

## ❖ 特约专栏 ❖

**基于双光栅的光纤激光光谱合成关键技术研究进展(特邀)**

马毅<sup>1,2</sup>, 颜宏<sup>1,2</sup>, 孙殷宏<sup>1,2</sup>, 彭万敬<sup>1,2</sup>, 李建民<sup>1,2</sup>, 王树峰<sup>1,2</sup>, 李腾龙<sup>1,2</sup>, 王岩山<sup>1,2</sup>, 唐淳<sup>1,2</sup>, 张凯<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:** 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(SBC)既实现了多路光纤激光高光束质量共孔径合束输出, 又降低了单路光纤激光的线宽要求, 逐渐成为多纤光谱合成的重要技术途径之一。介绍了基于双 MLD 光栅光谱合成的基本原理, 简要分析了其涉及的关键技术。回顾了高功率可合成窄线宽光纤激光器、高功率高效率短波长光纤激光器、大色散高衍射效率 MLD 光栅和高集成度密集组束等主要关键技术研究进展。介绍了中国工程物理研究院应用电子学研究所基于双 MLD 光栅光谱合成关键技术研究方面的最新研究进展。对双 MLD 光栅光谱合成光源的发展潜力进行了展望。

**关键词:** 光纤激光器; 光谱合成; 双 MLD 光栅; 窄线宽; 密集组束

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0103002

## Recent progress of key technologies for spectral beam combining of fiber laser with dual-gratings configuration(Invited)

Ma Yi<sup>1,2</sup>, Yan Hong<sup>1,2</sup>, Sun Yinhong<sup>1,2</sup>, Peng Wanjing<sup>1,2</sup>, Li Jianmin<sup>1,2</sup>, Wang Shufeng<sup>1,2</sup>,  
Li Tenglong<sup>1,2</sup>, Wang Yanshan<sup>1,2</sup>, Tang Chun<sup>1,2</sup>, Zhang Kai<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

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

**Abstract:** A spectral beam combination (SBC) system with dual Multi-Layer Dielectric (MLD) grating dispersion compensation configuration, which can combine multiple fiber lasers into a common aperture beam with high beam quality and relax the linewidth requirement of the individual fiber laser, has become gradually one of the most important technique route of fiber laser beam combining. The basic principle and the key technologies of the SBC system with dual-MLD-grating configuration were introduced and analyzed briefly. The recent progress of the main key technologies about high power beam combinable narrow linewidth fiber laser, high power high efficiency short wavelength narrow linewidth fiber laser, large dispersion high efficiency MLD grating and high integration dense beam combining were reviewed. The recent progress on the key technologies of SBC with dual-MLD-configuration in Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, were also presented. The potential of the SBC with dual-MLD-configuration was prospected.

**Key words:** fiber laser; spectral beam combining; dual-MLD-grating; narrow linewidth; dense combining

收稿日期: 2017-10-09; 修订日期: 2017-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(61605191)

作者简介: 马毅(1977-), 男, 研究员, 硕士, 主要从事高功率固体激光和光纤激光技术方面的研究。Email: rufinecn@caep.cn

## 0 引言

高功率光纤激光器具有效率高、体积小、光束质量优异、工作稳定可靠和环境适应性强等突出优势,在国防光电对抗等军事领域以及工业加工等民用领域具有广阔的应用前景。近几年光纤材料、器件和系统集成技术不断取得新的进展和突破,在  $1\ \mu\text{m}$  波段的单纤激光在 2009 年和 2012 年已经先后实现了 10 kW 单模输出<sup>[1]</sup>和 20 kW 少模输出<sup>[2]</sup>。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。因此采用相干合成以及几何并束、光谱合成等非相干合成技术成为进一步提升光纤激光输出功率的有效技术途径<sup>[3-5]</sup>。其中,多纤光谱合成技术主要利用色散光学元件的色散能力,通过色散的逆过程将多个具有不同中心波长、以不同角度入射的窄线宽光纤激光(以下称为“子束”)以相同角度出射的方式实现共孔径合束输出,其技术原理和系统结构均比较简单,能在提升输出功率同时保持良好光束质量水平,而且该技术降低或消除了参与合成的单纤子束激光的线宽、相位、偏振等方面的控制要求,较大程度降低了高功率单纤子束研制和多纤合成系统工程化转化的难度,逐渐成为多纤功率合成技术的一个重要发展方向。

目前高功率多纤光谱合成的技术途径主要分为基于双色镜(DM)、体布拉格(VBG)光栅和多层电介质膜衍射(MLD)光栅三种。2009 年,德国 Jena 大学的 Schmidt 等基于 DM 技术实现了四束光纤激光的光谱合成<sup>[6]</sup>。不过,基于 DM 的光谱合成受 DM 元件透射谱带宽和陡峭度的制约,在光纤激光有限的可利用光谱范围内的合束数量受到一定限制。美国中佛罗里达大学、中国工程物理研究院激光聚变研究中心等单位对基于 VBG 光栅的光谱合成进行了研究<sup>[7-13]</sup>。2008 年和 2015 年,美国中佛罗里达大学<sup>[7]</sup>和中国工程物理研究院激光聚变研究中心<sup>[13]</sup>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,高功率运转时 VBG 光栅的热效应会导致光束质量退化和效率下降,而大口径高质量超低吸收 VBG 光栅制作难度较大,使得基于 VBG 光栅的光谱合成在向更高功率发展时受到较大制约。由于 MLD 光栅具有低吸收、高效率的突出优势,基于 MLD 光栅的光谱合成技术得到了美国 Aculight

公司、德国 Fraunhofer 研究所和美国 Lockheed Martin 公司等单位高度关注和深入研究<sup>[14-17]</sup>。2011 年和 2015 年,德国 Fraunhofer 研究所<sup>[15]</sup>和美国 Lockheed Martin 公司<sup>[17]</sup>采用基于单个 MLD 光栅的光谱合成技术分别实现了 8.2 kW 高功率激光输出 ( $M^2=4.3@7.3\ \text{kW}$ ) 和 30 kW 近衍射极限高光束质量光谱合成输出 ( $M^2=1.6\times 1.8$ )。但是,对于基于单 MLD 光栅的光谱合成,MLD 光栅的色散将引起具有较宽线宽的单纤子束合成后光束质量出现严重退化,已有研究表明需要将参与合成的光纤激光的线宽控制到数 GHz 水平才能获得良好的光谱合成输出光束质量<sup>[5]</sup>,这极大地增加了高功率合成用窄线宽单纤子束激光器的研制难度。采用基于色散补偿构型的双 MLD 光栅光谱合成设计则可大幅降低合成光束质量控制对子束的线宽要求,逐渐成为多纤高效优质光谱合成的重要研究方向。2004 年和 2009 年,美国 Aculight 公司<sup>[18]</sup>和美国 Lockheed Martin 公司<sup>[19]</sup>采用基于双 MLD 光栅的光谱合成技术分别实现了 40 W ( $M^2=2.0$ ) 和 190 W ( $M^2\sim 1.18$ )。近几年,中国工程物理研究院应用电子学研究所对基于双 MLD 光栅光谱合成的理论和关键技术进行了较深入的研究,不断取得新的研究突破<sup>[20-22]</sup>。

