

激光光谱合成技术研究进展与展望 (特邀)

姜 曼^{1,2,3}, 马鹏飞^{1,2,3}, 粟荣涛^{1,2,3}, 李 灿^{1,2,3}, 吴 坚^{1,2,3}, 马阎星^{1,2,3}, 周 朴^{1,2,3*}

- (1. 国防科学技术大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;
2. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;
3. 高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 光谱合成技术利用色散元件或双色元件,使多路不同波长的激光在近场和远场同时实现空间重叠,合成至单一孔径输出的激光,是实现高功率、高光束质量激光输出的技术途径之一,受到了研究者的极大关注。特别在近十年来,随着光栅等合成元件性能的不断改善,高功率高光束质量的光谱合成激光输出在工业、国防等领域发挥了重要作用,有着广泛的应用前景。文中对半导体激光器和光纤激光器两种典型激光工作介质进行归类,梳理并回顾了光谱合成技术的发展历程,综述了当前高功率光谱合成技术的主流方案与国内外研究现状。此外,结合笔者所在课题组在光谱合成方面的研究工作,展示了光谱合成技术近年来的发展态势,并展望了光谱合成技术的未来发展方向。

关键词: 光谱合成; 光纤激光; 半导体激光; 体布拉格光栅; 面光栅

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201053

Research progress and prospect of spectral beam combining (*Invited*)

Jiang Man^{1,2,3}, Ma Pengfei^{1,2,3}, Su Rongtao^{1,2,3}, Li Can^{1,2,3}, Wu Jian^{1,2,3}, Ma Yanxing^{1,2,3}, Zhou Pu^{1,2,3*}

- (1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, China;
3. Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Spectral beam combining (SBC) uses dispersive elements or dichroic elements to make multi-channel lasers of different wavelengths overlap in the near-field and far-field at the same time, so as to combine the laser beam with single aperture output. It is one of the technical approaches to achieve high power and high beam quality laser output, which has attracted great attention of researchers. Especially in the past decade, with the continuous improvement of the performance of grating and other combining components, the spectral beam combining laser output with high power and high beam quality has played an important role in industry, national defense and other fields, and has a wide application prospect. The research progress of SBC was reviewed for the two typical laser working medias of semiconductor laser and fiber laser. The current mainstream scheme and research status of high power SBC at home and abroad were summarized. In addition, combined with our research works on SBC, the development trend of SBC in recent years were shown, and the future development prospect of SBC technology was forecasted.

Key words: spectral beam combining; fiber laser; semiconductor laser; volume Bragg grating; surface grating

收稿日期:2020-09-10; 修订日期:2020-10-11

基金项目:国家自然科学基金(61705264);广东省重点领域研发计划(2018B090904001);湖南省自然科学基金创新群体项目(2019JJ10005);湖南省创新型省份建设专项(2019RS3017)

作者简介:姜曼(1990-),女,副教授,主要从事光纤激光与光谱合成等方面的研究。Email:jiangman7@126.com

通讯作者:周朴(1984-),男,研究员,博士生导师,主要从事光纤激光与光束合成等方面的研究。Email:zhoupu203@163.com

0 引言

激光阵列合成是获得高功率、高光束质量激光输出的有效技术途径,其合成思想形成于 1960 年代气体激光器的研究中^[1-2]。随着激光技术的不断发展,合成的概念得到了更多的实际应用,多光路激光合成获得高功率高光束质量光束的方法被广泛认可,并发展形成了多种合成方式^[3]。光束合成技术是一种模块化合束方法,旨在通过较低功率的激光阵列合成方式构建高功率激光束,合成光束可以达到与单路激光可比拟的传输特性,如光束质量、中心光斑能量比等。光束合成技术通常被分为相干合成技术^[4-7]和非相干合成技术两大类。其中,非相干合成技术主要包括几何并束^[8-10]、功率合成^[11]和光谱合成^[12]。近年来,随着高功率光谱合成技术的发展,特别是以多层电介质光栅为代表的合成元件在热承受能力、高衍射效率等关键技术的突破,进一步显示了光谱合成技术实现高亮度激光输出的潜力。

光谱合成技术的主要原理是应用色散元件或双色元件,使多路不同波长的激光在近场和远场同时实现空间重叠,合成至单一孔径输出的激光,以提高输出激光的功率和亮度。理论上,激光光谱合成可以实现合成光束亮度的定标放大,即输出光束保持与输入激光的光束质量基本相同,而功率随合成路数成比例增加。特别在近十年来,随着光栅等合成元件性能的不断改善,在许多对光谱成份没有特别要求的应用领域,光谱合成成为获得高功率高光束质量激光输出的重要技术途径。以麻省理工学院林肯实验室^[13-15]、美国 Aculight 公司^[16-18]、洛克希德·马丁公司^[19-20]、德国弗劳恩霍夫研究所^[21-26]、美国中佛罗里达大学^[27-29]、美国密歇根大学^[30]、国内中国工程物理研究院^[31-32]、中国科学院上海光学精密机械研究所^[33]、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[34]、国防科技大学^[35]、南京理工大学^[36]等为代表的多家单位对光纤激光和半导体激光光谱合成技术方案进行了深入研究,发展了基于体布拉格光栅的光谱合成技术、基于二色镜的光谱合成技术、基于面光栅的光谱合成技术,以及其他不同种类的光谱合成技术,并实现了万瓦级高功率高光束质量光谱合成系统。研究人员分别对光纤激光光谱合成^[37]和高功率半导体激光器^[38]

的研究进展进行了梳理与总结。文中针对光谱合成技术及其应用进行了全面的介绍,着重梳理和回顾了半导体激光器和光纤激光器光谱合成的发展历程、主流方案、发展现状以及近年来的发展态势与技术预测。

1 光谱合成的发展历程

1.1 起步阶段(1990 年以前)

回顾激光技术的发展历史不难发现,光谱合成(Spectral Beam Combining, SBC)技术的发展伴随着半导体激光器的发展。早在 1970 年代末,日本 NTT (Nippon Telegraph and Telephone) 电信公司的研究人员 K. Nosu 等人就报道了将干涉滤光镜纵向级联合成的结构用于多路复用器,实现六路激光二极管合成,其结构如图 1 所示^[39]。在这一结构中,每路激光二极管的波长均不相同。干涉滤光镜透射特定波长的二极管激光输出,反射其他波长。这便是光谱合成最早的雏形。

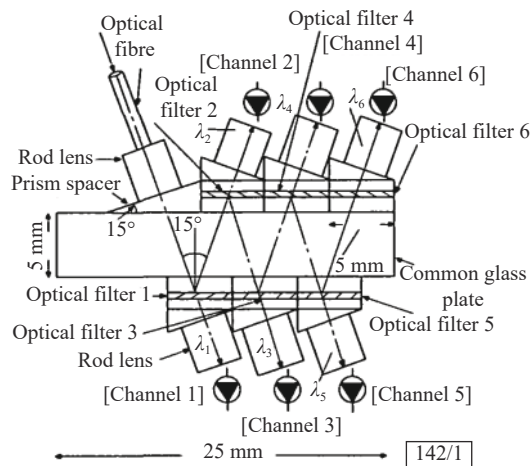


图 1 反射式多路复用器结构图

Fig.1 Structure of multireflection multi/demultiplexer

此后十年,美国戈达德太空飞行中心 (NASA's Goddard Space Flight Center) 激光与光电子所的研究人员 Peter O. Minott 和 Jonathan A. R. Rall 等利用光栅对结构 (Grating rhomb) 对不同波长的激光二极管进行光谱合成^[40-41],标志着用于功率和亮度放大的横向并联结构光谱合成概念的形成。当时,该方案的难点在于用于合成的常规法布里-珀罗激光二极管的输出波长不稳定,即使施加温度控制也无法达到要求。由于缺乏良好的波长稳定技术,降低了光谱合成输出的光束质量。

1.2 迅速发展阶段 (1990~2005 年)

1990 年代早期, 光谱合成技术在光学通信波分复用 (Wavelength-division multiplexing, WDM) 传输领域也得到了发展^[42-43]。这种波分复用传输器也被称为多通道光栅腔镜激光器 (Multichannel grating cavity lasers), 它的结构是将一维阵列半导体激光器通过共享同一个由光栅组成的腔镜进行合成。这种光谱合成方式的优点是将光栅与光束反馈机制相结合, 既能够通过光栅反馈控制每路光束的波长, 同时又能将各

路光束在空间重合实现光谱合成。然而, 在波分复用传输器中, 研究人员主要关注的是如何将多路不同波长的光束注入到单模光纤中进行传输, 而并不特别关心激光的功率、亮度以及效率。

21 世纪初, 研究人员针对光谱合成在光束指向和波长控制两个方面的技术困难先后发展了谐振腔式的闭环光谱合成和开环光谱合成两种技术, 如图 2 所示^[12]。这两种技术的发明标志着光谱合成用于大功率半导体激光和光纤激光的开端。

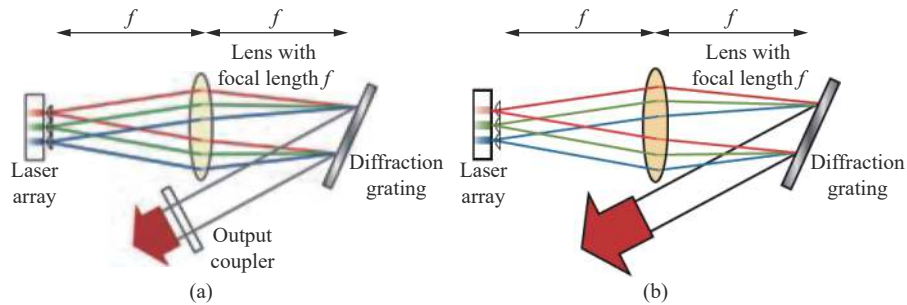


图 2 (a) 闭环式光谱合成基本结构; (b) 开环式光谱合成构型示意图

Fig.2 Schematic of (a) the closed-loop SBC configuration; (b) Open-loop SBC configuration

