	Fibertek	1 kW	450 MHz
2014	Air Force Research Laboratory	811 W	Single frequency
2014	Air Force Research Laboratory	1.17 kW	3 GHz
2015	Friedrich Schiller University Jena	2.3 kW	45 GHz
2016	IPG	>1.5 kW	<15 GHz
2016	Air Force Research Laboratory	1 kW	3.5 GHz
2016	Air Force Research Laboratory	1 kW	2.5 GHz
2016	Friedrich Schiller University Jena	3 kW	45 GHz
2016	National University of Defense Technology	1.89 kW	45 GHz
2016	SIOM	1.5 kW	11.6 GHz
2016	SIOM	2.5 kW	<50 GHz

3 光谱合成技术发展现状和研究进展

光谱合成过程实际上是色散的逆过程,其利用色散元件,将以不同角度入射到色散元件表面的多波长光束以相同的角度出射,形成共孔径输出。光谱合成技术中可能用到的色散元件包括棱镜、双色片(DM)、体布拉格光栅(VBG)、多层电介质衍射光栅(MLDG)。因此,根据色散元件的不同,光谱合成技术可分为棱镜合成技术、DM 合成技术、VBG 合成技术和 MLDG 合成技术,现对各种光谱合成技术进行详细的介绍。

3.1 棱镜合成技术

棱镜是最为常见的一种色散元件,多波长激光以相同入射角通过色散棱镜时,折射率的不同会导致它们的折射角不同。如果适当调节各个入射光的入射角度,使各路激光以相同的折射角出射,就可以实现多波长光束的共孔径合成,棱镜光谱合成的示意图如图 1 所示,其中 λ 为波长。

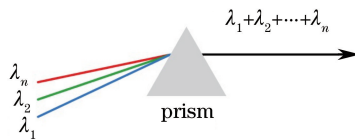


图 1 基于棱镜的光谱合成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of prism-based spectral beam combining

大量美国专利公开报道了基于棱镜光谱合成的技术^[72-75]。2013 年,von Elm 等^[72]利用棱镜光谱合成原理发明了一种多波长激光光束器,如图 2 所示。P₁~P₅ 为光束导引棱镜组,将不同波长的光以不同的角度入射到合成棱镜 P_w 上,最终从 P_w 共孔径输出。

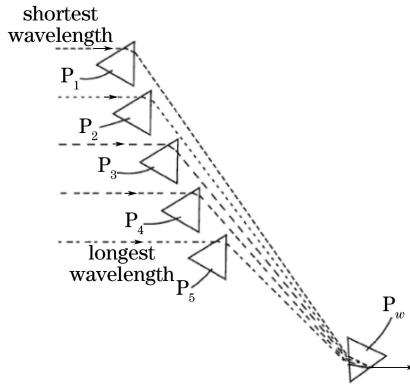


图 2 基于棱镜的合束器^[72]

Fig. 2 Prism-based combiner^[72]

基于棱镜的光束合成是一种结构简单的光谱合成技术,其抗激光损伤阈值很高,产生的杂散光较少,合成效率较高,比较适合于高功率情况下的应用。但是,由于棱镜的色散与其顶角和材料折射率相关,通常情况下色散较弱,难以分辨波长间隔为纳米量级的窄线宽激光,因此阵列规模扩展性较差,目前应用较少。

3.2 DM 合成技术

DM 合成技术基于镀膜 DM 的波长选择特性,允许一定带宽范围内的光高效率透射,同时允许另外一定带宽范围内的波长高效率反射,从而实现两路光束的合成。对镀膜特性进行特殊的控制并采用多个 DM 级联,可以实现多光束的合成。干涉滤光片是 DM 的一种,它的透射谱边沿陡峭,可以实现波长间隔较小的两束光的合成,因此干涉滤光片较多应用于光谱合成技术中。德国耶拿大学于 2009 年以干涉滤光片作为合成元件完成了四束光的合成,如图 3 所示^[38]。图 3(b)展示了干涉滤光片的透射谱,可以看出其在 1064 nm 附近具有约 3 nm 的透射带,边沿十分陡峭,在 1060 nm 以及 1068 nm 处透射率几乎为 0。DM 合成技术是一种结构简单的光谱合成技术,DM 没有色散功能,因此不会引起光束质量的退化。阵列规模扩展要求 DM 透射谱更窄、边沿更陡峭,这对 DM 的膜系设计和镀膜技术都提出了非常高的要求。该方案的系统结构相对简单,特别是对单路光源的光谱带宽特性要求较低,从而单路光源可实现高功率的激光输出。因此,随着光学镀膜技术的突破,基于 DM 的光谱合成技术在工程实际中将获得重要应用。

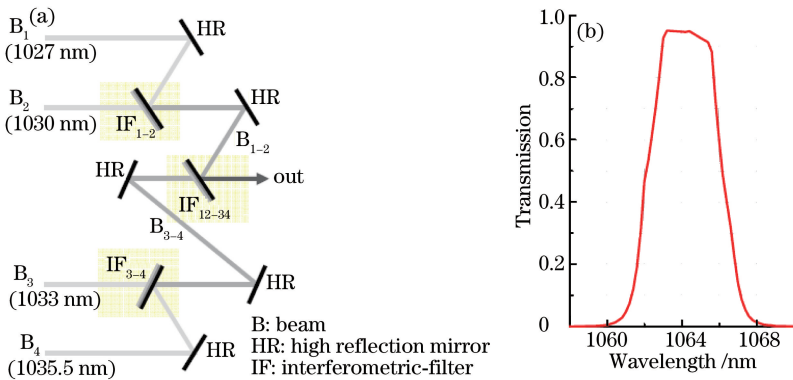


图 3 (a)基于干涉滤光片的光谱合成示意图;(b)干涉滤光片的透射谱^[38]

Fig. 3 (a) Schematic diagram of interferometric-filter-based spectral beam combining;

(b) transmission spectrum of interferometric-filter^[38]

3.3 VBG 合成技术

随着衍射元件制作工艺的发展,新型色散元件不断涌现,VBG 和反射式衍射光栅作为其中的佼佼者,具有较高的色散性能,逐渐得到了研究人员的青睐,已应用于多路高功率激光光谱合成的探索实验中。其中,利用光热折变(PTR)玻璃制作的 VBG 具有很高的光谱分辨本领,在光谱合成领域获得关注。

VBG 的工作原理:当入射光波长和角度满足布拉格条件($\lambda = \lambda_{\text{Bragg}}$)时,衍射效率为近似于 1 的最大值,而对于其他偏离布拉格条件的波长而言,衍射效率近似为 0。VBG 合成原理示意图如图 4 所示,当两束具

有一定波长差的光束以共轭的角度入射至光栅并在光栅上发生光斑重叠时,如果其中一束光 λ_1 满足布拉格条件 ($\lambda_1 = \lambda_{\text{Bragg}}$) 而另一束光 λ_2 在光栅上的衍射效率为 0 ($\lambda_2 = \lambda_{\text{Bragg}} \pm \Delta\lambda$), 那么波长为 λ_1 的光束将以最大衍射效率发生衍射, 而波长为 λ_2 的光束将透射经过光栅。这样, 波长为 λ_1 和 λ_2 的两束光经过光栅作用后共孔径输出, 即实现了两束光的光谱合成。以此类推, 当存在 N 个中心波长不同的 VBG 时, 即可实现 $N+1$ 路不同波长光束的光谱合成。合理设计 VBG 的布拉格结构, 有望实现较窄线宽的谐振波长范围, 通过级联多个 VBG 可以实现大规模光束阵列的光谱合成。