文中将介绍基于双 MLD 光栅光谱合成的基本原理及其涉及的主要关键技术,重点介绍相关关键技术最新研究进展,并对其未来的发展潜力进行展望。

## 1 双 MLD 光栅光谱合成基本原理和关键技术分析

基于双 MLD 光栅的光纤激光光谱合成系统主要由窄线宽光纤激光单元、密集组束单元和双光栅光谱合成单元组成,其系统机构和基本原理示意图如图 1 所示。基于双 MLD 光栅的光纤激光光谱合成基本原理为:两块光学参数完全相同的 MLD 光栅平行放置,不同中心波长的多路窄线宽光纤激光准直后以合适的间隔平行入射到第一块 MLD 光栅上,通过第一块 MLD 光栅的色散使所有子束的 1 级衍射光束在第二块 MLD 光栅上发生重叠,通过第二块 MLD 光栅的色散使所有子束激光均从第二块 MLD 光栅上以相同的角度出射,最终实现不同波长子束

的共孔径合成输出。基于双 MLD 光栅光谱合成系统具有下述独特优点：(1) 双 MLD 光栅色散补偿设计使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远场发散角上，从而较大幅度降低了具有较宽线宽合成子束的光束质量退化程度，有利于光谱合成获得较高的光束质量水平。(2) 双 MLD 光栅设计可将合成子束的线宽要求从单 MLD 光栅的数 GHz 放宽到数十 GHz，这将有效降低合成子束提升功率的技术难度。(3) 双 MLD 光栅光谱合成子束中心波长的变化主要体现在输出光束光瞳位置的轻微变化，因此合成光束质量对子束中心波长变化不敏感，这降低了合成子束中心波长的控制要求。

子束在两个 MLD 光栅之间的光程  $L_i$  满足以下关系：

$$L_i = \frac{D \cos \beta_{i+1}}{\sin(\beta_{i+1} - \beta_i) \cos \alpha} \quad (2)$$

式中： $D$  为相邻子束的光瞳中心间距，考虑到实际系统中为保证 MLD 光栅的衍射效率，所有子束的入射角与衍射角夹角小于  $7^\circ$ ，因而衍射角之间差异性很小，近似有  $\sin(\beta_{i+1} - \beta_i) \approx (\beta_{i+1} - \beta_i)$ ，并根据光栅色散关系可知  $(\beta_{i+1} - \beta_i) = (\lambda_{i+1} - \lambda_i) / (d \cos \beta_{i+1})$ 。令  $(\lambda_{i+1} - \lambda_i) = \delta \lambda$ ，且将相邻子束衍射角近似取为  $\beta$ ，则公式(2)可以近似表示为：

$$L_i \approx \frac{D d \cos^2 \beta}{\delta \lambda \cos \alpha} \quad (3)$$

将公式(3)代入公式(1)，则公式(1)可近似表示为：

$$M^2 \approx M_0^2 \sqrt{1 + \left( \frac{D}{w_0} \cdot \frac{\Delta \lambda}{\delta \lambda} \right)^2} \quad (4)$$

从该式可以看出，双 MLD 光栅光谱合成效果不仅与子束初始光束质量有关，还与相邻子束间距、束腰宽度和子束线宽、相邻子束波长间隔有关。为了获得较好的光谱合成光束质量，原则上应尽量减少相邻子束间距与束腰宽度和子束线宽与相邻子束波长间隔的比值，但实际系统要受到有限的光栅尺寸和系统空间尺寸的限制。

对于图 1 所示的双 MLD 光栅光谱合成系统，为了简化子束密集组束单元的设计及装调难度，通常情况下采用相邻子束等空间间隔排布的设计。参考文献[22]研究了采用等空间间隔排布设计后，使用两种不同刻线密度光栅后合成子束的波长间隔分布情况、不同波段子束光束质量退化情况的变化。图 2 则给出了 40 路衍射极限子束(波长范围为 1 040~1 080 nm) 通过大色散 MLD 光栅光谱合成的光束质量在不同空间排布参数设计或不同线宽条件下的模拟计算结果。从图 2 可以看出：在相同子束线宽和束腰宽度条件下，增大相邻子束的间隔将增大光束质量退化的程度；而在确定相邻子束间隔后，尽量增加子束束腰宽度则有利于改善光谱合成光束质量，但为了兼顾系统效率，需要选择合适的扩束倍率并尽量提高子束组束单元的光束填充因子；而在确定了子束束腰宽度的条件下，采用减小子束线宽可明显改善光谱合成光束质量。图 2 的主要计算条件为：子束初始光束质量  $M^2$  为 1.0，光栅刻线密度为 1 700 线/mm，入射角为  $66.29^\circ$ 。

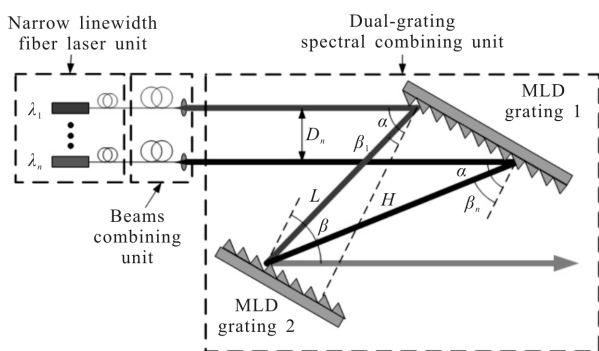


图 1 基于双 MLD 光栅色散补偿的光纤激光光谱合成系统结构及原理示意图

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

光束质量是评价多纤功率合成系统的关键技术指标参数。对于图 1 所示的双 MLD 光栅光谱合成系统，如何尽量减少合成子束的光束质量退化是其获得高光束质量输出的关键。参考文献[22]从光栅衍射方程出发，通过推导获得二阶矩线宽为  $\Delta \lambda$  的单路窄线宽子束经过图 1 所示的双光栅光谱合成系统后的光束质量  $M^2$  退化为：