2000 年, 麻省理工学院林肯实验室 C.C. Cook 和 T. Y. Fan 等发明了一种低损耗空间光谱合成的方式, 即谐振腔式的闭环光谱合成^[44-46]。该方式能够在控制波长的同时实现多路激光近理想光束合成, 在半导体光谱合成和光纤激光光谱合成中均得到应用^[16, 47]。图 3 所示为合成一维排布激光二极管光束的系统结构, 主要元件是增益介质、传输光学元件、光栅和部分反射耦合镜。该方案利用光学反馈控制每路激光的波长, 使每路激光波长均不相同并且实现理想光束合成。每路光束的增益介质在各自的激光谐振腔中, 谐振腔的一个腔镜在增益介质的一端, 另一端采用部分反射输出耦合镜作为输出腔镜。在该结构中, 所有光束共用同一个传输透镜, 并且各路光束位于透镜的焦平面上。光栅和输出耦合镜作为外腔, 不同波长光束入射在光栅表面光瞳重叠, 由于不同波长光束入射角度各不相同, 通过光栅衍射合成一束激光。2004 年, M. Reich 等实现了三路掺镱光纤激光器的光谱合成, 输出功率 104 W, 光束质量 M^2 因子为 2.7^[23]。2005 年, T. Y. Fan 等实现了 100 路平板激光二极管光谱合成, 输出功率 35 W, M^2 因子约 1.3^[44]。

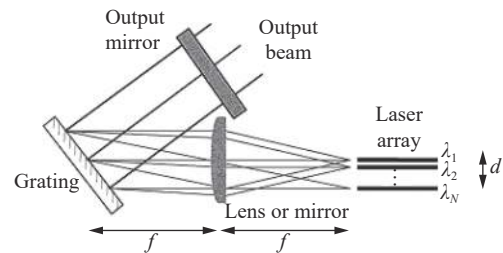


图 3 半导体激光光谱合成实验结构图

Fig.3 Schematic of the semiconductor laser beam combining experiment

与谐振腔式的闭环构型光谱合成的系统结构相

比, 开环式构型的光谱合成系统没有输出耦合镜, 其衍射光栅放置于激光谐振腔外, 合成光束经由光栅直接输出。不同波长的单路激光器或放大器通过传输光学器件以不同的角度入射在光栅表面并实现重叠; 经光栅衍射后以相同方向、相同光瞳输出, 实现在近场和远场的合成。林肯实验室最先将该方案应用在半导体激光合成和光纤激光合成中^[17, 48]。如图 4 所示为掺镱光纤激光放大器通过开环式光栅合成方式实现光谱合成^[49]。在这种结构中, 振荡器通过衍射光栅实现每路激光的波长选择, 放大器使每一路激光功率放大, 从而获得多路高功率激光合成。2003 年, S. J. Augst 等通过这种方式对五路光纤激光

器进行光谱合成, 输出远场功率为 6 W, 合成效率约为 71.4%, 光束质量 M^2 因子约为 1.14, 与单路激光 M^2 因子接近^[48]。

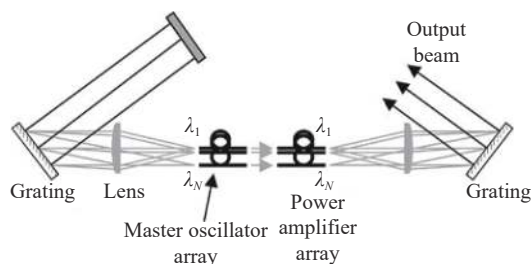


图 4 光纤激光光谱合成实验结构图

Fig.4 Schematic of the fiber laser beam combining experiment

1.3 高功率阶段 (2005 年以来)

除了针对技术方案的改进, 伴随着材料科学的发展以及光学衍射元件制作工艺水平的不断提高, 光谱合成技术在大功率激光的合成应用中得到飞速发展。2006 年, 林肯实验室 B. Chann 等人报道了基于体布拉格光栅 (Volume Bragg Grating, VBG) 的半导体激光器光谱合成, 输出连续光功率 89.5 W, 合成效率 75%, 创造了当时宽平面半导体激光器的最高亮度^[17]。自 2003 年开始, 在美国国防预先研究计划局 (DARPA) 和美国国防部高能激光联合技术办公室 (HELJTO) 的共同支持下, 中佛罗里达大学与 OptiGrate 公司共同研发了基于 VBG 的光谱合成系统。该系统中的体布拉格光栅由光热折变 (Photo-thermo-refractive, PTR) 玻璃材料制作而成, 因具有较强的光谱分辨本领, 而逐渐在光谱合成领域受到关注, 并被应用于高功率激光光谱合成的实验研究中。2008 年, 中佛罗里达大学的研究人员实现了五路光纤激光放大器的千瓦级合成输出, 系统结构如图 5 所示。五路激光的波长在 1 062.08~1 064.55 nm 区间, 相邻激光波长间隔约 0.44 nm。合成输出功率 770 W, 合成效率为 93%, 光束质量 M^2 因子为 1.1^[29]。2013 年, 中佛罗里达大学联合劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (LLNL)、IPG 公司和 OptiGrate 公司共同研究体布拉格光栅的热管理问题, 并实现了 1.5 kW 的合成激光热载^[50]。

此外, 多层电介质光栅在一定的光谱范围内具有高衍射效率与低吸收率的特性, 并且能够实现衍射效率与热吸收率对光的偏振不敏感特性。因此, 随着高性能激光器技术与热稳定性好、衍射效率高的多层

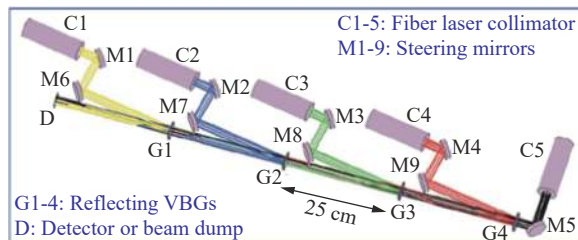


图 5 基于 VBG 的光谱合成结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of SBC based on VBG

电介质光栅的发展相结合, 使得基于多层电介质光栅的光谱合成技术在高功率高光束质量光纤激光光谱合成中得到快速发展。2007 年, Aculight 公司实现了基于多层电介质光栅的百瓦级掺镱光纤激光光谱合成, 结构如图 6 所示^[18]。三路激光对应的波长分别为 1055 nm、1062.5 nm 和 1065 nm, 相应的输出功率分别为 170 W、190 W 和 210 W, 合成总功率为 522 W, 合成效率 93%。合成光束的光束质量 M^2 因子在合成方向和垂直于合成的方向上分别为 1.18 和 1.22, 与入射前比下降很小。2009 年, 夫郎禾费研究所实现了 2 kW^[51] 光纤激光光谱合成系统, 首次将基于电介质光栅的光谱合成系统功率推进至千瓦量级。2014 年, 洛克希德·马丁公司利用电介质光栅进一步将光纤激光光谱合成系统功率推进至万瓦量级^[52]。

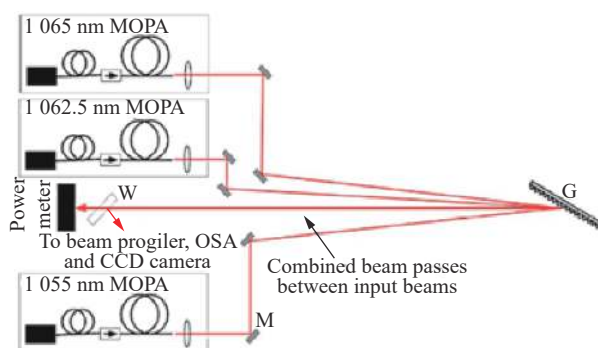


图 6 基于反射式电介质光栅的光纤激光光谱合成示意图

Fig.6 Schematic diagram of of SBC based on reflected dielectric grating

在这一时期的前半程, 国内对于激光光谱合成技术的研究刚刚起步, 还处于对合成器件与合成系统的理论分析阶段。然而, 从 2014 年开始, 国内研究人员迅速在高功率光谱合成激光输出方面取得了飞跃式发展成果。2007~2011 年间, 四川大学针对体布拉格光栅和闪耀光栅两种合成系统进行了输出光束特性及合成效率的分析^[53-54]。2008 年, 中国工程物理研究

院对半导体激光器的光栅-外腔光谱合成的耦合效率影响因素进行了分析^[55]。同年,北京工业大学利用波长啁啾体布拉格光栅外腔实现了 49 个半导体发光单元的光谱合成,输出光束平均功率 11.2 W,光束质量 M^2 因子约为 6^[56]。2008~2011 年,国防科技大学对基于体布拉格光栅的光谱合成系统进行了数值分析^[57],对相移反射体布拉格光栅在谱合成中的应用以及布拉格光谱合成特性进行了分析^[58]。2011 年,空军工程大学针对光谱合成系统中体布拉格光栅的设计等问题进行了分析^[59]。2014 年,中国工程物理研究院开展了基于双光栅结构的光纤激光光谱合成验证实验^[60];同时,对基于体布拉格光栅的光谱合成进行了实验研究^[61]。此后五~六年,在以中国工程物理研究院、四川大学、中国科学院半导体研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、国防科技大学、南京理工大学、苏州大学、清华大学、航空九院、同济大学、西华大学等为代表的单位的努力下,国内科研人员在合成元器件的制造与性能提升关键技术、光谱合成系统的设计,以及高功率激光光谱合成平台建设方面呈现出突飞猛进的发展态势^[62-75]。

2 主流方案和关键技术

光谱合成的技术方案包括基于二色镜的光谱合成、基于体布拉格光栅的光谱合成、基于面光栅的光谱合成、基于 WDM 的光谱合成以及多种技术方案混合的光谱合成等。从系统结构上分,通过面光栅的光谱合成在系统结构上属于横向并联型光谱合成,即所有入射光路均经过同一合成元件衍射后合成成一束;而通过光学二色镜或体布拉格光栅的光谱合成的系统结构则属于纵向级联型合成,即需要通过设计二色镜或体布拉格光栅系列,实现多波长光束的合成。本节针对当前高功率光谱合成的主流方案和关键技术进行了阐述和分析。

2.1 二色镜光谱合成

基于二色镜的光谱合成原理如图 7 所示,其基本思想是利用二色镜的分光原理,即利用二色镜对某一波长带宽内的激光高效率透射,同时对另一波长范围内的激光高效率反射,通过调整二色镜的角度使其透射带宽满足透射光束波长,通过调整反射光束的入射