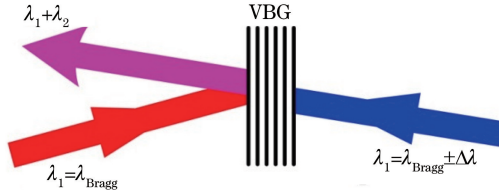


图 4 基于反射式 VBG 的光谱合成示意图

Fig. 4 Schematic diagram of reflective-VBG-based spectral beam combining

从 2003 年开始, 有关研究机构报道了一系列采用在 PTR 玻璃中制作的 VBG 作为合成元件开展光纤激光器光谱合成的研究工作^[32]。2008 年, 中佛罗里达大学采用此种光栅将 5 路光纤激光器进行光谱合成, 如图 5 所示。采用 4 块 VBG 级联成多路光束, 各路平均波长间隔为 0.494 nm, 最终实现了大于 750 W 的输出功率, 衍射效率大于 93%, 光束质量因子为 1.11^[35]。图 6 给出了该团队所采用的 VBG 的光谱衍射效率图, 高透射率窗口宽度小于 0.4 nm, 可以对参与合成的子光束波长进行精确选择, 从而保证高合成阵列规模。2015 年, 中国工程物理研究院使用透射型 VBG 对两路光纤激光进行合成, 实现了 856 W 的合成功率, 总的合成效率为 73.7%, 然而合成光束的横向质量因子为 7.9, 纵向质量因子为 2.7, 合成后激光的光束质量不是非常理想^[46]。

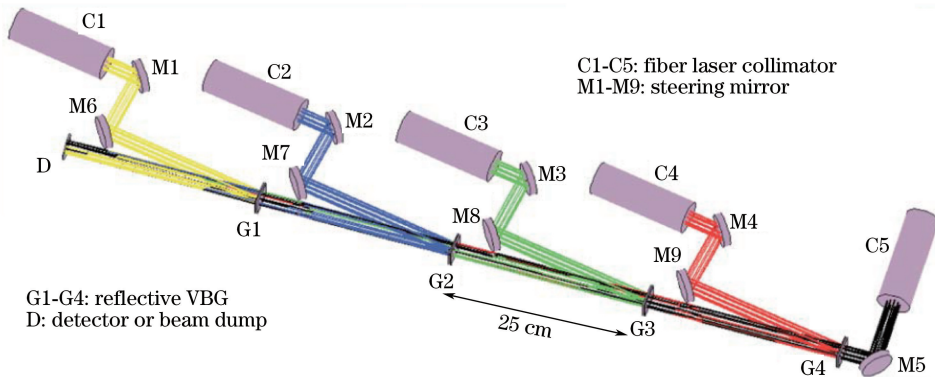


图 5 5 路基于 VBG 的光谱合成示意图^[35]

Fig. 5 Schematic diagram of 5-channel VBG-based spectral beam combining^[35]

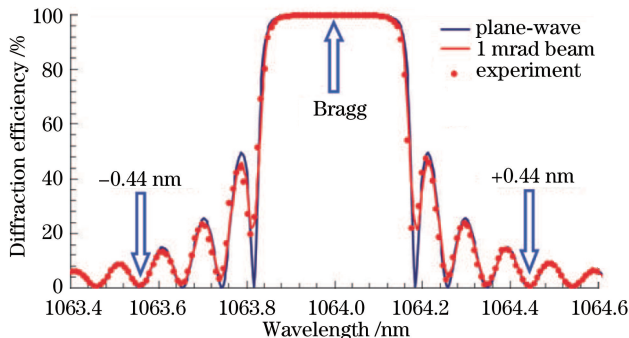


图 6 反射式 VBG 衍射光谱选择特性^[35]

Fig. 6 Diffraction spectral selectivity characteristic of reflective VBG^[35]

已经报道的采用 VBG 进行光谱合成的结果证明了 VBG 可实现紧密排布、高效率、高光束质量的光谱合成。但是作为一种透射式光谱合成元件,VBG 具有天然的缺陷,即子光束直接穿过合成元件,材料本底吸收导致的热效应会使合成光束发生波前畸变、合成效率下降。同时,在高功率激光入射时,由于 PTR 玻璃对激光能量的吸收,VBG 的谐振波长会发生漂移,因此需要在光栅制作时事先考虑漂移量或者在系统装配时调整光源波长和入射角度,这大大降低了其在高功率下的适用性。目前 VBG 合成技术的最大输出功率还停留在数百瓦的水平,实现功率超数千瓦的目标还有很长的路要走。

3.4 MLDG 合成技术

MLDG 是一种反射式衍射光栅,其合成技术原理如图 7 所示,不同波长光分别从特定方向入射至光栅同一点,然后以同样的衍射角度出射,形成多路入射激光光谱合成。

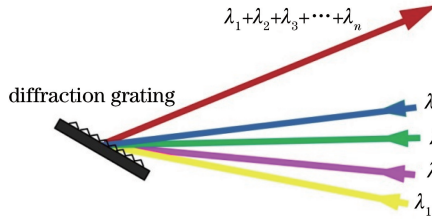


图 7 基于衍射光栅的光谱合成示意图

Fig. 7 Schematic diagram of diffraction-grating-based spectral beam combining

MLDG 合成基于平面衍射光栅的光栅方程为

$$d(\sin \theta + \sin \varphi) = m\lambda, \tag{1}$$

式中 θ 和 φ 分别为入射角和衍射角, d 为光栅常数, m 为衍射级次, λ 为入射光波长。

当 θ 和 φ 相等时,光栅方程演化为

$$2d \sin \theta = m\lambda, \tag{2}$$

此时的 θ 称为特定波长的 Littrow 角,某一波长的光以 Littrow 角入射时,衍射光沿原路返回。由于光栅的衍射主峰有一定的宽度,因此与衍射峰中心波长相差不大的其他波长,也可以在光栅上获得很高的衍射效率。若不同波长的入射光在衍射光栅相应的 Littrow 角附近入射,则入射光阵列有可能合并为同一光束,这是反射衍射光栅光谱合成的理论基础。

MLDG 是光谱合成的核心器件,它可以在较宽波长范围内满足高衍射效率的要求,同时具有相对较高的抗光损伤阈值^[76-77],目前数千瓦甚至以上激光功率的光纤激光光谱合成报道均采用 MLDG 作为合成元件。基于 MLDG 的光纤激光光谱合成技术,从实现方式上主要分以下几种。

1) 振荡式单路激光的单光栅线型腔光谱合成技术

振荡式单路激光的单光栅线型腔光谱合成方案如图 8 所示。入射激光阵列在转换透镜的焦平面上紧密排布,转换透镜将光纤端出射的发散光束准直并将其以特定的角度入射到位于共轭焦面上的衍射光栅表面,部分输出镜与入射激光阵列一端的全反镜构成整个谐振腔,当达到阈值时,部分反射镜输出一束包含不同波长分量的光。在此系统中,衍射光栅既是合成元件,也是腔内选模元件。