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

式中： $M_0^2$  为子束初始光束质量； $L$  为子束在两块光栅间传输的距离； $\alpha$  和  $\beta$  分别为入射角和衍射角； $w_0$  为子束初始二阶矩束腰宽度； $d$  为光栅刻槽间距。

子束在两块光栅间传输的距离  $L$  受到相邻子束的空间间隔和波长间隔等参数的影响。对于图 1 所示的双 MLD 光栅光谱合成结构，中心波长为  $\lambda_i$  的

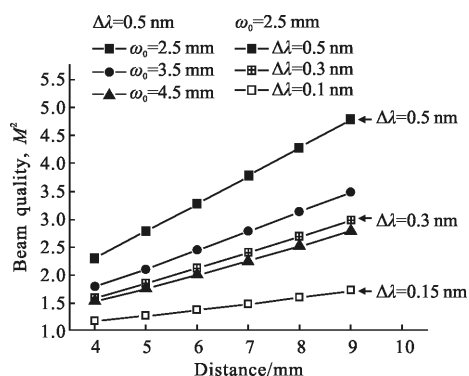


图 2 不同束腰宽度和 linewidth 条件下光谱合束光束质量与子束中心间距关系

Fig.2 Beam quality of SBC versus distance of adjacent individual fiber laser with different waist or linewidth conditions

对于图 1 所示的双 MLD 光栅光谱合成系统,通过提升子束功率、扩展合成通道等途径,原理上它具备实现数十 kW 功率甚至更高功率近衍射极限输出的潜力,但技术上如何实现更高的合成输出功率,并在功率不断提升的同时保持高的合成效率、高的光束质量和高的集成度却面临诸多的挑战:(1) 兼顾系统总功率水平需求和系统规模和复杂度的考虑,可合成窄线宽子束的功率应尽量提高,但窄线宽子束高功率放大过程中出现的四波混频(FWM)、自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)等非线性效应导致光谱展宽、受激布里渊散射(SBS)非线性效应限制功率提升、模式不稳定性恶化光束质量等问题成为其功率提升的主要障碍。(2) 将合成子束工作波长向短波长扩展是光谱合成系统扩展合成通道、提升合成输出总功率的有效技术途径,但窄线宽子束工作在短波长时,那些不处于 Yb 离子发射峰的 ASE 以及激光再吸收成为制约其高功率定标放大的主要难题。(3) 兼顾合成通道数量、空间限制和系统效率等考虑,需要采用高集成度高传输效率的密集组束设计,尽量提高光束的填充因子,但各通道的精密装调和高功率水平下的热致光学畸变和光轴漂移控制存在较大的技术难度。(4) 为了简化系统结构,双 MLD 光栅光谱合成单元应优先选用大色散偏振无关 MLD 光栅,并且需要在较宽波段范围内具备高的衍射效率以获得高的合成效率,同时还需要具备高的耐强光能力。目前,大口径耐强光偏振相关 MLD 光栅技术较成熟,但大口径耐强光大色散偏振无关 MLD 光栅对光栅的槽形、槽深、光栅周期、膜层数量

和厚度、占宽比等参数的设计和制备时的容差控制提出了苛刻的要求,技术难度大,目前技术尚不成熟。另外,MLD 光栅表面的刻槽微结构及其工艺缺陷等给提升耐强光能力带来较大的技术挑战。

综上所述,为了使图 1 所示的双 MLD 光栅光谱合成系统同时具备“高功率”、“高光束质量”、“高效率”和“高集成度”的性能,需要研究掌握高功率可合成子束线宽和模式控制技术、高功率短波长窄线宽子束高效率放大技术、高集成度密集组束和大色散宽波段高衍射效率 MLD 光栅等关键技术。近年来,国内外相关研究机构对这些关键技术进行了大量的研究,并取得了重要的研究进展,下面分别予以介绍。

## 2 双 MLD 光栅光谱合成主要关键技术研究进展

### 2.1 高功率可合成子束线宽和模式控制技术

目前高功率可合成窄线宽光纤激光器仍然主要采用主振荡器+功率放大器(MOPA)的技术途径。近几年,美国空军实验室、Nufem 公司、国防科技大学等在基于 MOPA 构型的单频光纤激光和数 GHz 窄线宽光纤激光技术研究方面取得了较大的技术进步,但受限于 SBS 非线性效应等的限制,单频光纤激光的输出功率仍未突破 1 kW<sup>[23-24]</sup>,数 GHz 窄线宽的光纤激光的输出功率也大多在 1.5 kW 以内<sup>[25-27]</sup>。

针对基于双 MLD 光栅的光谱合成应用,可合成子束线宽要求可放宽至 10-50 GHz 范围。根据种子源结构类型的不同,目前在这一线宽范围内实现较高功率输出的技术路线大致可以分为基于窄线宽光纤光栅(FBG)振荡器种子源、基于单频激光相位调制种子源和基于随机激光或超荧光激光的低相干种子源三种。FBG 振荡器种子源输出的多纵模激光在功率放大过程中的四波混频(FWM)效应给高功率下的线宽控制带来较大的挑战。2016 年,中国工程物理研究院激光聚变中心的 HUANG 等采用基于窄线宽光纤光栅(FBG)振荡器的 MOPA 构型设计,在 2 kW 输出功率水平时获得了 ~0.2 nm (~50 GHz)的窄线宽输出,当输出功率提升到 2.9 kW 时线宽已经进一步展宽到了 0.31 nm<sup>[28]</sup>。基于单频激光相位调制种子源输出的激光在功率放大过程中无明显的四波混频过程,其线宽在放大过程中基本保持不变,但为了控制

输出激光的模式采用的小芯径光纤因为非线性效应(主要是 SBS)给功率提升带来较大挑战。近几年,中国工程物理研究院应用电子学研究所、国防科技大学、德国 Fraunhofer 研究所、美国 IPG 公司等机构对基于白噪声相位调制等方式的窄线宽光纤激光进行了研究<sup>[29-33]</sup>,其中,2016 年,德国 Fraunhofer 研究所 Beier 等采用图 3(a)所示的空间结构设计实现了线宽为 0.17 nm (45 GHz)、输出功率为 3 kW 的激光输出<sup>[31]</sup>,这是目前在对该线宽水平下的最高输出功率。基于随机激光或超荧光激光种子源输出的激光具有无纵模结构、相干性低等特点,在抑制窄线宽激光的 SBS、FWM 等非线性效应方面具有一定的优势,但获得高功率高信噪比窄线宽的随机激光或超荧光激光种子源存在较大技术难度,且高功率放大过程中线宽也存在一定的展宽。近几年,中国工程物理研究院应用电子学研究所、国防科技大学等机构对基于随机激光或超荧光激光种子源的窄线宽光纤激光进行了研究<sup>[34-37]</sup>,但目前其输出线宽与高光束质量光谱合成应用要求尚有较大的差距。