角度使得所有光束最终在近场和远场实现空间重合。对多个二色镜的膜系进行设计和控制,可以实现多光束的合成。

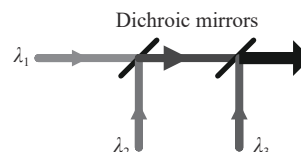


图 7 基于二色镜的光谱合成原理示意图

Fig.7 Schematic diagram of SBC based on dichroic mirrors

二色镜光谱合成的典型代表是基于干涉滤光片的光谱合成。干涉滤光片是利用干涉原理使得特定光谱范围的光通过的一种波长选择元件。通常分为截止滤光片和带通滤光片两种类型。其中,带通滤光片能够实现透射谱边沿陡峭下降,具有对波长间隔较小的光束进行光谱合成,同时保持单路激光光束质量的潜力。但是,在光谱合成系统的实际应用中,基于干涉滤光片的光谱合成系统功率和亮度提升主要受到以下两方面因素的制约:一方面,当 N 路激光合成时,需对 $(N-1)$ 个干涉滤光片分别进行热管理;另一方面,为了实现合成光束阵列功率和路数的扩展,要求镜片的透射带宽窄且边沿陡峭^[76],并且具有偏振不敏感、合成效率高和损伤阈值高等特点^[77],这增加了滤光片的制作难度和技术复杂性。

2.2 体布拉格光栅光谱合成

在激光合成技术的发展历史中,光谱合成相比于相干合成最显著的优势就是减小了由于单路激光相位控制所带来的系统的复杂性。而也正是如此,光谱合成光束的输出带宽比单路激光波长带宽宽很多。相对于其它光谱合成方式,体布拉格光栅光谱合成能够实现密集波长合束,借助其衍射的窄带宽波长选择原理来减小输出光束的光谱带宽,能数倍增加激光单元数量,提高合束光源功率。体布拉格光栅实现光谱合成的基本原理如图 8 所示。其基本思想与二色镜光谱合成类似,即某一波长光束满足布拉格衍射条件,获得高效率衍射光束,其它波长光束衍射率小于 1%^[78-79]。

VBG 有透射式和反射式两种,具有容易实现偏振无关色散的特点,适合非保偏激光的光谱合成。然而,将 VBG 应用于大功率激光光谱合成时,由于受到

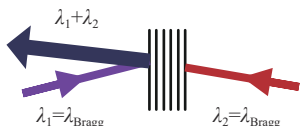


图 8 基于体布拉格光栅光谱合成原理示意图

Fig.8 Configuration of SBC based on VBG

以下三个方面因素的制约, 使得其工程应用具有一定的难度和复杂性: 首先, 需要根据合成激光波长等条件设计由 $(N-1)$ 个 VBG 组成的合成系列对 N 路激光进行合成。其次, VBG 合成过程对光谱的变化非常敏感, 在极窄的通道间隔下, 环境温度的涨落或某通道失效均会引起光谱的变化, 额外的温度控制技术增加了系统的复杂性^[62]; 特别随着合成路数的增加, 热管理系统的设计难度和实施的复杂性必然也将随之增加。最后, 每路激光波长对应不同的 VBG 倾角, 而相邻路数之间的波长差通常很小, 使得相邻两次衍射波长之间对应的 VBG 高效率衍射角度之差非常小, 从而对 VBG 倾斜角度的调节精度要求非常严格^[80]。

2.3 面光栅光谱合成

面光栅是激光横向并联光谱合成的主要实现方法, 将不同波长的激光在同一平面横向排列进行多光束合成, 其原理是利用如图 9 所示的光栅元件的色散特性和光路可逆性, 将用于分光的光栅色散元件逆向使用。历史上利用面光栅进行合成的方法有两种: 一种是相同波长的激光光束排布在该波长对应的不同衍射级上, 最终从同一位置输出; 另一种是在同一衍射级上将不同波长的光束排布在对应的衍射角度上, 产生光谱合成。根据合成方式的不同以及合成激光参数的不同, 设计相应的光栅实现高效合成。



图 9 基于面光栅的光谱合成原理示意图

Fig.9 Configuration of SBC based on surface grating

在大功率激光光谱合成中, 基于电介质光栅的光谱合成是面光栅光谱合成的典型代表, 其主要优势在于: 不需要设计光栅系列, 合成效率高; 光栅的损伤阈值高, 且不容易发生热变形, 有利于保持各单路激光的光束质量; 光路具有很强的可扩展性。而另一方

面, 其功率和亮度提升主要受到以下三方面因素的制约: 一是单路激光输出光谱线宽。受到电介质光栅色散的影响, 单路激光的输出光谱线宽将影响合成光束的光束质量。对高功率激光光源的线宽控制是实现合成光束亮度提升的重要一环。二是光栅的色分辨本领。每个光栅均有其特定的光谱分辨本领, 其可分辨的波长数亦即可以实现合成的激光数目。设计电介质光栅使其在较宽的光谱范围内对不同波长的激光均有较高衍射效率, 是扩展光谱合成路数、提升合成输出功率的重要方式。三是系统光路的排布与调控。在基于电介质光栅的合成系统中, 要求光束阵列在光栅色散面内的排布足够紧凑, 以实现更多路数的光谱合成。将激光准直输出端帽小型化, 研发调节精度足够高的光路调控装置, 将对大功率光谱合成系统具有重要意义。

3 光谱合成发展现状

随着高性能激光器技术, 特别是窄线宽激光技术的发展与效率高、热稳定性好的合成元件的发展相结合, 使得基于体布拉格光栅的光谱合成技术、基于二色镜的光谱合成技术以及基于面光栅的光谱合成技术在高功率激光光源中得到快速发展和应用。

3.1 半导体激光光谱合成

半导体激光光谱合成研究方面, 利用面光栅进行光谱合成的研究单位主要有美国麻省理工学院林肯实验室、Aculight 公司、丹麦技术大学、Teradiode 公司等。2000 年, 美国 MIT 林肯实验室首次提出了采用反射式光栅的光谱合成方式, 并实现了 11 路半导体激光器光谱合成, 获得输出激光功率 4 W^[46]。2004 年, Aculight 公司利用光谱合成方式获得了 8.6 W 半导体激光输出, 快慢轴 M^2 因子分别小于 3.1 和 4.6^[81]。2010 年, 丹麦技术大学的 D. Vijayakumar 等人实现了 980 nm 半导体激光器光谱合成, 获得了 9.3 W 连续输出功率, M^2 因子 5.3, 合束效率 63%^[82]。2012 年, 由 MIT 成立的 Teradiode 公司报道了基于光谱合成技术实现 360 W、2 倍衍射极限、亮度达 10 GW/(cm²·sr) 的半导体激光光源^[83]。为提升半导体激光光谱合成效率, 该公司设计了一种无输出耦合镜的光谱合成结构, 如图 10 所示^[84]。该结构能够将传统半导体激光光谱合成系统中“浪费”的激光用于稳定二极管元件。目前, Terad-

iode 公司利用基于面光栅的光谱合成技术方案将传统的千瓦级半导体激光器亮度提高了 100 倍; 并且实现了功率/纤芯 500~2 000 W/50 μm 、2~8 kW/100 μm 的光纤输出产品研发, 可应用于工业激光切割和焊接^[84]。这使得半导体激光器能够与目前主导工业激光切割和焊接市场的光纤激光器、固态激光器和二氧化碳激光器相竞争。

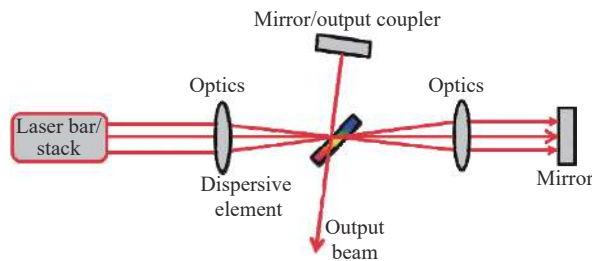


图 10 无输出耦合光谱合成结构示意图

Fig.10 Structure of coupler-free SBC laser

此外, 研究人员还提出了密集波长合束 (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) 高亮度光源的概念。相比于常规的宽谱波长合束, 在 DWDM 中单个半导体激光器均通过内腔或外腔波长选择反馈机制来稳定波长, 以减小单路激光之间的光谱间隔^[85]。目前, 已实现了多种输出功率潜力达到千瓦量级、光束参量乘积小于 10 mm-mrad 的 DWDM 系统设计。在该研究方向具有代表性的研究机构有 TeraDiode^[86]、JDSU/Amada^[87]、Trumpf^[88]、DPI/Fraunhofer CLT^[89], 以及 DILAS^[90]。2013 年, 德国弗劳恩霍夫研究所提出了一种基于 VBG 的高功率密集波分复用器 (HP-DWDM) 结构, 如图 11 所示^[91]。通过精密温控四片相同的 VBG, 对五束中心波长间隔仅为 1.5 nm 的宽面发射半导体激光 bar 条进行合成, 获得合成输出

功率 200 W, 当 M^2 因子为 45 和 1 时, 合成效率分别为 85% 和 97%。近几年, 德国 DirectPhotonics 公司推出了功率为 500~2 000 W、光束质量为 4.5~7.5 mm-mrad、芯径为 100~200 μm 的光纤耦合半导体激光源产品^[92-93], 并应用于工业金属切割等领域。

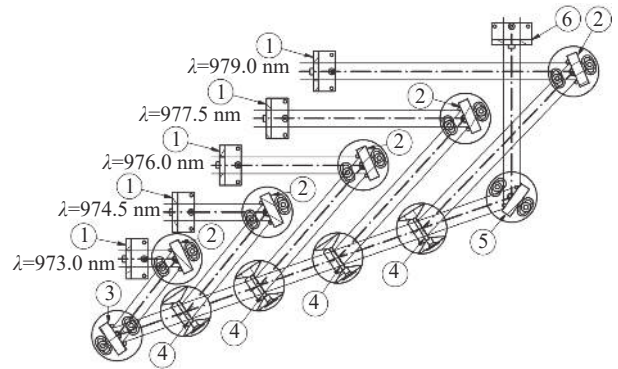


图 11 基于 VBG 的 HP-DWDM 结构示意图。①入射孔径; ②, ③, ⑤介质镜; ④具有高衍射效率的 VBG; ⑥输出孔径

Fig.11 Drawing of the HP-DWDM based on VBG. ① Input apertures; ②, ③, ⑤ dielectric mirrors; ④ VBG with high diffraction efficiency; ⑥ Exit aperture

2015 年, 德国 DILAS 公司报道了采用 VBG 对三个半导体模块出射的偏振激光进行光谱窄化, 并利用波长陡度为 1 nm 的二向分色镜对三路激光进行光谱合束, 最终耦合进芯径 100 μm 的光纤中, 实现功率为 410 W 的激光输出^[90]。2017 年, 德国弗劳恩霍夫研究所采用二向分色镜对波长分别为 935.9、940.1、944.0、972.5、976.5、979.7 nm 的窄线宽半导体激光器进行了光谱合成 (如图 12 所示), 并聚焦耦合进芯径为 100 μm 的光纤中, 输出功率大于 800 W^[94]。