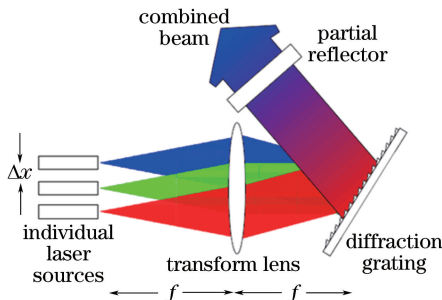


图 8 单光栅线型腔光谱合成示意图

Fig. 8 Schematic diagram of spectral beam combining based on single grating with linear cavity configuration

这种方案比较适合于大规模阵列的合成,入射激光阵列和衍射光栅分别位于透镜的前、后焦平面处,衍射光栅后有一部分反射镜为系统提供反馈,形成激光振荡,输出相应波长的激光。各路入射激光的波长最终取决于各自的位置,波长间隔由激光发射器间距决定,即

$$\Delta\lambda = \frac{(\Delta x) d \cos \theta_g}{f}, \quad (3)$$

式中 Δx 为入射激光阵列中两激光束的间距, θ_g 为衍射角, f 为透镜焦距。通过发射器密集排列在 V 型槽上的设计, Δx 可以很小,这样相邻激光束的波长间隔就会很小,从而在一定的带宽内就能添加更多发射器,从而有效地增加了阵列扩展性能。

外腔光谱合成技术在多个激光二极管单元激光合成上的应用非常广泛^[50-52]。早在 2000 年, Daneu 等^[50]就实现了 11 路、宽带条二极管阵列的光谱合成,获得了 20 倍衍射极限的输出,实验原理图如图 9 所示,这也拉开了国内外研究机构对半导体激光阵列光谱合成广泛研究的序幕。

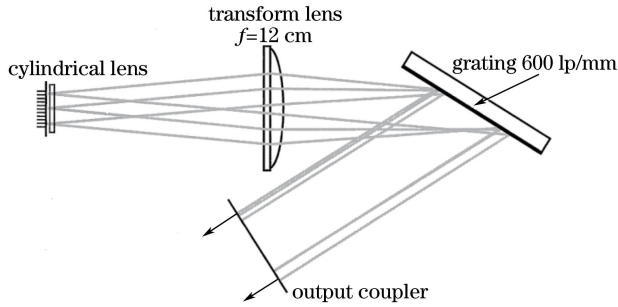


图 9 激光二极管阵列外腔光谱合成示意图^[50]

Fig. 9 Schematic diagram of spectral beam combining of diode laser array in an external cavity^[50]

光纤激光器光谱合成与二极管光谱合成几乎同时起步,早在 1999 年, Cook 等^[31]就已经进行了验证性实验,如图 10 所示。采用一块刻槽密度为 1200 lp/mm 的金属光栅、一块焦距为 8 cm 的透镜、一块反射率为 20% 的部分反射镜,在外腔中实现了两路波长分别为 1087 nm 和 1120 nm 的光纤激光的合成,并通过调节光纤端面在透镜焦平面的位置,在 5 mm 的变化距离下得到了 50 nm 的输出波长调谐,以此证明了数十个甚至上百个光纤激光单元合成的可行性,这是一项具有开创意义的工作,为光纤激光的光谱合成研究指明了方向。2002 年, Bochove 等^[7]对外腔结构的光纤激光阵列光谱合成进行建模,对效率、带宽以及光束质量等参数进行了详细的理论计算,并对光纤排布的指向误差、转换透镜相差等因素对合成效果的影响进行了细致的分析,比较了球面镜、四合透镜以及非球面透镜等多种透镜在系统中的性能差异,得出了最适宜的透镜是平抛透镜的结论,这项工作对系统的搭建以及光学元件的选择具有非常重要的参考意义。2003 年, Augst 等^[8]采用上述方法,对阵列规模进行了一定的扩展,在实验上实现了 5 路光纤激光的光谱合成,如图 11 所示,合成功率达到了 6 W,合成光束质量因子为 1.14,与单根光纤输出光的光束质量相当。

以上几篇报道是采用外腔结构对光纤激光进行光谱合成的代表性工作。此方案具有结构紧凑、便于阵列规模拓展的优点,为光谱合成基本原理的探索提供了重要依据。

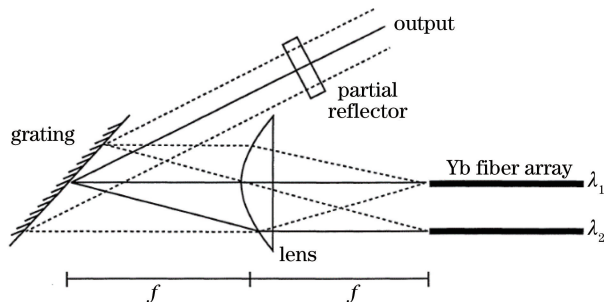


图 10 两路光纤激光光谱合成示意图^[31]

Fig. 10 Schematic diagram of spectral beam combining of 2-channel fiber lasers^[31]

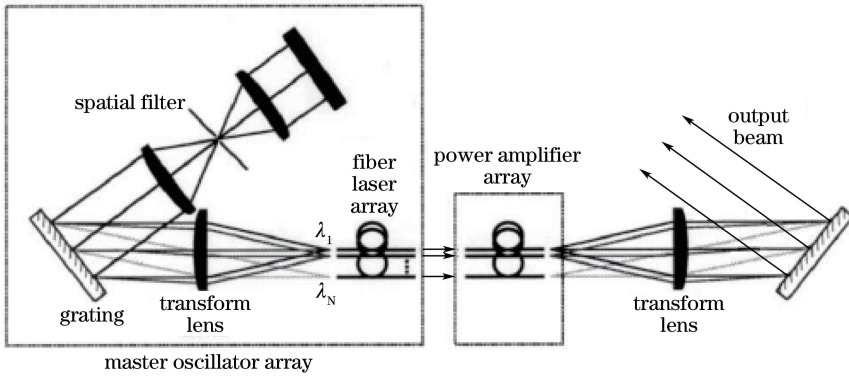


图 11 外腔结构光纤激光光谱合成示意图^[8]

Fig. 11 Schematic diagram of spectral beam combining of fiber lasers with external cavity configuration^[8]

2) MOPA 式单路光源的单光栅光谱合成技术

随着高功率光纤激光器的不断发展,采用 MOPA 结构的光纤放大器逐渐成为实现高功率光纤激光输出的主流技术手段,它既可以保留种子光源窄线宽、高光束质量、高信噪比等优良特性,又可以将功率扩展到千瓦量级。基于 MOPA 式窄线宽光纤放大器的单光栅光谱合成方案倍受重视,在这种方案中,采用 MOPA 结构实现不同波长的窄线宽高功率单链路放大光源,放大激光经过准直器和折反镜组后进行拼接,并以特定的角度入射到衍射光栅的同一位置,最后以相同的衍射角出射,实现多束激光的合成和共孔径输出,如图 12 所示。每一路入射激光的波长由各光纤放大器的种子源决定,对于任意的特定波长,可以通过光栅方程得出其对应的入射角度,然后通过折反镜系统调整光束并以特定的角度入射到光栅表面。每一路激光可以实现较高的功率输出,整个系统的效率更多取决于光栅的衍射效率,因此更容易实现高功率、高效率的光谱合成激光输出。