为了获得高功率的窄线宽激光输出,光纤激光器中不可避免采用支持多个模式的大芯径光纤以提高 SBS 等非线性效应阈值,但高功率条件下光纤中量子亏损和基模与高阶模相互作用产生的模式不稳定性成为单模窄线宽光纤激光器进一步提升功率的另一主要障碍<sup>[38]</sup>,参考文献<sup>[28,37]</sup>的窄线宽光纤激光由于模式不稳定的出现而导致高功率输出时光束质量变差。近几年,国内外多家机构对高功率激光的模式不稳定性问题进行了深入研究,从优化泵浦波长或泵

浦耦合结构、增加泵浦激光谱宽、提高冷却介质热传导系数、采用低 NA 特种光纤等方面提出了多种抑制模式不稳定性方法<sup>[39-41,32]</sup>。2017 年,中国工程物理研究院激光聚变研究中心的 Li 等采用反向泵浦方案将模式不稳定性阈值提升超过 50%,实现了 2 kW 近衍射极限窄线宽(0.12 nm)输出,光束质量  $M^2 < 1.4$ <sup>[40]</sup>。2016 年,德国 Fraunhofer 研究所 Beier 等采用图 3(b)所示的特殊设计的低 NA( $\sim 0.04$ )特种光纤大幅提升了激光器的模式不稳定性阈值,实现了 3 kW 近衍射极限窄线宽激光输出<sup>[32]</sup>。近几年国内外主要研究机构的高功率窄线宽光纤激光研究进展情况汇总见表 1。

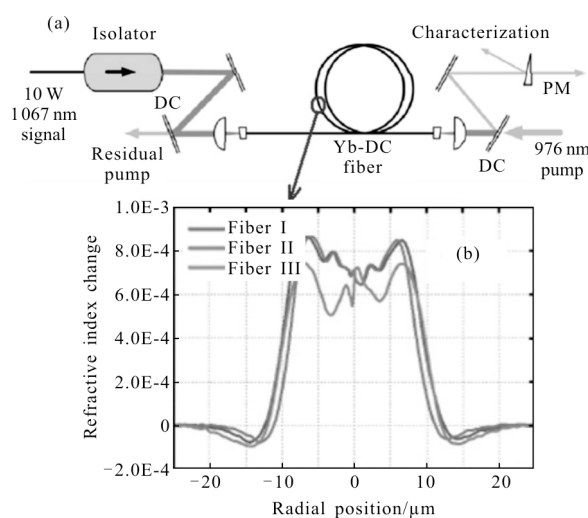


图 3 Fraunhofer 研究所 3 kW 窄线宽近衍射极限激光放大器实验装置

Fig.3 Experimental setup of 3 kW near-diffraction-limited narrow linewidth fiber amplifier in Fraunhofer Institute

表 1 高功率可合成窄线宽光纤激光器研究进展

Tab.1 Progress of high-power beam combinable narrow linewidth fiber laser

Research department	Wavelength /nm	Output power/kW	Beam quality $M^2$	Laser linewidth	Seed type	System configuration	Year	Reference	Remarks
LFRC of CAEP	1 064	2.0	2.0	$\sim 0.2$ nm	FBG oscillator	All fiber	2016	28	Non-PM
	1 064	2.9	-	0.31 nm	FBG oscillator	All fiber			
LFRC of CAEP	1 064	2.0	$< 1.4$	0.12 nm	FBG oscillator	All fiber	2017	40	Non-PM
IAE of CAEP	1 064	1.06	1.2	13 GHz	Phase modulation	All fiber	2016	29	Non-PM
IAE of CAEP	1 064	2.4	1.3	37 GHz	Phase modulation	All fiber	2017	-	Non-PM
NUDT	1 064.4	1.89	1.3@1.5 kW	45 GHz	Phase modulation	All fiber	2016	30	PM
NUDT	1 064	2.43	-	0.255 nm	Phase modulation	All fiber	2017	31	PM
Fraunhofer Institute	1 070	3.0	3.0	0.17 nm	Phase modulation	Bulk	2016	32	Non-PM
	1 064	1.5	$< 1.1$	15 GHz	Phase modulation	All fiber			
IPG	1 064	2.1	$< 1.1$	20 GHz	Phase modulation	All fiber	2017	33	Non-PM
	1 064	2.1	$< 1.1$	20 GHz	Phase modulation	All fiber			
SIOM	1 064.1	2.5	$\sim 1.2@2$ kW	0.18 nm	-	All fiber	2016	34	Non-PM
NUDT	1 080	1.87	1.71@1.4 kW	1.7 nm	Superfluorescent	All fiber	2015	35	Non-PM
NUDT	1 070	1.03	$\sim 2.0$	$\sim 1$ nm	Random laser	All fiber	2015	36	Non-PM
IAE of CAEP	1 067.5	1.1	-	$\sim 0.34$ nm	Random laser	All fiber	2017	37	Non-PM

### 2.2 高功率短波长窄线宽子束高效率放大技术

目前,掺镱高功率窄线宽光纤激光器的典型工作波长范围为 1 060~1 080 nm。针对光谱合成应用来说,在提升可合成窄线宽子束输出功率的基础上,可进一步通过向短波长方向扩展窄线宽子束激光的光谱范围、增加合成通道数量来进一步提升光谱合成输出的总功率水平。但是,由于掺镱光纤的吸收截面和发射截面参数与波长直接相关,在 1 030~1 040 nm 波段范围的吸收截面远大于 1 060 nm 波段(例如:1 030 nm 处的吸收截面比 1 064 nm 处高 8 倍),因此,短波长信号激光将作为长波长 ASE 的泵浦源而出现激光的“再吸收”和“ASE 放大”问题,通常情况下需要尽量缩短有源光纤的长度来处理,但这将导致转换效率的下降<sup>[42]</sup>。因此,如何使短波长窄线宽光纤激光输出更高的功率水平并保持高的转换效率成为研究人员关注的焦点。近几年,美国 IPG 公司、中