为进一步提升输出激光的光谱密度, 2014 年, 德

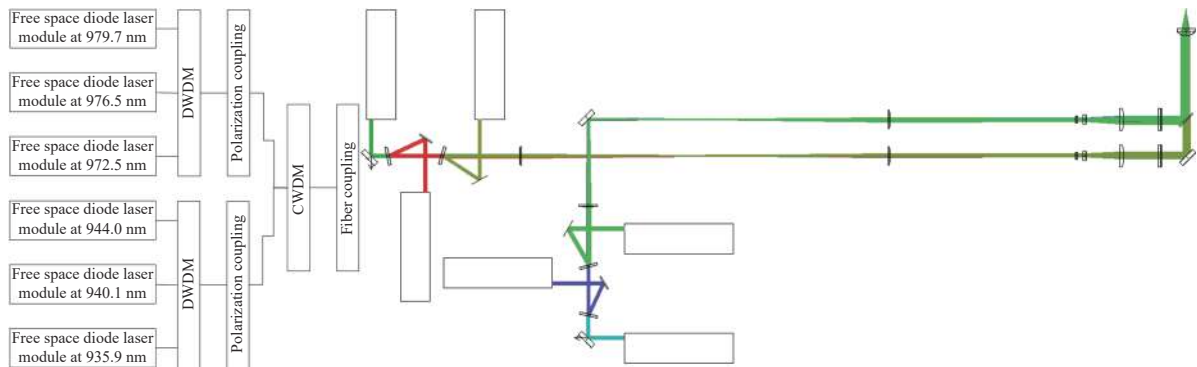


图 12 基于二向分色镜光谱合成结构示意图与光路模拟图

Fig.12 Scheme of SBC and ray-tracing simulation based on dichroic mirror

国 Trumpf 公司的 H. Zimer 等人提出将带宽为皮米量级的窄带滤光片 (Thin Film Filter, TFF) 用于外腔合束系统中, 对单路激光实现波长锁定^[95]。2017 年, Trumpf 公司利用该方案实现了 1.1 kW 半导体激光光谱合成输出, 光束参量乘积约为 6 mm·mrad^[96]。系统结构如图 13 所示, 利用 TFF 对单路激光实现波长锁定后通过透射光栅实现了光谱合成。如此, 数百路增益元件的波长稳定只需在腔内加一个 TFF 器件就可以实现。利用该技术实现半导体激光器光谱合成, 已经实现了从 200 μm 光纤输出大于 5 kW 的激光功率^[97]。

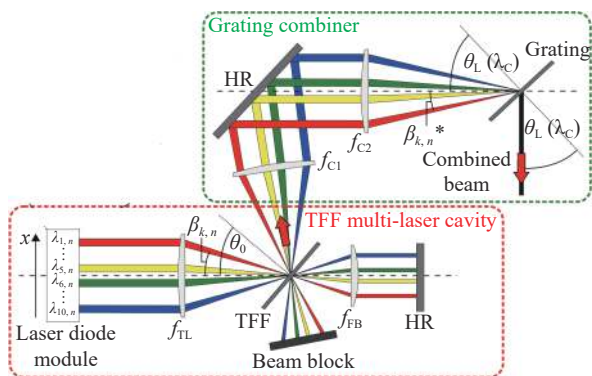


图 13 基于 TFF 的外腔半导体光谱合成结构图

Fig.13 Schematic setup of the semiconductor laser SBC based on TFF multi-laser cavity

相比之下, 国内在高端半导体激光芯片及合成光源方面与国外仍有一定差距^[14]。2013 年, 中国科学院长春光学精密机械研究所的研究人员利用透射式平面衍射光栅开展高功率、窄谱宽的半导体激光光谱合成实验, 实现了连续光输出功率 50.8 W、合成效率 90.2%、 M^2 因子 10.9 的 970 nm 半导体激光光谱合成^[98]; 2014 年和 2019 年, 继续分别实现了 106 W 和 212 W 的 800 nm 半导体激光光谱合成功率输出, 光束质量 M^2 因子分别为 14.6 和 2.2×16.7 ^[67, 99]。2014 年, 北京工业大学的研究人员首次将 BTS (Beam transformation system) 应用于外腔光谱合成中, 并基于透射式平面光栅实现了 940 nm 半导体激光光谱合成, 输出功率 58.8 W, 电光转换效率 51%, 测得快慢轴 M^2 因子分别为 1.3 和 11.6^[100]。2015 年, 中国工程物理研究院的研究人员基于光栅-外腔合束技术对 19 个发光单元的 CM-Bar 条进行了光谱合成实验, 合成谱宽 3.24 nm, 输出光功率 44.9 W, 电光转换效率 36.35%^[101]。2017 年, 该单位研究人员实现三路半导体激光器光谱合成输

出功率 579.2 W, 输出亮度 $232 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 电光效率 47%^[102]。2019 年, 中国科学院半导体研究所利用外腔光谱合成技术和偏振合成技术实现八路半导体激光合成输出, 输出功率 310.2 W, 光束质量 M^2 因子在快轴和慢轴上分别为 10.27 和 13.55, 合成激光亮度 $252 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ^[103]。

3.2 光纤激光光谱合成

光纤激光光谱合成研究方面, 具有代表性的工作是德国和美国相关机构的研究成果。从 2009 年至 2011 年, 德国弗劳恩霍夫研究所的研究小组利用反射式多层电介质光栅分别先后实现了平均输出功率 187 W 和 1.1 kW 的纳秒脉冲激光合成^[104-105]; 以及输出总功率 2 kW 和 8.2 kW 的高功率连续激光光谱合成, 最高合成效率达到 99%^[26, 51]。其中, 2011 年, Wirth 等人^[26]报道了基于多层电介质光栅的四路高功率光纤激光千瓦量级光谱合成实验, 系统结构如图 14 所示, 每一路放大器的最大输出功率为 2.1 kW, 斜率效率为 70%, 合成效率达到 99%, 全系统的斜率效率为 68%。用于合成的多层电介质光栅在入射激光波长为 1 020~1 070 nm 的区间内衍射效率大于 97%; 在 1 030~1 036 nm 区间内衍射效率大于 99%。

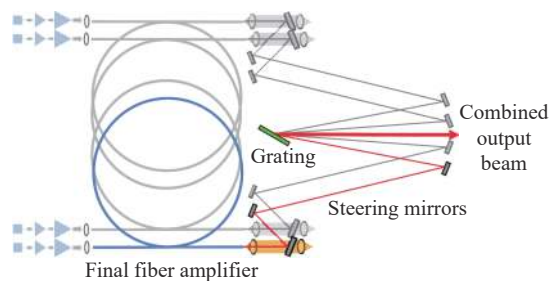


图 14 基于电介质光栅的光谱合成结构图

Fig.14 Configuration of SBC based on dielectric grating

2012 年, 洛克希德·马丁公司在美国陆军的支持下, 实现了 3.1 kW 的光纤激光光谱合成输出, $M^2 < 1.4$ ^[21]。系统结构如图 15 所示, 每路光纤激光采用 MOPA 结构输出, 平行排布; 传输镜使各路激光以特定角度入射到光栅表面的同一位置; 各路光纤激光在设计时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且沿同一方向输出。2013 年, 美国陆军空间与导弹防御司令部授予洛克希德·马丁公司 60 kW 光纤激光器研发合同, 计划 2016 年实现目标。2014 年, 洛克希德·马丁公司

实现 30 kW 激光输出的光谱合成系统^[52];并于 2015 年 3 月 3 日,利用基于该系统的“雅典娜”高能武器系统 (ATHENA) 在一英里以外的距离迅速烧毁一辆安装在测试平台上的小型卡车的发动机^[106]。这次实验标志着 30 kW 谱合成技术成功运用于单模光纤激光武器系统的地基试验雏形。2017 年 3 月,洛克希德·马丁公司首次公开宣称其 60 kW 级近衍射极限输出的光纤激光光谱合成系统完成,并交与美国陆军;该系统电光转换效率大于 43%,这也是目前公开报道的光纤激光光谱合成系统实现的最高输出功率水平^[107]。2018 年 8 月,美国陆军授予洛克希德·马丁公司及其合作伙伴一份 1000 万美元的合同,继续开发基于光纤激光光谱合成的高能激光战术车载演示系统 (HELTVD),计划 2022 年实现 100 kW 级移动车载激光武器系统^[108]。



图 15 洛克希德·马丁基于电介质光栅的光谱合成系统结构简图
Fig.15 Schematic setup of dielectric grating fiber laser SBC of Lockheed Martin

除了多层电介质光栅,二色镜元件和体布拉格光栅在光纤激光光谱合成中也占据了重要的地位。2008 年,美国密歇根大学 K. Regelskis 等利用带宽 1 nm 且光谱边沿陡峭的干涉滤光片对三路脉冲光纤激光进行光谱合成,合成后的平均输出功率 52 W,脉宽 2 ns,合成能量 1.9 mJ,合成效率大于 90%^[32]。2009 年,德国耶拿大学 O. Schmidt 等报道了利用电介质干涉滤光片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,最大脉冲能量达到 6.3 mJ^[76]。2011 年,Derrek Drachenberg 等报道了五路波长间隔 0.25 nm,总输出功率 750 W 的体布拉格光栅光纤激光光谱合成实验,其输出光谱总带宽 1 nm,合成效率大于 90%, $M^2=2.1$ ^[30]。该输出激光的光谱带宽远小于其他类型光谱合成方式的结果。

在国内,2015 年,中国工程物理研究院利用透射型体布拉格光栅对两路光纤激光进行光谱合成^[109],实现了 856 W 功率输出,合成效率 73.7%。合成输出