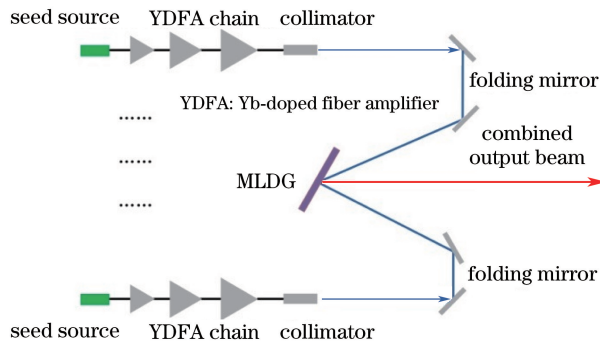


图 12 单光栅 MOPA 结构光纤激光光谱合成

Fig. 12 Spectral beam combining of fiber lasers with single grating and MOPA structure

假设入射激光的中心波长为 λ ,线宽为 $\Delta\lambda$,光栅线密度为 g ,束腰半径和远场发散角分别为 ω_0 和 θ_0 ,经过衍射光栅后的出射激光的束腰半径和远场发散角分别为 ω_1 和 θ_1 ,入射角为 α ,衍射角为 β ,结合光栅方程以及角色散公式,可以推算出输出光的光束质量为

$$Q = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \left(\frac{\cos \alpha}{\cos \beta} + \frac{1}{2} \frac{g \Delta\lambda}{\theta_0 \cos \beta} \right) = 1 + \frac{g \Delta\lambda \pi \omega_0}{2\lambda \cos \alpha} \quad (4)$$

国外有关研究团队对基于 MLDG 的光谱合成进行了深入研究,并取得了非常理想的研究成果。2007 年,美国 Aculight 公司报道了采用一块刻槽密度为 1740 lp/mm 的多层介质膜光栅将三路光纤激光器进行光谱合成的研究成果^[34]。各路光源均为 MOPA 结构,通过对种子光进行振幅调制,将线宽控制在 1 GHz 以下,同时功率达到了 200 W 量级,总合成功率达到了 522 W,合成效率为 93%,两个方向的光束质量因子分别为 1.18 和 1.22,该实验结构图如图 13 所示。这个研究成果证明了光谱合成技术具有能够实现与单个光纤激光器光束质量相当的输出光束的能力,因此引起了广泛关注。

此后,该研究团队充分利用振荡式单路激光的单光栅线型腔光谱合成技术和 MOPA 式单路光源的单

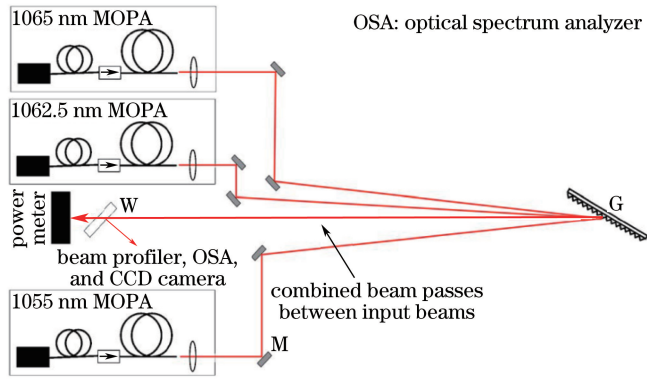


图 13 Aculight 公司三路 522 W 光纤激光光谱合成示意图^[34]

Fig. 13 Schematic diagram of spectral beam combining of 3-channel 522 W fiber lasers in Aculight corporation^[34]

光栅光谱合成技术的优势,实现了一种紧凑式的光纤激光光谱合成系统,如图 14 所示。每路光纤激光器均采用 MOPA 结构,但是输出端不进行准直,而是通过一个准直透镜,对所有不同波长的激光光束进行准直并以一定的角度准直入射到衍射光栅表面的同一位置,各路光纤激光在设计时要满足与其位置相对应的波长,这样经过光栅后所有的光束就会合成一束激光并从光栅表面沿一定的方向出射。这种新颖的合成手段既能够满足单路光源功率扩展的要求,又能实现各路入射光的紧密排布,便于阵列规模扩展。基于这种实验方案,该团队于 2013 年报道了 12 路 300 W 量级窄线宽(3 GHz)光纤激光器的光谱合成^[43],同样采用了一块刻槽密度为 1740 lp/mm 的多层介质膜光栅,实现了 3 kW 的总合成功率,合成效率达到了 97%,合成光束质量因子为 1.35。在此基础上,2015 年该研究团队将入射激光阵列扩展至 96 路,每一路入射激光的功率仍为 300 W 量级,线宽控制在 3 GHz,实现了总功率为 30 kW 的光谱合成光纤激光器实验样机^[45],并预计于 2016 年采用相同模块将功率提升到 60~120 kW。图 15 给出了 30 kW 光谱合成光的光谱以及光斑,两个方向的光束质量因子分别为 1.6 和 1.8,合成光谱密集排布,几乎填满 1048~1073 nm 区域,而且光谱图中的间隙为接下来扩展阵列提供了可能性。

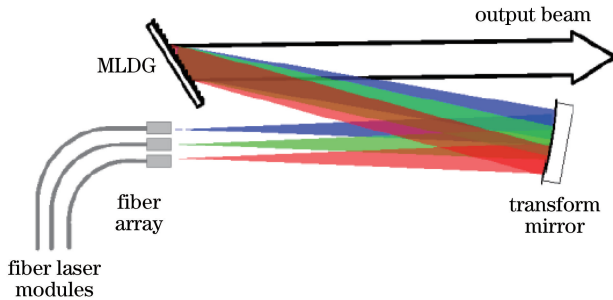


图 14 Aculight 公司 30 kW 光纤激光光谱合成示意图

Fig. 14 Schematic diagram of 30 kW spectral beam combining in Aculight corporation

2009 年,德国耶拿大学报道了利用介质膜光栅对 4 路 500 W 功率量级的基于光子晶体光纤放大的光纤激光器进行光谱合成的实验结果^[37],如图 16 所示,实现了 2 kW 的光谱合成,两个方向的光束质量因子分别为 2.0 和 1.8。2011 年,该研究团队将子光束的功率提高到了 2.1 kW,从而实现了 8.2 kW 的光谱合成,当输出功率为 2.3 kW 时光束质量因子小于 1.5、当输出功率为 7.3 kW 时光束质量因子约为 4.3,这是当时报道的光纤激光器光谱合成的最高功率水平^[41]。从其发展的情况来看,8.2 kW 合成光的光束质量相较于 2 kW 合成光的光束质量退化了很多,这主要是由于单路激光器的功率从 500 W 扩展到 2 kW 时光谱线宽增加的原因,这也表明了 MOPA 式单路光源的单光栅光谱合成技术对于光束线宽的敏感性。理论和实验表明,要获得高光束质量的光谱合成输出,必须严格控制单路光源的线宽在 100 pm 以下,而受非线性效应等的影响,较窄的光谱线宽限制了单路光纤放大器的功率提升。