国工程物理研究院应用电子学研究所、美国空军实验室等单位对高功率窄线宽短波长激光进行了深入的研究<sup>[33,43-45]</sup>,其中,2015 年,美国 IPG 公司 Platonov 等基于采用图 4 所示的单频种子源相位调制的 MOPA 结构设计实现了线宽为 20 GHz、输出功率为 2.2 kW 的 1 030 nm 短波长激光输出<sup>[33]</sup>,这是目前 1 030 nm 窄线宽激光的最高输出功率水平。近几年国内外主要研究机构的高功率短波长窄线宽光纤激光研究进展情况汇总见表 2。

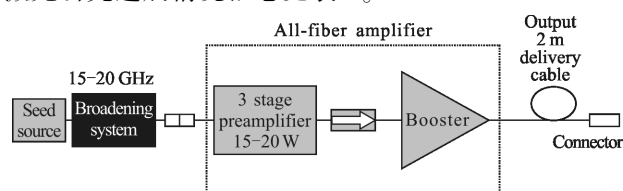


图 4 IPG 公司 2.2 kW 1 030 nm 窄线宽激光放大器实验装置  
Fig.4 Experimental setup of 2.2 kW 1030 nm near-diffraction-limited narrow linewidth fiber amplifier in IPG

表 2 高功率短波长窄线宽光纤激光器研究进展

Tab.2 Progress of high-power short wavelength narrow linewidth fiber laser

Research department	Wavelength /nm	Output power/kW	Beam quality M <sup>2</sup>	Laser linewidth	Seed type	System configuration	Year	Reference	Remarks	Efficiency
IPG	1 045	1.01	<1.1	10.3 GHz	-	All fiber	2015	17	PM	40%(wall-plug)
IPG	1 032	1.8	<1.1	15 GHz	Phase modulation	All fiber	2016	43	Non-PM	40%(wall-plug)
IPG	1 030	2.2	<1.1	20 GHz	Phase modulation	All fiber	2017	33	Non-PM	40%(wall-plug)
IAE of CAEP	1 030	1.01	-	~0.07 nm	FBG oscillator	All fiber	2016	44	Non-PM	81%(optical-optical)
Air force research laboratory	1 034	1	<1.2	0.011 nm	Phase modulation	All fiber	2017	45	Non-PM	80%(slope)

### 2.3 大色散宽波段高衍射效率 MLD 光栅技术

衍射光栅是图 1 所示的光谱合成系统的核心合成器件,需要同时具备宽带高衍射效率、低热致光学畸变、高抗激光损伤阈值和较高色散的性能。按偏振相关性可将衍射光栅分为偏振相关光栅(通常情况下对 TE 偏振具有较高衍射效率)和偏振无关光栅(对 TE 和 TM 偏振同时具有较高衍射效率)两种。通常情况下,高效率衍射光栅一般采用金属膜或混合金属膜技术实现<sup>[46-47]</sup>,但金属膜光栅较低的抗激光损伤阈值使其在高功率多纤光谱合成的应用受到一定限制。为了提高衍射光栅的耐强光能力,可以采用

一种基于 MLD 的衍射光栅设计方案<sup>[48]</sup>,它是由基底介质、高反射率介质膜系及周期性浮雕结构组成,同时具备高衍射效率、高损伤阈值的特点。在超短脉冲啁啾脉冲放大应用需求的牵引下,大口径偏振相关高衍射效率脉冲压缩 MLD 光栅技术不断取得新的突破<sup>[49-50]</sup>,目前国际上美国 LLNL 实验室和 PGL 公司已可研制生产口径达米级、平均衍射效率达 98% 的大口径耐强光脉冲压缩光栅。

对于图 1 所示的基于双 MLD 光栅的光谱合成系统,为了降低可合成窄线宽子束提升功率的难度,其合成子束的输出光通常为为非线偏振光。兼顾合成

效率和合成系统空间的考虑,基于双 MLD 光栅的光谱合成系统应选用大色散偏振无关 MLD 光栅,并在较宽子束工作波长范围内对其 TE 和 TM 偏振都具有极高的衍射效率。2011 年和 2016 年,德国 Fraunhofer 研究所和中国科学院上海光学精密机械研究所分别在 8.2 kW 和 10.8 kW 光谱合成系统中使用了偏振无关 MLD 光栅<sup>[15,51]</sup>,但由于均采用了低色散(960 线/mm)偏振无关 MLD 光栅,空间光路长度达数米级,导致其系统占用空间偏大。近几年,美国圣地亚国家实验室、韩国大田专科大学、清华大学等单位对大色散偏振无关 MLD 光栅的设计与制备技术进行了较深入的研究<sup>[51-53]</sup>,但由于其设计和制备难度与偏振相关 MLD 光栅相比大大增加,现有研究水平同实际应用需求尚存在一定的差距。2012 年,圣地亚国家实验室的 Kemme 等设计了 1 429 线/mm 的偏振无关 MLD 光栅(光栅结构示意图见图 5(a)),在 1 045~1 068 nm 范围内可达到 96% 的平均衍射效率<sup>[51]</sup>,

其线密度和平均衍射效率有待进一步提高;2015 年,韩国大田专科大学的 Cho 等设计并制备了 1740 线/mm 的偏振无关 MLD 光栅(光栅结构示意图见图 5(b)),在 1 052 nm 处的平均衍射效率 92%,但其高衍射效率的工作带宽范围未见报道<sup>[53]</sup>,其平均衍射效率有待进一步提高;2015 年,清华大学的申碧瑶等研制了 1 200 线/mm 的偏振无关 MLD 光栅(光栅断面的扫描电镜图及结构参数见图 5(c)),在 1 044~1 084 nm 范围内平均衍射效率大于 92%<sup>[54]</sup>,其线密度和平均衍射效率有待进一步提高。总体来看,进一步提高大色散偏振无关 MLD 光栅的平均衍射效率和工作带宽范围是未来研究的关注焦点。