光束的光束质量 M^2 因子在横向和纵向分别为 7.9 和 2.7。2016 年,该团队利用反射式体布拉格光栅对四路光纤激光进行光谱合成,输出功率 720 W,合成效率 94.7%, M^2 因子约 1.54^[110]。此外,中国工程物理研究院等单位利用多层电介质光栅搭建了一套双光栅光谱合成系统,对五路千瓦级 MOPA 结构光纤激光放大器进行光谱合成^[111],激光中心波长覆盖范围为 1 060~1 067 nm。最终实现了 5.07 kW 高功率激光输出,合成效率 91.2%。此后,该研究团队对上述双光栅光谱合成系统进行扩展^[33],系统由中心波长从 1 055 nm~1 070 nm 的十路千瓦级全光纤结构的窄谱子束光纤激光器和两组双电介质光栅光谱合成单元组成,最终获得了最大功率 9.6 kW 的合成激光输出,合成效率 92%,光束质量 M^2 因子为 2.9。2016 年,国防科技大学利用透射型电介质光栅实现了两路光谱间隔 62 nm 的超宽带掺镱光纤激光的光谱合成实验^[112],该输出光谱范围是截至当时文献报道的光谱合成输出光谱范围的 2.5 倍。这一实验结果表明,通过充分利用掺镱光纤的增益带宽能够有效扩展合成路数,提升系统输出功率的同时减小单路光纤激光的功率增长压力。同年,中国科学院上海光学精密机械研究所基于多层电介质光栅对八路光纤激光放大器实现光谱合成^[35],合成输出功率 10.8 kW,合成效率 94%,合成光束质量 M^2 因子为 1.9。之后,该团队利用同样的结构对七路千瓦级光纤激光进行光谱合成,最大输出功率 11.27 kW,合成效率 92.8%,万瓦功率量级时的合成输出光束衍射倍率因子小于 2.5^[13]。2017 年,南京理工大学利用干涉滤光片实现了两束光纤激光的光谱合成,获得 10.12 kW 激光输出,光束质量 $M^2=11.4 \times 10.4$ ^[38]。

4 光谱合成发展态势与技术预测

4.1 谱段拓展的新型合成系统

截至目前,激光光谱合成的研究绝大多数集中于 9xx、10xx nm 等近红外波段。高平均功率的中红外激光由于其在激光雷达、探测、遥感和材料加工等领域的广泛应用前景,已经成为激光技术领域的研究热点。在许多情况下,这些应用需要激光在大气中远距离传播。因此,要求激光器的工作波长处于人眼安全范围内。近年来,随着 790 nm 波段半导体激光技术

和大模场掺铥光纤工艺的成熟,掺铥光纤激光器和放大器的性能水平得到飞速提升^[113-115]。由于 2 μm 波段的人眼安全特性以及比传统掺镱光纤低近一个量级的非线性效应阈值的优势,并且具有宽谱发射特性(1.8~2.1 μm),掺铥光纤激光的光谱合成有可能成为 2 μm 波段高能激光的有效实现方式。

2011 年,美国中佛罗里达大学的研究人员报道了利用平面衍射光栅对三路掺铥光纤激光放大器进行光谱合成的实验^[116]。实验结构如图 16 所示,输出激光波长在 1 984~2 015 nm 之间,合成功率 49 W,合成效率 67%。

2016 年,土耳其比尔肯大学和德国汉诺威激光中心的研究人员利用 WDM 级联,实现四路输出波长分别为 1 920、1 949、1 996、2 030 nm 的掺铥光纤激光器全光纤结构光谱合成^[117]。实验结构如图 17 所示,最终实现合成输出功率 38 W,合成效率 69%。

此外,TeraDiode 公司已经将其光谱合成技术扩

展到量子级联激光器中,以实现红外波段的高亮度半导体激光光源;目前已研发出 5 W、10 W 和 20 W 的激光模块^[76]。DirectPhotonics 公司正在利用 VBG 稳波长技术和二向色性滤波片光谱合成技术,开发研制 800~1 500 nm 的高功率、高亮度半导体激光光源^[93]。

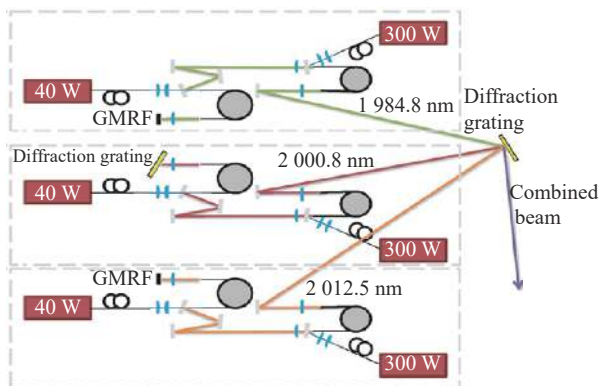


图 16 掺铥光纤激光光谱合成结构图

Fig.16 Schematic setup of Tm-doped fiber laser SBC

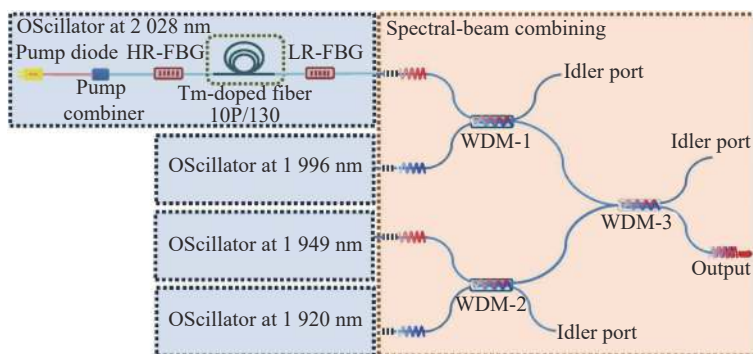


图 17 基于 WDM 级联的掺铥光纤激光光谱合成结构简图

Fig.17 Configuration of Tm-doped fiber laser SBC experiment based on WDM

4.2 宽光谱的大功率合成系统

在以往进行的基于面光栅的光纤激光光谱合成中,由于光栅的色散作用,单路激光的输出线宽将影响合成光束的输出光束质量。为保证合成系统光束质量的性能,单路激光线宽应小于 10 GHz^[118],这极大地增加了用于合成的高功率、窄线宽激光器的研制难度。如采用宽谱激光作为放大器种子光源,则有可能成量级地提升单路激光的最大输出功率,保证光谱合成系统输出总功率的同时减小系统的复杂度。对此,A. Liu 等人提出了利用光栅对结构抑制光谱展宽所引起的光束质量退化^[119]。之后,T. H. Lotus 等人在此基础上对双光栅光谱合成结构进行了理论分析和实

验验证,表明该方案在降低单路线宽要求和合成光束质量退化程度方面具有优势^[120]。近年,中国工程物理研究院对双光栅光谱合成中的关键技术进行了理论研究和大功率实验验证。目前,高功率可合成窄线宽子束激光功率已达到 3 kW 量级^[121-122],短波长窄线宽子束激光功率已突破 2 kW^[123],基于偏振相关多层电介质光栅的光谱合成输出功率达到 10 kW 量级^[124]。

在基于体布拉格光栅的光谱合成研究方面,受系统合成效率的限制,用以合成的单路激光线宽和相邻激光光谱间隔分别在 GHz 和 10 GHz 量级,这对单路激光和体光栅的性能都提出了严苛的要求:一方面,

受限于非线性效应,单路激光输出功率难以提升;另一方面,体光栅衍射光谱的边带表明透射光束的损耗具有波长敏感性,增大了系统热管理的难度。对此,中国工程物理研究院利用宽光谱间隔的体布拉格光栅光谱合成方式,获得了 2.5 kW 激光输出,放宽了对单路激光线宽和功率的限制^[62]。

4.3 模块化的多谱段合成系统

在以往的实验研究中,纵向级联型光谱合成系统的光路线性排布,只能在某一方向上进行光谱合成。这样不仅造成系统的光路较长,而且系统的路数和功

率提升受到限制。为了实现路数、光谱和功率可拓展的实用型光谱合成系统,模块化的系统设计迫在眉睫。中佛罗里达大学研究人员提出将多个不同倾角的体布拉格光栅固定在同一个光热折变玻璃底板上作为一个模块,每个模块均合成一定数量的激光光束,多个模块组合在一起同时实现不同方向的激光光谱合成,系统结构如图 18 所示^[125]。在相同功率水平条件下,这种模块化的设计方案能够将原有合成系统体积减小八倍,同时增加系统的机械稳定性。

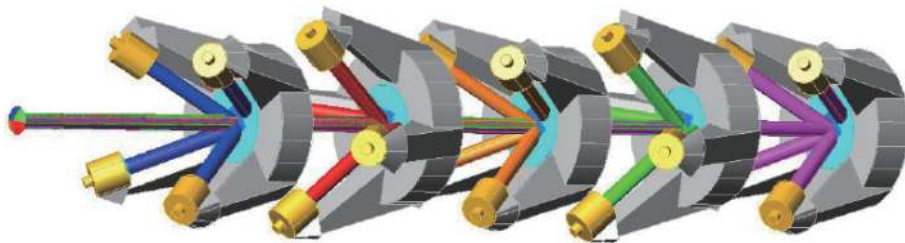


图 18 五组模块化的 VBG 光谱合成系统

Fig.18 Five-element stack of VBG SBC

除了系统结构的模块化设计外,插件灵活的单路高功率激光模块也是实现多谱段、集成化光谱合成系统的有效方式。当前,国内外对于激光光谱合成技术的研究结果已经表明光谱合成实现高功率高光束质量激光不存在物理问题。然而,激光光束相对角度的高精度调节与控制,必须通过模块化的多路激光束精密封装技术才能解决,多路激光与光栅空间光路模块化设计与制造技术是实现 100 路量级、100 kW 功率输出、高光束质量、紧凑化、高效率与便于维护的核心关键技术。图 19 所示为插件式光纤激光模块的封装模型^[22]。两路千瓦级光纤激光器集成在一个模块上,共用一套供电设备和冷却装置。目前,该模块在输出光谱线宽小于 11 GHz 水平下的输出功率大于 2 kW,斜率效率达到 85%。这种面包板插件式封装模

块作为光谱合成的光源,不仅能够提升单路激光输出功率,具备宽光谱输出能力,而且可以根据需要灵活增加或减少合成激光的波长与功率,同时实现单路激光在光栅色散面内紧密排布的结构,为未来实现集成化、轻量化、小型化的大功率、多谱段光谱合成系统提供了可能。

4.4 紧凑型混合合成系统

无论是相干合成还是光谱合成,在系统功率提升方面都具有一定的限制。例如,光谱合成系统的功率提升受到可用于合成的增益谱宽的限制;相干合成系统由于填充因子和相位噪声等因素的限制,更多路数和更高效率的相干合成技术还没有得到完全突破。利用光谱合成与相干合成的混合合成技术有望打破单一合成方式的技术瓶颈,实现合成路数和功率的增长。 N 路激光经过相干合成后作为一个整体输出, M 个这样的相干合成系统输出不同波长的激光再经过光谱合成,最终实现 $N \times M$ 路激光合成^[126-127]。