3) MOPA 式单路光源的双光栅光谱合成技术

在上述介绍的 MOPA 式单路光源的单光栅光谱合成技术方案中,衍射光栅具有特定的光谱分辨率,若

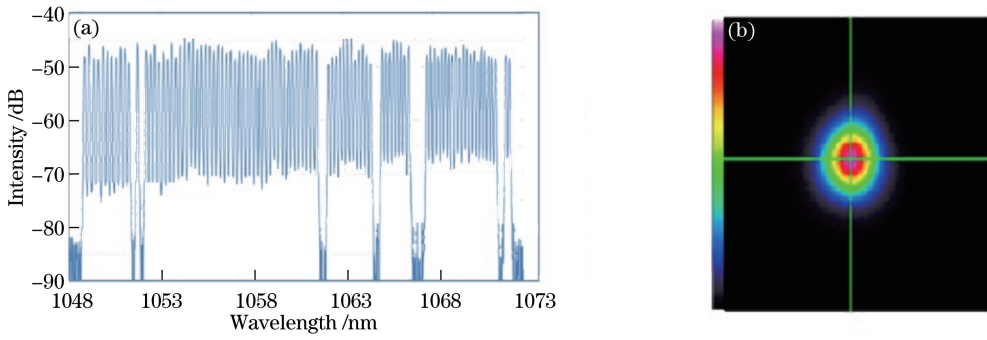


图 15 Aculight 公司 30 kW 光纤激光光谱。(a) 合成光谱; (b) 远场光斑图^[45]

Fig. 15 30 kW spectral beam combining in Aculight corporation. (a) Combined spectrum; (b) far-field beam pattern^[45]

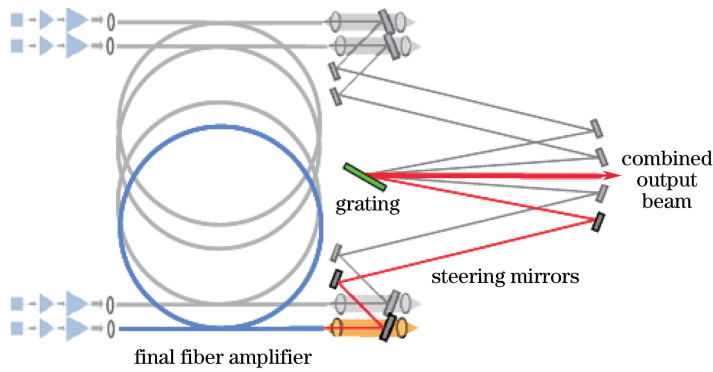


图 16 耶拿大学 4 路 8.2 kW 光谱合成示意图^[37]

Fig. 16 Schematic diagram of 4-channel 8.2 kW spectral beam combining in University Jena^[37]

激光光谱宽度超过衍射光栅光谱分辨率, 衍射光将会出现角色散, 这会严重影响合成光发散角, 从而使合成光束的光束质量大大降低。基于此, Liu 等^[9]提出了双光栅合成的方案来弥补色散所造成的光束质量退化, 基本结构示意图如图 17 所示。采用参数完全相同、平行放置的双光栅可以实现色散补偿, 从而实现合成光束质量的提升。这种方案放宽了对单路激光线宽的要求, 适当选择光栅常数以及两块光栅的间距, 单路激光的线宽甚至可以在 1000 pm 量级, 从而便于提高整个合成系统的总功率, 所以 MOPA 式单路光源的双光栅光谱合成技术方案被认为是可获得高功率、高光束质量光谱合成的较为合适的技术方案^[29]。

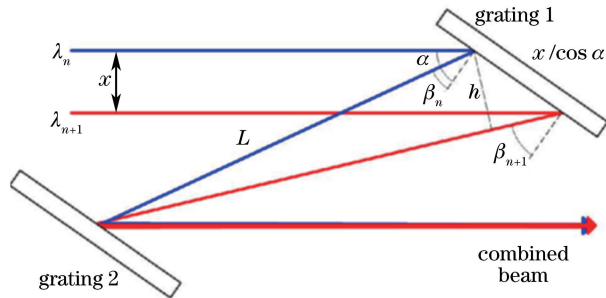


图 17 双光栅光谱合成示意图^[9]

Fig. 17 Schematic diagram of dual-grating-based spectral beam combining^[9]

双光栅光谱合成的基本原理如图 17 所示, 两路入射激光波长分别为 λ_n 和 λ_{n+1} 且 $\lambda_{n+1} > \lambda_n$, 入射激光的束腰半径和远场发散角分别为 ω_0 和 θ_0 , 经过第一块光栅后衍射光的束腰半径和远场发散角分别为 ω_1 和 θ_1 , 第二块衍射光栅最终输出光束的束腰半径和远场发散角分别为 ω_2 和 θ_2 。两路激光平行入射到第一块衍射光栅, 入射角为 α , 波长为 λ_n 的入射激光经过第一块衍射光栅的衍射角为 β_n , 波长为 λ_{n+1} 的入射激光经过第一块衍射光栅的衍射角为 β_{n+1} , 两路入射激光的横向间隔为 x , 根据图 17 中的几何关系, 两路入射激光在光栅上的距离为 $x/\cos \alpha$ 。在两块光栅上, 波长为 λ_n 的入射激光入射点之间的距离为 L , λ_n 在第一块光栅上的入射

点到 λ_{n+1} 光线的垂直距离为 h 。结合几何结构关系,可以得出双光栅结构最终输出激光的光束质量为

$$Q = \frac{\omega_2 \theta_2}{\omega_0 \theta_0} = 1 + \frac{g \Delta \lambda \cos \alpha}{2 \omega_0 \cos^2 \beta} L = 1 + \frac{x \Delta \lambda}{2 \omega_0 (\lambda_{n+1} - \lambda_n)} \quad (5)$$

根据(4)、(5)式,可以对单、双光栅两种结构的合成光束质量随激光线宽以及光斑尺寸的变化进行模拟,分析结果如图 18 所示。随着线宽的增加,单光栅合成光束质量的退化极为快速,而双光栅合成光束质量的退化则较平缓。对于双光栅合成,光束质量与光斑尺寸呈反比关系,这样既可以降低光栅表面的功率密度,又保证了较高的合成光束质量,所以双光栅合成方案是一种比较有前景的实现高功率、高光束质量输出的技术手段。

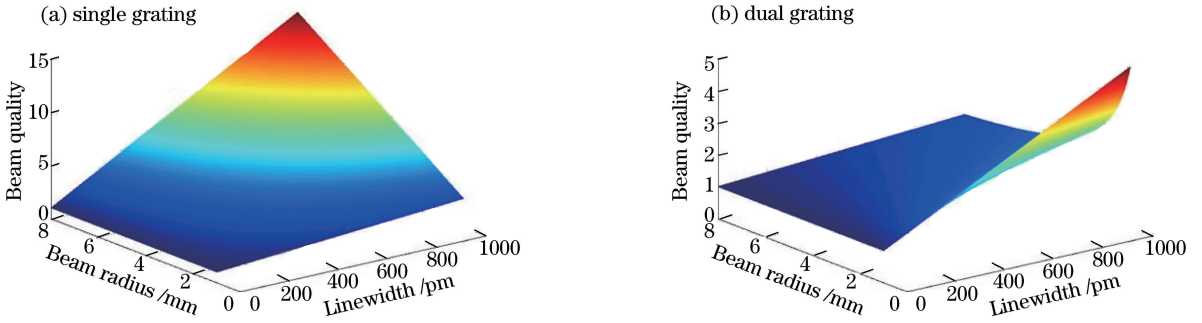


图 18 合成光束质量与激光线宽及光斑尺寸的关系。(a)单光栅情形;(b)双光栅情形
Fig. 18 Relationship among combined beam quality, laser linewidth, and beam radius.