### 2.4 高集成度密集组束技术

光谱合成子束的空间排布受到光栅角色散能力和实际系统的空间布局限制的制约,高集成度密集组束技术可以在有限的空间尺寸范围和有限的光谱范围内通过合成子束的高占空比排布实现更多的合成通道,是高功率多纤光谱合成系统的另一项关键技术。可用于多纤光谱合成系统的密集组束方法主要有基于空间分立反射镜的组束方法、基于离轴非球面镜的组束方法、基于准直器直接拼接的组束方法等。2009 年和 2011 年,美国 Lockheed Martin 公司的 Madasamy 等和德国 Fraunhofer 研究所的 Wirth 等分别采用图 6(a)、(b)所示的基于空间分立反射镜的组束方法实现了 2 路和 4 路子束激光的光谱组束输出<sup>[19,15]</sup>,采用该方法原理上可以实现多路合成子束激光在空间上的高占空比拼接,但从子束激光输出端到合成光栅间需要使用多个分立的准直器和反射镜元件,其光路调节难度较大,且组束单元整体所占空间较大,不利于向工程应用转化。2017 年,美国陆军实验室(U.S. Army Research Laboratory)的 Beresnev 等采用图 6(c)所示的基于准直器直接组束的方法实现较紧凑、较高效的光纤激光阵列组束<sup>[55]</sup>,但该方法中每个子束采用分立的准直器设计,受每个准直器机械结构的限制其占空比受到一定限制,且准直器中多个分立的光学面的反射损耗也降低了光束的传输效率。2013 年和 2015 年,美国 Lockheed Martin 公司采用图 6(d)所示的基于离轴非球面转换镜的设计分别实现了 12 路和 96 路窄线宽子束的密集组束<sup>[16-17]</sup>,为了减小光谱合成系统的体积,该设计方案要求非球面转换镜具有较短的焦距,而高光束质量

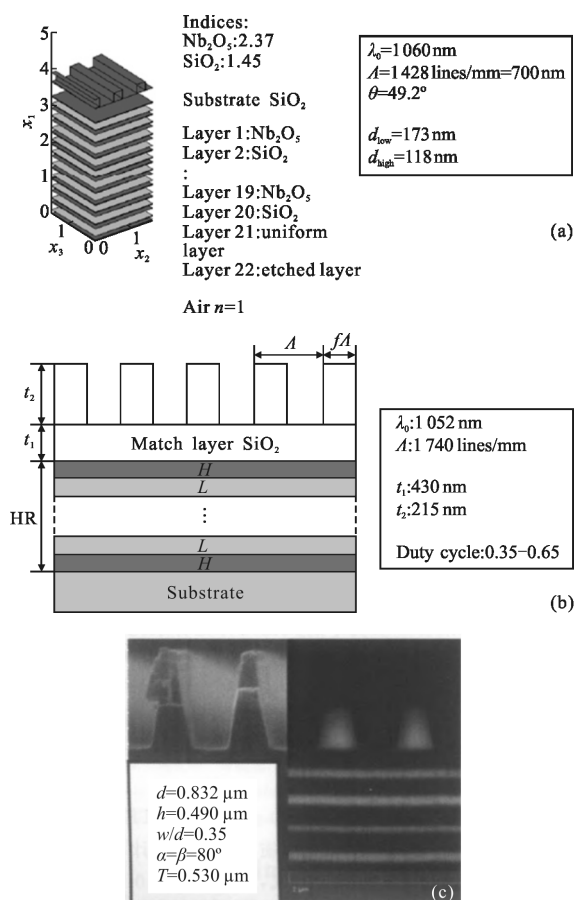


图 5 几种偏振无关 MLD 光栅结构图

Fig.5 Some schematic diagram of polarization-dependent MLD gratings

光谱合成则要求非球面转换镜同时对包括位于边缘位置在内的所有子束都能保持较好的像质，这对非球面转换镜的设计和加工提出了极高的要求。

### 3 中国工程物理研究院应用电子学研究所基于双 MLD 光栅光谱合成关键技术最新研究进展

中国工程物理研究院应用电子学研究所双 MLD 光栅光谱合成激光光源需要兼顾的“高功率”、“高光束质量”、“高效率”和“高集成度”几大核心品质要求，通过近几年的持续研究和攻关，目前在高功率可合成窄线宽单纤子束激光技术、高功率短波长激光放大技术、密集组束技术和双光栅高效优质光谱合成技术等方面取得了多项重要的阶段性研究成果。

在高功率可合成窄线宽单纤子束激光技术研究方面，笔者所在单位于 2014 年基于单频种子源+宽带噪声相位调制的光纤激光 MOPA 设计实现了 1.06 kW 13 GHz 线宽全光纤激光输出，光束质量  $M^2 < 1.2$ <sup>[29]</sup>，通过对该系统参数的进一步优化，2015 年使用 25/400  $\mu\text{m}$  商用掺镱光纤将输出功率进一步提升到了 2.0 kW，不过由于出现了模式不稳定性现象，导致光束质量  $M^2$  退化至  $\sim 2.0$ ，同时，系统中较高的谱功率密度产生的 SBS 效应也限制其功率的进一步提升。2017 年，该单位通过宽带噪声相位调制系统参数的优化设计实现了进一步的线宽展宽，提升了窄线宽单纤激光系统的 SBS 阈值，通过放大器结构优化和模式控制，解决了高功率放大过程中的模式不稳定性问题，最终利用商用 20/400  $\mu\text{m}$  光纤 (NA0.06) 成功实现了 2.4 kW 全光纤窄线宽输出，3 dB 和均方根 (RMS) 线宽均为 0.14 nm ( $\sim 37$  GHz)，光束质量  $M^2 \sim 1.3$ ，光光效率约为 80%，该激光放大器回光功率随输出功率变化见图 7 (a)，当最大输出功率 2.4 kW 时，回光功率小于激光功率的 0.02%，此时尚未达到 SBS 阈值，通过提升泵浦功率水平，激光输出功率有望进一步提升；图 7(b) 为 2.4 kW 输出时激光的光谱和近场光斑，由图可知，激光器中未见 SRS 光谱，输出激光信噪比约为 54 dB，且无模式不稳定性现象出现。另外，本单位对具有较低非线性效应和线宽保持性质的窄线宽随机光纤激光的产生和放大技术进行了研究，2015 年，利用窄谱光纤光栅对随机光纤种子源进行滤波后实现了 1.1 kW 的窄谱随机光纤激光放大输出，3 dB 线宽为 0.61 nm<sup>[30]</sup>，2016 年，通过对随机激光种子源和光纤放大器进行了优化，实现了 2 kW 窄光谱随机光纤激光放大输出<sup>[56]</sup>，光光