例如,美国中佛罗里达大学的研究人员提出基于体布拉格光栅的被动相干合成与光谱合成混合合成系统,系统模型如图 20 所示^[128]。多路激光先经过 VBG 进行相干合成,每一个相干合成单元作为一个

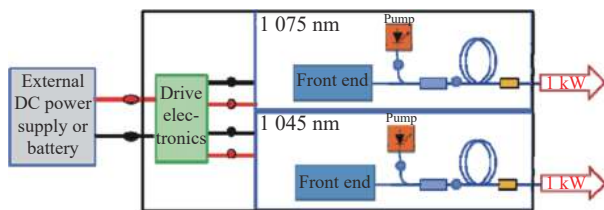


图 19 两路 1 kW 光纤激光封装模块结构图

Fig.19 Schematic of packaged 2x1 kW fiber laser module

模块, 最终实现多个模块的光谱合成输出, 并预计一个这样的系统能够达到 100 kW 量级功率的激光输出。

2015 年, 笔者所在课题组提出利用主动锁相和宽带二色镜, 搭建光纤激光主动相干合成和光谱合成的混合合成系统^[129]。系统结构如图 21 所示, 四路输出功率 20 W 的线偏振光纤激光放大器经过偏振合成后作为一个模块输出, 最后一级利用二色镜对两个模块输出的激光进行光谱合成。全系统输出功率达到 142.1 W, 合成效率大于 90%, 合成光束质量 M^2 因子在 x 和 y 方向上均为 1.1。该实验证明了基于光谱合成技术与相干合成技术的结构紧凑的混合合成系统的可行性。

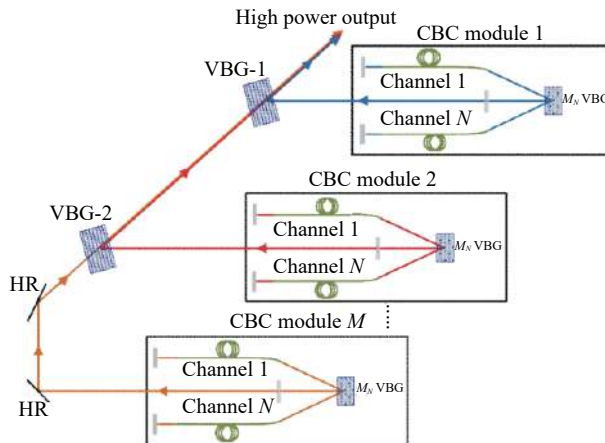


图 20 基于 VBG 的光谱合成与相干合成混合合成系统模型
Fig.20 Hybrid spectral and coherent beam combining scheme using VBGs

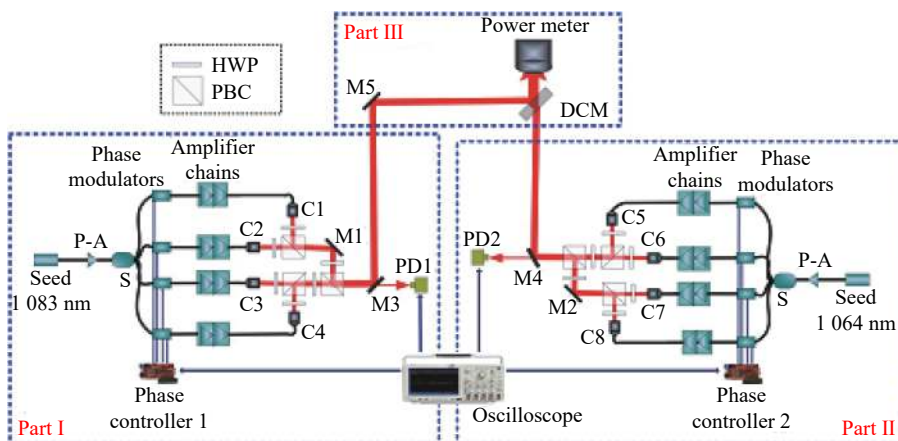


图 21 基于光谱合成与偏振合成的混合合成系统结构简图
Fig.21 Hybrid spectral and polarized beam combining scheme

2017 年, 中国工程物理研究院报道了利用双光栅光谱合成技术和偏振合成技术构成光纤激光混合合成系统, 实现五束不同波长激光的合成输出, 功率达到 5.02 kW, 合成效率 91.2%, 光束质量 M^2 因子为 2.96×1.52 ^[130]。

4.5 光源介质多样化

以往进行的光谱合成实验大都围绕半导体激光器和光纤激光器展开。随着激光推进、激光传能等领域对高功率、高光束质量激光器的需求提升, 不同种类、不同波段的高亮度固体激光器的研制速率也在显著提升。例如, 2009 年, 美国诺斯罗普·格鲁曼公司实现了七路 15 kW 板条激光器相干合成, 输出功率为 105.5 kW, 光束质量因子小于 2.9 倍衍射极限, 电光转换效率达 19.3%^[131]。而在此前, 2007 年 2 月, 实现

3.9 kW 单路激光模块; 2007 年 12 月, 实现 15.3 kW、1.58 倍衍射极限的激光链路; 2008 年 7 月, 实现 30 kW 两路合成激光输出。又如, 太赫兹激光光源在遥感、成像、大容量保密通信、无损检测与诊断、生物与化学传感、安检、工业过程监测、扫描近场光学显微镜等领域具有很大应用潜力^[132-137], 成为近年的研究热点。为了制造出结构紧凑、功率高、成本低的高效率太赫兹源, 太赫兹量子级联激光器^[138-141]和锁相阵列太赫兹激光迅速发展起来^[142-143]。未来, 光谱合成或将成为实现高功率、高光束质量新型固体激光输出的研究方向之一。

5 总结与展望

光谱合成技术几乎是伴随着半导体激光器的发

展同步进行的, 光纤激光的出现极大地促进了高功率光谱合成技术的发展。光谱合成的目的是提升系统的输出功率并保持良好的光束质量。因此, 合成光束的光束质量与合成效率就成为了光谱合成方案实施的核心。无论是哪种光谱合成方案, 关键点都是实现激光合成路数的拓展, 提升输出功率并保持光束质量。近年来, 研究人员将工作重点放在可光谱合成的单路激光设计与优化、光谱合成元件的性能提升以及光谱合成系统结构与功能的升级改造上。目前, 基于千瓦级激光模块光谱合成的万瓦级光谱合成系统已经实现。通过光谱合成技术实现更高功率激光输出, 极大推动了激光在材料加工、国家安全等领域的应用。除此之外, 随着成像探测、生物医疗、信息通信、网络安全等领域的发展以及相关产业的应用需求, 脉冲激光光谱合成以及特殊波段激光光谱合成也将成为科研人员越来越关注的焦点。近几年, 国内在大功率光谱合成光源方面呈现出强劲的赶超趋势, 在窄线宽激光光源、光栅制造关键技术、万瓦级光谱合成技术等方面不断涌现出优秀的科研成果, 为下一步实现小型化、轻量化、集成化的更高功率、更宽谱段的多样化实用型激光光谱合成系统奠定了坚实基础。

参考文献:

- [1] Enloe L H, Rodda J L. Laser phase-locked loop [J]. *Proc of IEEE*, 1965, 53: 165-166.
- [2] Stover H L, Steier W H. Locking of laser oscillators by light injection [J]. *Appl Phys Lett*, 1966, 8(4): 91-93.
- [3] Yu C X, Fan T Y. Beam Combining [M]. New York: McGraw-Hill, 2011: 533-571.
- [4] Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun, et al. Coherent beam combining of high power fiber lasers: Progress and prospect [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2013, 43(9): 979-990. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] Brocklesby W S, Nilsson J, Schreiber T, et al. ICAN as a new laser paradigm for high energy, high average power femtosecond pulses [J]. *Eur Phys J*, 2014, 223: 1189-1195.
- [7] Ma P, Zhou P, Ma Y, et al. Coherent polarization beam combining of four high-power fiber amplifiers using single-frequency dithering technique [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(12): 1024-1026.
- [8] Pawlak R J. Recent developments and near term directions for Navy laser weapons system (LaWS) testbed[C]//SPIE, 2012, 8547: 854705.
- [9] Mohring B, Dietrich S, Tassini L, et al. High-energy laser activities at MBDA Germany[C]//SPIE, 2013, 8733: 873304.
- [10] Ludewigt K, Riesbeck T, Graf A, et al. 50 kW laser weapon demonstrator of Rheinmetall Waffe Munition[C]//SPIE, 2013, 8898: 88980N.
- [11] Lei C, Gu Y, Chen Z, et al. Incoherent beam combining of fiber lasers by an all-fiber 7×1 signal combiner at a power level of 14 kW [J]. *Opt Express*, 2018, 26(8): 10421-10427.
- [12] Sanchez-Rubio A, Fan T Y, Augst S J, et al. Wavelength beam combining for power and brightness scaling of laser systems [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2014, 20(2): 52-66.
- [13] Augst S J, Redmond S M, Yu C X, et al. Sanchez. Coherent and spectral beam combining of fiber lasers[C]//SPIE, 2012, 8237: 823704.
- [14] Huang R K, Chann B, Missaggia L J, et al. Sanchez-Rubio. High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(4): 209-211.
- [15] Chann B, Goyal A K, Fan T Y, et al. Efficient, high-brightness wavelength-beam-combined commercial off-the-shelf diode stacks achieved by use of a wavelength-chirped volume Bragg grating [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(9): 1253-1255.
- [16] Loftus T H, Thomas A M, Hoffman P R, et al. Spectral beam-combining fiber lasers for high-average-power applications [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2007, 13(3): 487-497.
- [17] Loftus T H, Liu A, Hoffman P R, et al. 258 W of spectrally beam combined power with near-diffraction limited beam quality[C]//SPIE, 2006, 6102: 61020S.
- [18] Loftus T H, Liu A, Hoffman P R, et al. 522 W average power, spectrally beam-combined fiber laser with near-diffraction-limited beam quality [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(4): 349-351.
- [19] Afzal R S, Honea E, Savage-Leuchs M, et al. Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency and brightness [C]//SPIE, 2012, 8547: 854706.
- [20] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, et al. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[C]//SPIE, 2016, 9730: 97300Y.
- [21] Reich M, Limpert J, Liem A, et al. Spectral beam combining of ytterbium-doped fiber lasers with a total output power of 100 W[C]//Europhys Conf Abstracts, 2004: 28C Fib-10137.