(a) Single-grating case; (b) dual-grating case

2015 年,中国工程物理研究院搭建了一套基于双光栅色散补偿设计的共孔径光谱合成系统。采用两块线密度为 1740 lp/mm 的偏振相关多层介质膜衍射光栅,实现了 5 路千瓦量级窄线宽子光束的高效优质共孔径光谱合成,最大输出功率达 5.07 kW,光束质量因子小于 3,合成效率达到 91.2%^[47]。2016 年,该研究团队对系统中入射激光阵列进行了扩展,如图 19 所示,对 10 路不同中心波长、输出功率大于 1 kW、光束质量小于 1.6 的子光束进行了合成,实现了 9.6 kW 的最大输出功率,合成效率达到了 92%,合成光束质量为 2.9^[48]。然而,该系统过于复杂,所需的光学元件繁多,其中起偏器、反射镜、扩束镜、偏振分光镜等多个光学元件均需要承受数千瓦甚至万瓦的辐照,这对各个光学元件的制备提出了严苛的要求,在工程应用中存在较大挑战。

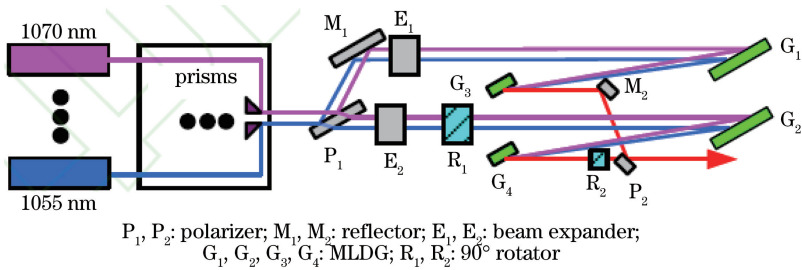


图 19 中国工程物理研究院 9.6 kW 光谱合成示意图^[48]

Fig. 19 Schematic diagram of 9.6 kW spectral beam combining in China Academy of Engineering Physics^[48]

4 SIOM 光纤激光光谱合成研究进展

近年来,本团队在高功率光纤激光以及光谱合成方面进行了大量的研究,在器件制备、关键技术突破和光谱合成系统等方面均取得了重要突破。在窄线宽高功率光纤放大器方面,SIOM 于 2016 年采用自主研发的光纤光栅、高功率合束器、包层光滤除器等核心器件,基于光纤光栅级联滤波、线宽操控、放大级参数控制和光纤模式控制等关键技术,突破了耶拿大学研究组报道的线宽小于 50 GHz 激光的单模输出功率极限,实现了功率为 2.5 kW、线宽为 0.18 nm(50 GHz)、中心波长为 1064.1 nm 的近衍射极限光纤激光输出。该激光器采用紧凑、稳定的全光纤化种子和三级放大结构,激光器具有很好的稳健性,主放级采用非保偏

20 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 光纤。当 976 nm 抽运光的功率达到 2894 W 时,激光器的最高输出功率为 2520 W,光-光转换效率达到 87.1%(无明显残余抽运光);当正向输出功率达到 2.5 kW 时,后向光反射率小于 0.01%,如图 20(a)所示。满功率状态下输出光谱和输出光束质量如图 20(b)所示。2 kW 时测得两个方向的光束质量因子分别为 1.191 和 1.186,如图 20(c)所示。实验中没有观察到 SBS、受激拉曼散射(SRS)及调制不稳定性(MI)等非线性现象,增加可用的抽运功率,可进一步提升激光输出功率。

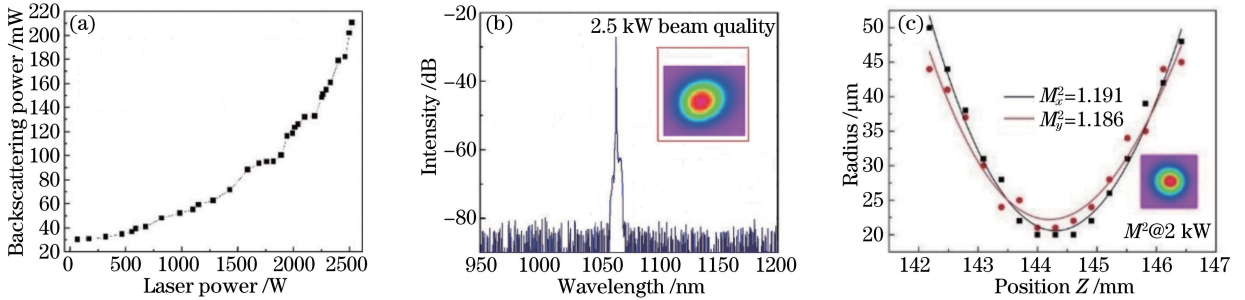


图 20 (a) 2.5 kW 窄线宽光纤激光器后向功率随正向功率的变化; (b) 输出光谱和光束质量特性; (c) 2 kW 功率量级光束质量测试结果

Fig. 20 (a) Variation of backscattering power with forward power of 2.5 kW narrow-linewidth fiber lasers; (b) output spectrum and beam quality; (c) measurement result of beam quality at 2 kW power level

在光谱合成方面,最初采用偏振相关金属膜系反射式衍射光栅对光谱合成技术进行了大量验证性实验。金属膜系反射式衍射光栅损伤阈值较低,很难承受高功率激光的辐照,不易实现高功率的光谱合成。本团队在偏振非相关 MLDG 的制备上取得了突破,在高功率光纤激光光谱合成方面实现了很大的进展。2016 年 8 月,SIOM 基于自主研发的高损伤阈值偏振非相关 MLDG,采用 7 台窄线宽光纤激光器以及 MLDG 实现了 11.27 kW 高光束质量的光谱合成。7 光束阵列的中心波长分别为 1058.5, 1064.2, 1068.0, 1070.9, 1075.9, 1081.0, 1082.5 nm, 7 台光纤激光放大器平均输出波长为 1071.6 nm, 子光束口径均为 12 mm。系统结构和光束质量测试系统如图 21 所示。采用了两块 MLDG, 其中一块作为主光栅, 所有光束通过此光栅实现合束; 另外一块光栅与主光栅参数完全相同并平行放置, 对 1070.9 nm 入射光进行色散补偿, 测试双光栅色散补偿结构在万瓦量级光纤激光光谱合成系统中的实用性。采用一块高反射率(HR)反射片将合成功率率的 99.5% 投射至功率计进行功率测试, 将 0.5% 透射光用来进行光谱和光束质量监测。