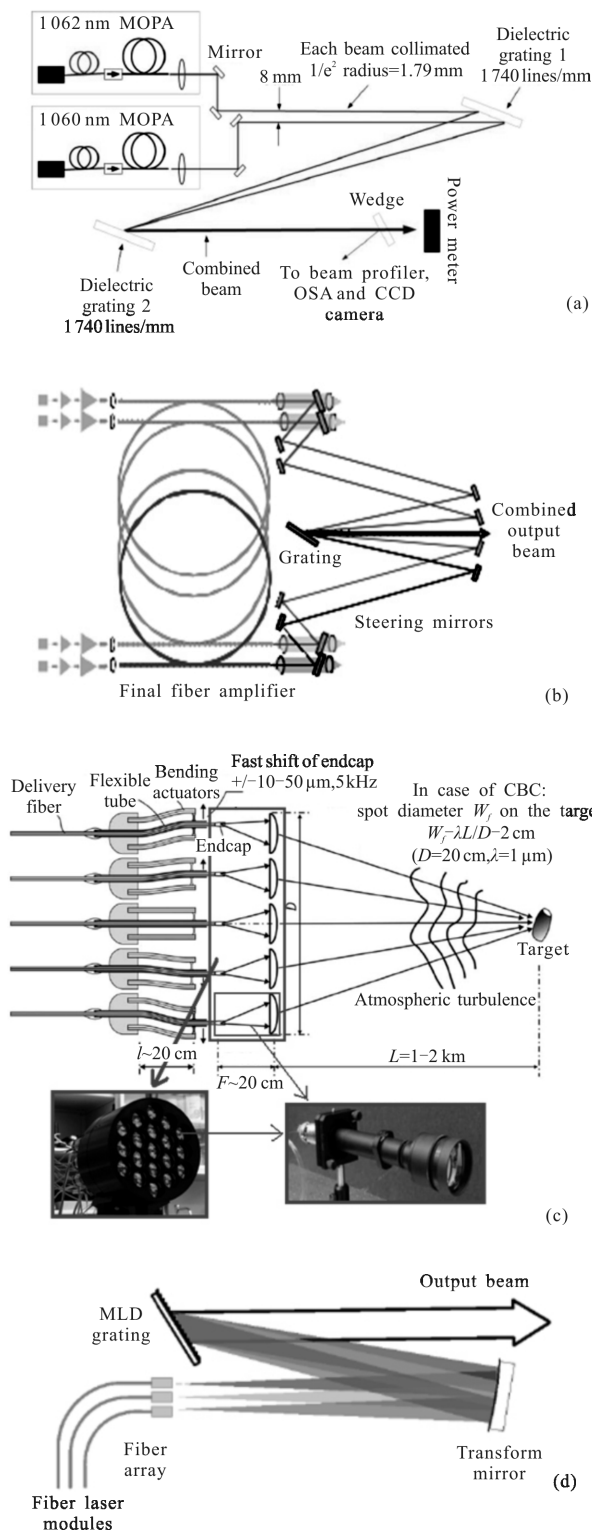


图 6 几种典型的光束组束方案

Fig.6 Some typical schemes for beam combining



效率为 76.1%, 主放大器输出功率与抽运功率关系曲线见图 8(a), 输出光谱的变化情况如图 8(b) 所示,

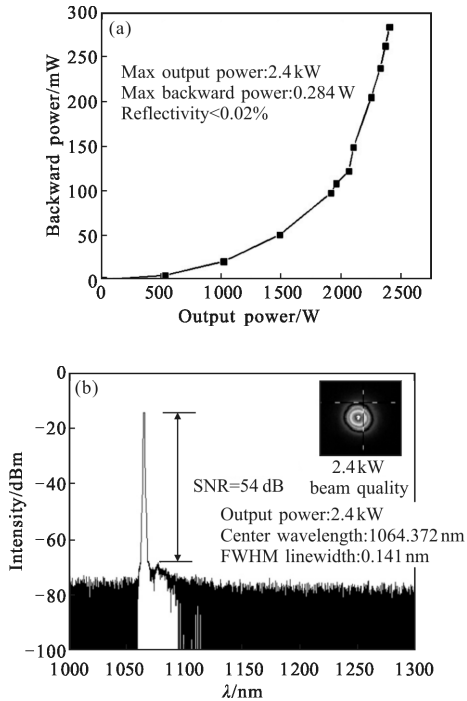


图 7 2.4 kW 37 GHz 窄线宽光纤激光器测试结果

Fig.7 Measurement results of 2.4 kW 37 GHz linewidth fiber laser

在 2 kW 最高输出功率时, 3 dB 线宽为 0.23 nm, 但功率放大过程中均方根线宽具有逐渐展宽的趋势, 这不利于光谱合成应用时对总体光束质量的控制。

在高功率短波长激光放大技术研究方面, 该单位建立了基于 ASE 的光纤激光放大器理论模型, 模拟分析了掺镱光纤激光放大器不同中心波长和增益光纤长度等因素对于 ASE 的影响, 优化了 1030 nm 窄线宽光纤激光放大器设计参数, 并于 2016 年采用基于窄带种子源+一级放大器的结构设计, 使用商用 25/400 μm 掺镱光纤实现了中心波长 1030 nm、最高功率 1.01 kW 的窄线宽激光输出, 3 dB 线宽为 0.072 nm, 光-光转换效率 81%<sup>[44]</sup>。图 9(a) 为 kW 级 1030 nm 窄线宽激光实验装置的光路布局示意图。图 9(b)、(c)

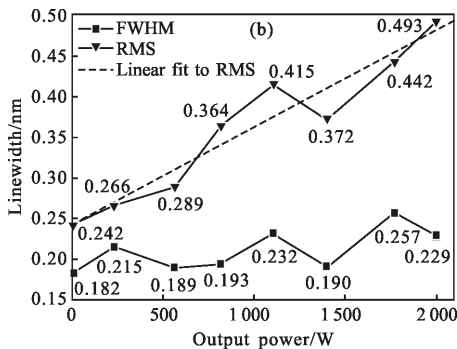
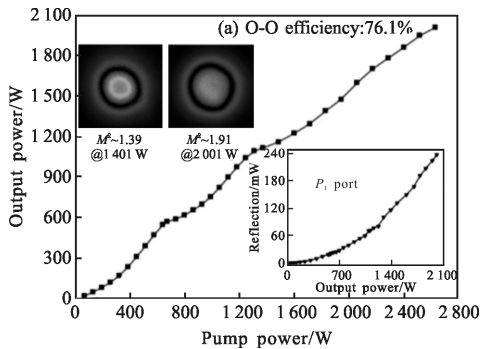
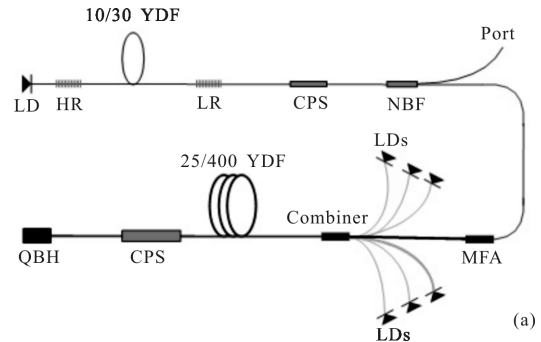