- [22] Klingebiel S, Röser F, Ortac B, et al. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency [J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24(8): 1716-1720.
- [23] Schreiber T, Wirth C, Schmidt O, et al. Incoherent beam combining of continuous-wave and pulsed Yb-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(2): 354-360.
- [24] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, et al. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(16): 3118-3120.
- [25] Decker J, Crump P, Fricke J, et al. 25-W monolithic spectrally stabilized 975 nm minibars for dense spectral beam combining [J]. *IEEE Photonics Tech Lett*, 2015, 27: 1675-1678.
- [26] Witte U, Traub M, Meo A D, et al. Compact 35 μm fiber coupled diode laser module based on dense wavelength division multiplexing of NBA mini-bars[C]//SPIE, 2017, 9733: 97330H.
- [27] Sevia A, Andrusyak O, Ciapurin I, et al. Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(4): 384-386.
- [28] Drachenberg D, Divliansky I, Smirnov V, et al. High power spectral beam combining of fiber lasers with ultra high spectral density by thermal tuning of volume Bragg gratings [C]//SPIE, 2011, 7914: 79141F.
- [29] Ott D, Divliansky I, Anderson B, et al. Scaling the spectral beam combining channels in a multiplexed volume Bragg grating [J]. *Opt Express*, 2013, 21(24): 29620-29627.
- [30] Regelskis K, Hou K C, Raciukaitis G, et al. Spatial-dispersion-free spectral beam combining of high power pulsed Yb-doped fiber lasers[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, OSA Technical Digest, 2008: CMA4.
- [31] Ma Yi, Yan Hong, Peng Wanjing, 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. (in Chinese)
- [32] Meng H, Sun T, Tan H, et al. High-brightness spectral beam combining of diode laser array stack in an external cavity [J]. *Opt Express*, 2015, 23(17): 21819-21824.
- [33] Zheng Y, Yang Y, Wang J, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation [J]. *Opt Express*, 2016, 24(11): 12064-12071.
- [34] Zhang J, Peng H, Fu X, et al. CW 50W/M² = 10.9 diode laser source by spectral beam combining based on a transmission grating [J]. *Opt Express*, 2013, 21(3): 3627-3632.
- [35] Jiang Man, Ma Pengfei, Zhou Pu, et al. Beam quality in spectral beam combination based on multi-layer dielectric grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(10): 104203. (in Chinese)
- [36] 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]. *Opt Express*, 2017, 25(26): 32783-32791.
- [37] Zheng Ye, Yang Yifeng, Zhao Xiang, et al. Research Progress on Spectral Beam Combining Technology of High-Power Fiber Lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201018. (in Chinese)
- [38] Zhang Jun, Chen Yongyi, Qin Li, et al. Advances in high power high beam quality diode lasers [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(32): 3719-3728. (in Chinese)
- [39] Nosu K, Ishio H, Hashimoto K. Multireflection optical multi/demultiplexer using interference filters [J]. *Electron Lett*, 1979, 15(14): 414-415.
- [40] Minott P O, Abshire J B. Grating rhomb diode laser power combiner[C]//SPIE, 1987, 756: 38-49.
- [41] Rall J A R, Spadin P L, Zimmerman R K, et al. Test results of a diffraction grating beam combiner[C]//Free-Space Laser Commun Technol, 1990, 1218: 264-275.
- [42] White I H. A multichannel grating cavity laser for wavelength division multiplexing applications [J]. *J Lightwave Technol*, 1991, 9(7): 893-899.
- [43] Farries M C, Carter A C, Jones G G, et al. Tunable multiwavelength semiconductor laser with single fibre output [J]. *Electron Lett*, 1991, 27(17): 1498-1499.
- [44] Chann B, Huang R K, Missaggia L J, et al. High-power, near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(16): 2104-2106.
- [45] Cook C C, Fan T Y. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity[C]//OSA, 1999, 26: 163-166.
- [46] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, et al. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(6): 405-407.
- [47] Bochove E J. Theory of spectral beam combining of fiber lasers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38(5): 432-445.
- [48] Augst S J, Goyal A K, Aggarwal R L, et al. Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(5): 331-333.
- [49] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance

- sources [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2005, 11(3): 567-577.
- [50] 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]. *Appl Opt*, 2014, 53(6): 1242-1246.
- [51] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, et al. 2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers [J]. *Opt Express*, 2009, 17(3): 1178-1183.
- [52] Newswire P R. Lockheed Martin Demonstrates Weapons Grade High Power Fiber Laser [EB/OL]. [2014-01-28]. <https://news.lockheedmartin>.
- [53] Zhang Yan, Zhang Bin, Zhu Songjun. Analysis of the property of the beam after spectral beam combining [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(8): 4590-4595. (in Chinese)
- [54] Yin Suqin, Zhang Bin. Analysis of the output characteristics of high-power fiber lasers after spectral beam combination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0214002. (in Chinese)
- [55] Yu Yi, Wang Weimin, Lu Yan, et al. Simulation of spectrally beam combined diode laser based on grating-cavity [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 189-192. (in Chinese)
- [56] Liu Bo, Zhang Xue, Han Junting, et al. Wavelength beam combining of laser diode array by wavelength-chirped volume Bragg grating external cavity [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(7): 1057-1062. (in Chinese)
- [57] 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: 721-724. (in Chinese)
- [58] Shen Benjian, Zheng Guangwei, Tan Jichun, et al. Spectral beam combining by phase-shifted reflective volume Bragg gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 12: 3056-3059. (in Chinese)
- [59] Zhan Shengbao, Zhao Shanghong, Ni Shouchun, et al. Design of spectral beam combining based on reflecting volume Bragg grating [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 4: 929-933. (in Chinese)
- [60] 田飞, 颜宏, 陈黎, 等. 基于平行双光栅的三路光纤激光光谱合成实验研究[C]//中物院高能激光科学与技术重点实验室第三届学术交流会论文集, 2014: 37-41.
- [61] 梁小宝, 周泰斗, 王小军, 等. 体布拉格光栅用于高功率宽谱组束的研究[C]//中物院高能激光科学与技术重点实验室第三届学术交流会论文集, 2014: 42-46.
- [62] Zhou Taidou, Liang Xiaobao, Li Chao, et al. 2.5 kW average power, two-channel spectral-beam-combined output based on transmitting volume Bragg grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(8): 084204. (in Chinese)
- [63] 颜宏. 基于双光栅的光纤激光光谱合成[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2019.
- [64] Wu Z, Zhong Z, Yang L, et al. Beam properties in a spectral beam combining system based on trapezoidal multilayer dielectric gratings [J]. *J Opt Soc Am B*, 2016, 33(2): 171-179.
- [65] Yang L, Wu Z, Zhang B. Influence of thermal deformation of a multilayer dielectric grating on a spectrally combined beam [J]. *Appl Opt*, 2016, 55(32): 9091-9100.
- [66] Chen J, Zhang Y, Wang Y, et al. Polarization-independent broadband beam combining grating with measured over 98% diffraction efficiency from 1023nm to 1080nm [J]. *Opt Lett*, 2017, 42(19): 4016-4019.
- [67] Tian J, Zhang J, Peng H, et al. High power diode laser source with a transmission grating for two spectral beam combining [J]. *Optik*, 2019, 192: 162918.
- [68] Sun F, Shu S, Zhao Y, et al. High-brightness diode lasers obtained via off-axis spectral beam combining with selective feedback [J]. *Opt Express*, 2018, 26(17): 21813-21818.
- [69] Sun Fangyuan. Investigation of high beam quality laser by external cavity combination technology[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [70] Jiang Man. Study on the key technique of fiber laser spectral beam combining [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [71] Chen F, Ma J, Zhu R, et al. Coupling efficiency model for spectral beam combining of high-power fiber lasers calculated from spectrum [J]. *Appl Opt*, 2017, 56(10): 2574-2579.
- [72] Chen F, Zhang J, Ma J, et al. Beam quality analysis and optimization for 10 kW-level spectral beam combination system [J]. *Opt Commun*, 2019, 444: 45-55.
- [73] Liu Q, Jin Y, Wu J, et al. Fabrication of the polarization independent spectral beam combining grating [C]//SPIE, 2016, 10255: 1025514
- [74] Mao X, Li C, Qiu K, et al. Design and fabrication of 1300-line/mm polarization-independent reflection gratings for spectral beam combining [J]. *Opt Commun*, 2020, 458: 124883-4.
- [75] Wu Z, Xu Y, Huang Y. Influence of process errors of dielectric gratings on beam properties in transmission spectral-beam-combining systems [J]. *Appl Opt*, 2019, 58(16): 4300-4305.
- [76] Schmidt O, Wirth C, Nodop D, et al. Spectral beam combination of fiber amplified ns-pulses by means of