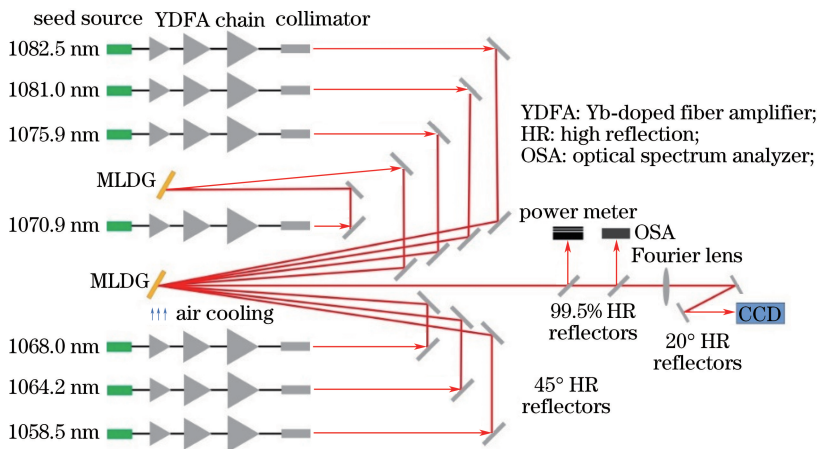


图 21 SIOM 11.27 kW 光谱合成系统

Fig. 21 11.27 kW spectral beam combining system in SIOM

实验选用多层电介质反射式衍射光栅,线密度为 960 lp/mm,尺寸为 50 mm \times 50 mm,子光束阵列输出功率在 1700 W 量级。合成光谱如图 22 所示,与子光束中心波长对应的 7 个尖峰证明了良好的合束效果。单激光器输出功率差异、光谱仪跳线放置位置差异、跳线损耗的波长相关性和功率计表面反射率的波长选择性使各波长在光谱仪中的信噪比有所差异,因此 7 个波长信噪比略有不同。

当总入射功率为 12.15 kW 时,总衍射功率为 11.27 kW,总衍射效率达到了 92.8%。图 23 展示了衍射-1级的总输出功率(即 7 路光谱合成的总功率)随时间的变化情况。上升沿与下降沿代表激光器阵列开关过程。10 kW 以上功率的保持时间为 133 s,且在该过程中,光栅表面温度稳定。

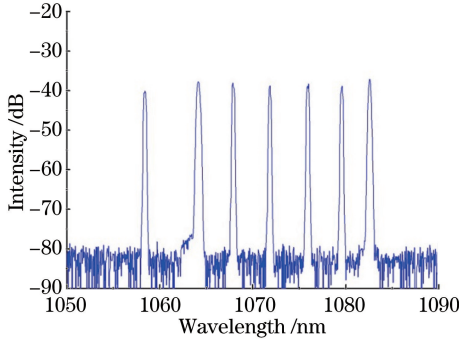


图 22 7 路光纤激光光谱合成光谱

Fig. 22 Spectrum from spectral beam combining of 7-channel fiber lasers

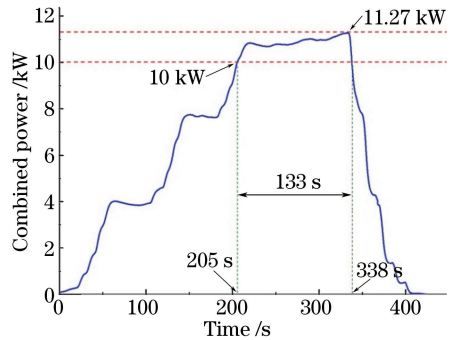


图 23 合成功率随时间的演化

Fig. 23 Evolution of combined power versus time

在 100,1.6,4,11 kW 四个不同的合成功率量级下,利用电荷耦合器件(CCD)捕捉到合成光远场光斑,万瓦功率量级合成输出光束衍射倍率因子小于 2.5,如图 24 所示。

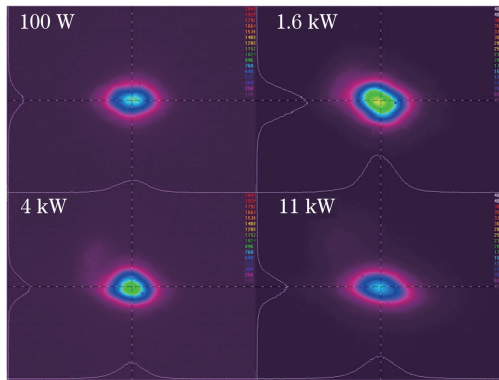


图 24 不同合成功率下合成光束远场光斑图样

Fig. 24 Far-field beam pattern of combined beams with different combined powers

5 结束语

光谱合成技术属于一种非相干合成技术,通过降低光谱纯度来换取激光亮度的有效提升。光纤激光器的光谱合成可以充分利用掺镱光纤激光器较宽的增益带宽来弥补单根光纤激光输出功率受限的缺陷,以获得高功率高光束质量的激光输出,是未来高功率光纤激光器重要的技术路径之一。MOPA 式单路光源的单光栅光谱合成技术由于采用反射式衍射元件,具有光束质量提升和热管理等方面无可替代的优势,极具发展潜力。高功率窄线宽光纤激光光源、MLDG 和紧凑化合成光学系统是光谱合成系统中最为核心的三个要素。

对于高功率窄线宽光纤激光光源而言,在 MOPA 式单路光源的单光栅光谱合成技术方案中,高功率数十吉赫兹线宽光纤激光器的研制是光谱合成系统中的一个十分重要的研究课题。同时,非保偏窄线宽光纤放大器具有较高的输出功率与斜率效率,且其偏振无关的特性可以极大地简化后续光路,以及提高系统的稳定性与集成性。目前国际上主流的高功率光谱合成系统普遍采用非保偏光纤放大器系统。对于衍射光栅而言,光纤激光器及阵列规模扩展的需求对衍射光栅的偏振特性、镀膜带宽、功率承受性、衍射效率、膜系和栅线结构等提出了非常高的要求。对于合成光学系统而言,数十路子光束阵列要求光学系统足够紧凑,传统的带有准直器的激光系统变得不再适用,因此,研发色散面内紧凑排布的光纤激光输出系统对于大功率光谱合成系统具有重要意义。相信在不久的将来,上述技术都会有重大突破,大于百千瓦输出功率的高亮度光谱合成也一定可以实现。

参 考 文 献

- [1] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, *et al.* Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [2] Tünnermann A, Schreiber T, Röser F, *et al.* The renaissance and bright future of fibre lasers[J]. *Journal of Physics B*, 2005, 38: S681-S693.
- [3] Limpert J, Röser 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.
- [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] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [6] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, *et al.* Experimental observation of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13218-13224.
- [7] Bochove E. Theory of spectral beam combining of fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(5): 432-445.
- [8] Augst S J, Goyal A K, Aggarwal R L, *et al.* Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(5): 331-333.
- [9] Liu A P, Mead R, Vatter T, *et al.* Spectral beam combining of high power fiber lasers[C]. *SPIE*, 2004, 5335: 81-88.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Sprangle P, Ting A, Penano J, *et al.* Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 45(2): 138-148.
- [13] Noordegraaf D, Maack M D, Skovgaard P M W, *et al.* All-fiber 7×1 signal combiner for incoherent laser beam combining[C]. *SPIE*, 2011, 7914: 79142L.
- [14] Swanson G J, Leger J R, Holz M. Aperture filling of phase-locked laser arrays[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(4): 245-247.
- [15] He B, Lou Q, Zhou J, *et al.* High power coherent beam combination from two fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 2721-2726.
- [16] Cheung E C, Ho J G, Goodno G D, *et al.* Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 354-356.
- [17] Goodno G D, McNaught S J, Rothenberg J E, *et al.* Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1542-1544.
- [18] Zhou P, Ma Y, Wang X L, *et al.* Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2939-2941.
- [19] Yu C X, August 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.
- [20] Ma P, Tao R, Wang X, *et al.* Coherent polarization beam combination of four mode-locked fiber MOPAs in picosecond regime[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4123-4130.
- [21] Redmond S M, Ripin D J, Yu C X, *et al.* Diffractive coherent combining of a 2.5 kW fiber laser array into a 1.9 kW Gaussian beam[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(14): 2832-2834.
- [22] Flores A, Dajani I, Holten R, *et al.* Multi-kilowatt diffractive coherent combining of pseudorandom-modulated fiber amplifiers[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(9): 096101.
- [23] Lhermite J, Desfarges-Berthelemot A, Kermene V, *et al.* Passive phase locking of an array of four fiber amplifiers by an all-optical feedback loop[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(13): 1842-1844.
- [24] Liu H, He B, Zhou J, *et al.* Coherent beam combination of two nanosecond fiber amplifiers by all-optical feedback loop [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3885-3887.
- [25] Yang Y, Hu M, He B, *et al.* Passive coherent beam combining of four Yb-doped fiber amplifier chains with injection-locked seed source[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 854-856.
- [26] Yang Y, Liu H, Zheng Y, *et al.* Dammann-grating-based passive phase locking by an all-optical feedback loop[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 708-710.