- interference filters [J]. *Opt Express*, 2009, 17(25): 22974-22982.
- [77] Jiao H, Niu X, Zhang X, et al. Design and fabrication of a superior nonpolarizing long-wavelength pass edge filter applied in laser beam combining technology [J]. *Appl Opt*, 2020, 59(5): A162-A166.
- [78] Efimov O M, Glebov L B, Smirnov V I. High efficiency volume diffractive elements in photo-thermo-refractive glass: US, 6673497 [P]. 2004-01-06.
- [79] Andrusyak O, Smirnov V, Venus G, et al. Spectral combining and coherent coupling of lasers by volume Bragg gratings [J]. *IEEE J Select Top Quantum Electron*, 2009, 15(2): 344-353.
- [80] Andrusyak O, Ciapurin I, Smirnov V, et al. Spectral beam combining of fiber lasers with increased channel density[C]//SPIE, 2007, 6453: 64531L.
- [81] Hamilton C E, Tidwell S C, Lowenthal D D. High-power laser source with spectrally beam-combined diode laser bars [C]//SPIE, 2004, 5336: 1-10.
- [82] Vijayakumar D, Jensen O B, Ostendorf R, et al. Spectral beam combining of a 980 nm tapered diode laser bar [J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 893-8.
- [83] Hecht J. Beam combining cranks up the power [J]. *Laser Focus World*, 2012, 48: 41-43.
- [84] Huang R K, Chann B, Burgess J, et al. Teradiode's high brightness semiconductor lasers [C]//SPIE, 2016, 9730: 97300C.
- [85] Witte U, Schneider F, Traub M, et al. kW-class direct diode laser for sheet metal cutting based on DWDM of pump modules by use of ultra-steep dielectric filters [J]. *Opt Express*, 2016, 24(20): 22917-22929.
- [86] Huang R K, Chann B, Glenn J D. Ultra-high brightness wavelength-stabilized kW-class fiber coupled diode laser[C]//SPIE, 2011, 7918: 791810.
- [87] Wood M. Laser beam technology development and application [C]//7th Alta Brillanza Workshop, 2015: 24-25.
- [88] Zimer H, Haas M, Nagel S, et al. Spectrally stabilized and combined diode lasers[C]//IEEE Conf on High Power Diode Lasers and Systems, 2015: 31-32.
- [89] Heinemann S, Fritsche H, Kruschke B, et al. Compact high brightness diode laser emitting 500W from a 100 μm fiber[C]//SPIE, 2013, 8605: 86050Q.
- [90] Unger A, Uthoff R, Stoiber M, et al. Tailored bar concepts for 10 mm-mrad fiber coupled modules scalable to kW-class direct diode lasers[C]//SPIE, 2015, 9348: 934809.
- [91] Hengesbach S, Krauch N, Holly C, et al. High-power dense wavelength division multiplexing of multimode diode laser radiation based on volume Bragg gratings [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(16): 3154-3157.
- [92] Fritsche H, Krusche B, Koch R, et al. High brightness, direct diode laser with kW output power [C]//SPIE, 2014, 8965: 89650G.
- [93] Ferrario F, Fritsche H, Grohe A, et al. Building block diode laser concept for high brightness laser output in the kW range and its applications [C]//SPIE, 2016, 9730: 97300G.
- [94] Witte U, Schneider F, Holly C, et al. kW-class direct diode laser for sheet metal cutting based on commercial pump modules [C]//SPIE, 2017, 10086: 1008608.
- [95] Zimer H, Haas M, Ried S, et al. Thin film filter wavelength-locked laser cavity for spectral beam combining of diode laser arrays [C]//Photonics Conference, 2014: 230-231.
- [96] Haas M, Rauch S, Nagel S, et al. Thin-film filter wavelength-stabilized, grating combined, high-brightness kW-class direct diode laser [J]. *Opt Express*, 2017, 25(15): 17657-17670.
- [97] Strohmaier S G, Erbert G, Meissner-Schenk A H, et al. kW-class diode laser bars[C]//SPIE, 2017, 10086: 100860C.
- [98] Zhang J, Peng H Y, Liu Y, et al. Hundred-watt diode laser source by spectral beam combining [J]. *Laser Phys Lett*, 2014, 11(12): 125803.
- [99] Zhu Z, Gou L, Jiang M H, et al. High beam quality in two directions and high efficiency output of a diode laser array by spectral-beam-combining [J]. *Opt Express*, 2014, 22(15): 17804-17809.
- [100] Meng Huicheng, Wu Deyong, Tan Hao, et al. Experimental study on high brightness and narrow band of diode laser by spectral beam combining of grating-external cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0302003. (in Chinese)
- [101] Meng H, Ruan X, Du W, et al. Scaling the spectral beam combining channel by multiple diode laser stacks in an external cavity [J]. *Laser Phys Lett*, 2017, 14(4): 045811.
- [102] Lin X, Lin G, Zhao P, et al. Generation of high brightness diode laser by using spectral and polarization beam combination [J]. *Opt and Laser Tech*, 2019, 116: 219-223.
- [103] Schmidt O, Andersen T V, Limpert J, et al. 187 W, 3.7 mJ from spectrally combined pulsed 2 ns fiber amplifiers [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(3): 226-228.
- [104] Schmidt O, Wirth C, Tsybin I, et al. Average power of 1.1 kW from spectrally combined, fiber-amplified, nanosecond-pulsed sources [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(10): 1567-1569.
- [105] Newswire P R. Turning up the heat: latest evolution of Lockheed Martin laser weapon system stops truck in field test

- [EB/OL]. [2015-03-03]. <https://news.lockheedmartin.com/Up-the-Heat-Latest-Evolution-of-Lockheed-Martin-Laser-Weapon-System-Stops-Truck-in-Field-Test>.
- [106] Newswire P R. Lockheed Martin to deliver world record-setting 60 kW laser to U.S. Army [EB/OL]. [2017-03-16]. <http://news.lockheedmartin.com>.
- [107] Newswire P R. Team Dynetics Receives Contract For Next Phase Of 100 KW-Class Laser Weapon System For U.S. Army [EB/OL]. [2018-08-06]. <https://news.lockheedmartin.com>.
- [108] Liang X, Chen L, Li C, et al. High average power spectral beam combining employing volume Bragg gratings [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(7): 071012.
- [109] Zhou T, Liang X, Li C, et al. Spectral beam combining of fiber lasers by using reflecting volume Bragg gratings [J]. *Chin Phys Lett*, 2016, 33(12): 124205.
- [110] 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): 7-9. (in Chinese)
- [111] Jiang M, Ma P, Zhou P, et al. Spectral beam combining of fiber laser with wavelength separation broader than 60 nm [J]. *Laser Physics*, 2016, 26: 115104.
- [112] Wang X, Jin X, Zhou P, et al. 105 W ultra-narrowband nanosecond pulsed laser at 2 μm based on a monolithic Tm-doped fiber MOPA [J]. *Opt Express*, 2015, 23(4): 4233-4241.
- [113] Jin X, Lou Z, Zhang H, et al. Random distributed feedback fiber laser at 2.1 μm [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(21): 4923-4926.
- [114] Jin X, Lee E, Luo J, et al. High-efficiency ultrafast Tm-doped fiber amplifier based on resonant pumping [J]. *Opt Lett*, 2018, 43(7): 1431-1434.
- [115] Sims R A, Willis C C C, Kadwani P, et al. Spectral beam combining of 2 μm Tm fiber laser systems [J]. *Opt Commun*, 2011, 284: 1988-1991.
- [116] Yilmaz S, Ottenhues C, Theeg T, et al. Single-mode spectral beam combining of high power Tm-doped fiber lasers with WDM cascades [C]//SPIE, 2016, 9728: 97280O.
- [117] Limpert J, Röser F, Klingebiel S, et al. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2007, 13(3): 537-545.
- [118] Liu A, Mead R, Vatter T, et al. Spectral beam combining of high power fiber lasers [C]//SPIE 2004, 5335: 81-88.
- [119] Madasamy P, Jander D R, Brooks C D, et al. Dual-grating spectral beam combining of high-power fiber lasers [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(2): 337-343.
- [120] Su Rongtao, Ma Pengfei, Wang Xiaolin, et al. 2.43kw power output of linearly polarized narrow linewidth single mode fiber amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0315001. (in Chinese)
- [121] Ma P, Xiao H, Meng D, et al. High power all-fiberized and narrow-bandwidth MOPA system by tandem pumping strategy for thermally induced mode instability suppression [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e57.
- [122] Platonov N, Yagodkin R, Cruz J, et al. 1.5 kW linear polarized on PM fiber and 2 kW on non-PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier [C]//SPIE, 2017, 10085: 100850M.
- [123] Ma Yi, Yan Hong, Sun Yinhong, et al. Recent progress of key technologies for spectral beam combining of fiber laser with dual-gratings configuration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103002. (in Chinese)
- [124] Andrusyak O, Smimov V, Venus G, et al. Applications of volume Bragg gratings for spectral control and beam combining of high power fiber lasers [C]//SPIE, 2009, 7195: 71951Q.
- [125] Fan T Y, Goyal A, Sanchez A. Higher power spectrally combined laser systems and related methods. US Patent 6, 697, 192, Feb. 24, 2004.
- [126] Fridman M, Eckhouse V, Davidson N, et al. Simultaneous coherent and spectral addition of fiber lasers [J]. *Opt Lett*, 2008, 33: 648-650.
- [127] Jain A, Drachenberg D, Andrusyak O, et al. Coherent and spectral beam combining of fiber lasers using volume Bragg gratings [C]//SPIE, 2010, 7686: 768615.
- [128] Ma P, Jiang M, Wang X, et al. Hybrid Beam Combination by active phasing and bandwidth-controlled dichromatic mirror [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(19): 2099-2102.
- [129] Yan H, Man Y, Sun Y, et al. Scalable hybrid beam combining of kilowatt fiber amplifiers into a 5-kW beam [J]. *Opt Commun*, 2017, 397: 95-99.
- [130] McNaught S J, Asman C P, Injeyan H, et al. 100-kW coherently combined Nd: YAG MOPA laser array [C]//Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest, 2009: FThD2.
- [131] Lim Y L, Dean P, Nikolic M, et al. Demonstration of a self-mixing displacement sensor based on terahertz quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(8): 156-1.
- [132] Grant P D, Laframboise S R, Dudek R, et al. Terahertz free space communications demonstration with quantum cascade laser and quantum well photodetector [J]. *Electronics Letters*,

- 2009, 45(18): 952-954.
- [133] Abramov P I, Kuznetsov E V, Skvortsov L A, et al. Skvortsova. Quantum-Cascade Lasers in Medicine and Biology (Review) [J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2019, 86(1): 1-26.
- [134] Liang G, Liu T, and Wang Q J. Recent Developments of Terahertz Quantum Cascade Lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 1-18.
- [135] Han Y J, Partington J, Pun R C, et al. Gas spectroscopy through multimode self-mixing in a double-metal terahertz quantum cascade laser [J]. *Opt Lett*, 2018, 43(24): 5933-5936.
- [136] Chen X, Liu X, Guo X, et al. THz near-field imaging of extreme subwavelength metal structures [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(3): 687-694.
- [137] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser [J]. *Nature*, 2002, 417: 156.
- [138] Williams B S. Terahertz quantum-cascade lasers [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1: 517-525.
- [139] Deutsch C, Kainz M A, Krall M, et al. High-Power Growth-Robust InGaAs/InAlAs Terahertz Quantum Cascade Lasers [J]. *Acs Photonics*, 2017, 4(4): 957-962.
- [140] Zhu H, Zhu H, Wang F, et al. Terahertz master-oscillator power-amplifier quantum cascade laser with a grating coupler of extremely low reflectivity [J]. *Opt Express*, 2018, 26(2): 1942-1953.
- [141] Jin Y, Zhu Q, Reno J L, et al. High power edge-cum-surface emitting terahertz laser arrays phased locked by vacuum guided plasmon waves [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116: 131103.
- [142] Jin Y, Reno J L, Kumar S. Phase-locked terahertz plasmonic laser array with 2 W output power in a single spectral mode [J]. *Optica*, 2020, 7(6): 708-715.
- [143] Kao T, Hu Q, Reno J L. Phase-locked arrays of surface-emitting terahertz quantum-cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96: 101106.