- [27] Klingebiel S, Röser F, Ortaç B, *et al.* Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(8): 1716-1720.
- [28] 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.
- [29] Loftus T H, Liu A P, Hoffman P R, *et al.* 258 W of spectrally beam combined power with near-diffraction limited beam quality[C]. SPIE, 2006, 6102: 61020S.
- [30] Schreiber T, Wirth C, Schmidt O, *et al.* Incoherent beam combining of continuous-wave and pulsed Yb-doped fiber amplifiers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 354-360.
- [31] Cook C C, Fan T Y. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity[C]. Advanced Solid State Lasers, 1999, 26: 163-166.
- [32] Ciapurin I V, Glebov L B, Glebova L N, *et al.* Incoherent combining of 100-W Yb-fiber laser beams by PTR Bragg grating[C]. SPIE, 2003, 4974: 209-219.
- [33] Andrusyak O, Smirnov V, Venus G, *et al.* Spectral combining and coherent coupling of lasers by volume Bragg gratings[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 344-353.
- [34] Loftus T H, Liu A P, Hoffman P R, *et al.* 522 W average power, spectrally beam-combined fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. Optics Letters, 2007, 32(4): 349-351.
- [35] Sevia A, Andrusyak O, Ciapurin I, *et al.* Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining[J]. Optics Letters, 2008, 33(4): 384-386.
- [36] Schmidt O, Wirth C, Tsybin I. Average power of 1.1 kW from spectrally combined, fiber-amplified, nanosecond-pulsed sources[J]. Optics Letters, 2009, 34(10): 1567-1569.
- [37] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, *et al.* 2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2009, 17(3): 1178-1183.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Schmidt O, Andersen T V, Limpert J, *et al.* 187 W, 3.7 mJ from spectrally combined pulsed 2 ns fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2009, 34(3): 226-228.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, *et al.* Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency and brightness[C]. SPIE, 2013, 8601: 860115.
- [44] 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.
- [45] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, *et al.* Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[C]. SPIE, 2015, 9730: 97300Y.
- [46] 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.
- [47] Ma Yi, Yan Hong, Tian Fei, *et al.* Common aperture spectral beam combination of fiber lasers with 5 kW power high-efficiency and high-quality output[J]. High Power Laser and Particle beams, 2015, 27(4): 040101.
马毅, 颜宏, 田飞, 等. 光纤激光共孔径光谱合成实现 5 kW 高效优质输出[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 040101.
- [48] Ma Yi, Yan Hong, Peng Wanjiang, *et al.* 9.6 kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers[J]. Chinese J 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.
- [49] 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.
- [50] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, *et al.* Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity

- [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(6): 405-407.
- [51] Chann B, Huang R K, Missaggia L J, *et al.* Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(16): 2104-2106.
- [52] Gopinath J T, Chann B, Fan T Y, *et al.* 1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array [J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9405-9410.
- [53] Dajani I, Zeringur C, Lu C, *et al.* Stimulated Brillouin scattering suppression through laser gain competition: Scalability to high power [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(18): 3114-3116.
- [54] Dajani I, Zeringue C, Shay T M. Investigation of nonlinear effects in multitone-driven narrow-linewidth high-power amplifiers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 406-414.
- [55] Mermelstein M D, Andrejco M J, Fini J, *et al.* SBS suppression and acoustic management for high-power narrow-linewidth fiber lasers and amplifiers [C]. *SPIE*, 2010, 7580: 75801G.
- [56] Suradeepa V R. Stimulated Brillouin scattering thresholds in optical fibers for lasers linewidth broadened with noise [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4677-4687.
- [57] Gray S, Liu A, Walton D T, *et al.* 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17044-17050.
- [58] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, *et al.* Power scaling of single frequency Ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier sources up to 500 W [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 546-551.
- [59] Goodno G D, Book L D, Rothenberg J E. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1204-1206.
- [60] Khitrov V, Farley K, Leveille R, *et al.* kW level narrow linewidth Yb fiber amplifiers for beam combining [C]. *SPIE*, 2010, 7686: 76860A.
- [61] Engin D, Lu W, Akbulut M, *et al.* 1 kW cw Yb-fiber-amplifier with <0.5 GHz linewidth and near diffraction limited beam-quality, for coherent combining application [C]. *SPIE*, 2011, 7914: 791407.
- [62] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.
- [63] Flores A, Robin C, Lanari A, *et al.* Pseudo-random binary sequence phase modulation for narrow linewidth, kilowatt, monolithic fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17735-17744.
- [64] Nold J, Strecker M, Liem A, *et al.* Narrow linewidth single mode fiber amplifier with 2.3 kW average power [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6011-6020.
- [65] Yagodkin R, Platonov N, Yusim A, *et al.* >1.5 kW narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier with 40 nm bandwidth [C]. *SPIE*, 2016, 9728: 972807.
- [66] Naderi N A, Flores A, Anderson B M, *et al.* Beam combinable, kilowatt, all-fiber amplifier based on phase-modulated laser gain competition [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 3964-3967.
- [67] Naderi N A, Dajani I, Flores A. High-efficiency, kilowatt 1034 nm all-fiber amplifier operating at 11 pm linewidth [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 1018-1021.
- [68] Beier F, Hupel C, Nold J, *et al.* Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbium-doped low NA fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6011-6020.
- [69] Ma P F, Tao R M, Su R T, *et al.* 1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 4187-4195.
- [70] Liu G B, Yang Y F, Wang J H, *et al.* Stimulated Brillouin scattering enhancement factor improvement in 11.6 GHz linewidth, 1.5 kW Yb-doped fiber amplifier [J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(7): 074207.
- [71] 杨依枫, 沈 辉, 陈晓龙, 等. 全光纤化高效率、窄线宽光纤激光器实现 2.5 kW 近衍射极限输出 [J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0419004.
- [72] von Elm R, Marois C. Beam-combiner for fiber-delivered laser-beams of different wavelengths: US8599487 [P]. 2013-12-03.
- [73] Chang Y L, Kim B K, Sang S H, *et al.* Multi beam laser apparatus: US7991037 [P]. 2011-08-02.
- [74] Gold R S, Jachimowicz K E. Beam combining/splitter cube prism for color polarization: US5067799 [P]. 1991-11-26.
- [75] Pickering R D. Beam combining prism: US2983183 [P]. 1961-05-09.
- [76] Perry M D, Boyd R D, Britten J A, *et al.* High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(8): 940-942.
- [77] Shore B W, Perry M D, Britten J A, *et al.* Design of high-efficiency dielectric reflection gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(5): 1124-1136.