图 8 2 kW 窄光谱随机光纤激光放大器测试结果

Fig.8 Measurement results of 2 kW narrow linewidth random fiber laser amplifier

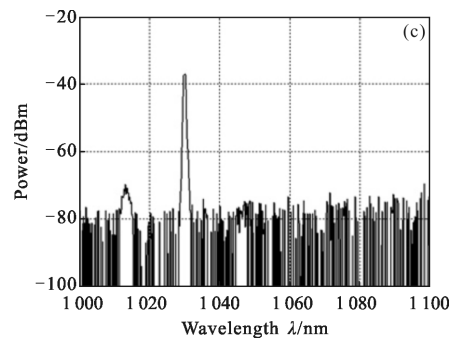
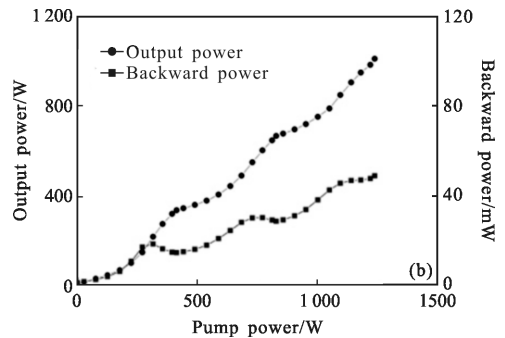


图 9 1 kW 1030 nm 窄线宽光纤激光放大器实验装置及测试结果

Fig.9 Experimental setup and measurement results of 1 kW 1030 nm narrow linewidth fiber laser amplifier

分别为激光放大器输出功率、回光功率随泵浦功率变化情况和输出光谱图。该激光放大器尚未出现显著的 ASE, 后续可通过提高泵浦功率、优化放大器的参数等方式进一步提升窄线宽 1030 nm 激光的输出功率。

在密集组束技术研究方面, 为了尽量减小密集组束单元占用的空间尺寸、提高组束单元的传输效率, 该单位提出了基于复合功能端帽器件直接拼接实现多子束高占空比的密集组束技术方案。该复合功能端帽器件将通常光纤激光器的输出端帽和准直功能集成于一体, 并通过一体化的光学设计减少了光束传输通过多个光学元件和光学界面带来的反射损耗, 大幅减少了多路子束组束单元占用的空间尺寸。图 10(a) 为一体化复合功能端帽的产品实物图, 图 10(b)、(c) 分别为该端帽在无水冷条件下对 2 kW 级单模光纤激光的性能测试图, 测试表明, 该复合端帽可在 2 kW 功率水平下实现长时间 (>2 h) 无水冷稳定工作, 且其端帽带来的光学像差小于  $1.3(\beta)$ 。2017 年, 该单位基于该复合功能器件技术研制了包含 20 路合成通道的密集组束单元, 并成功应用于某样机多纤合成光源研制中。

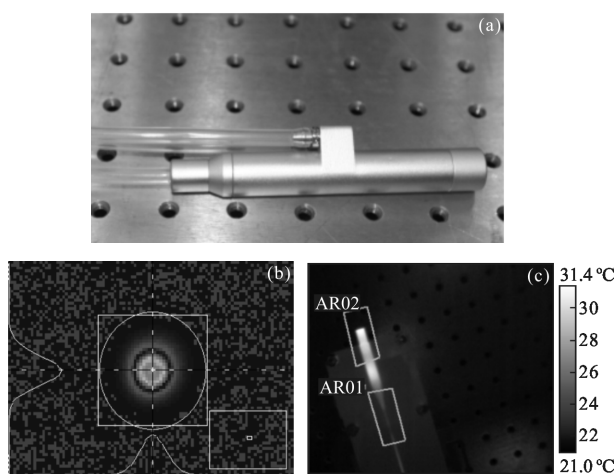
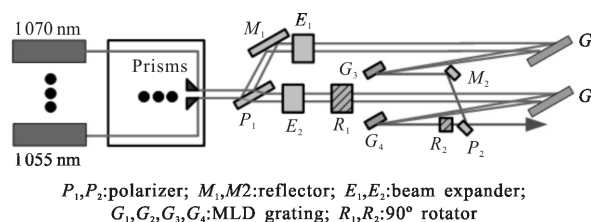


图 10 一体化复合功能端帽实物及其性能测试图  
Fig.10 Product photo and performance of integrative end cap with compound function

在双光栅高效优质光谱合成技术研究方面, 2015 年, 该单位采用基于双 MLD 光栅光色散补偿设计谱合成设计方案, 利用自主研制的 5 路 kW 级窄线宽光纤激光实现了 5 kW 高效优质共孔径光谱合成激光输出<sup>[21]</sup>, 最大输出功率达 5.07 kW, 光束质量  $M^2$  小于 3, 合成效率达到 91.2%。2016 年, 通过对子束线宽和光束质量以及子束排布、波长间隔的进

一步优化设计, 采用图 11 所示的基于多个棱镜拼接组束的共孔径光谱合成设计方案将共孔径光谱合成输出功率提升了近 1 倍, 最大输出功率达 9.6 kW, 同时仍然保持了良好的光束质量和合成效率水平, 光束质量因子  $M^2$  约为 3, 合成效率达到 92.0%<sup>[22]</sup>。10 路子束拼接后的近场光斑形态见图 12(a), 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 12(b)~(d) 所示。2017 年, 将基于多个棱镜拼接的密集组束单元替换为自主研发的基于一体化复合功能端帽的密集组束单元, 在保持系统总输出功率和光束质量水平的情况下大幅减小了密集组束单元的体积。



$P_1, P_2$ : polarizer;  $M_1, M_2$ : reflector;  $E_1, E_2$ : beam expander;  $G_1, G_2, G_3, G_4$ : MLD grating;  $R_1, R_2$ : 90° rotator

图 11 9.6 kW 双 MLD 光栅光谱合成实验装置示意图

Fig.11 Schematic of the 9.6 kW spectral beam combing experiment setup with dual-MLD-grating

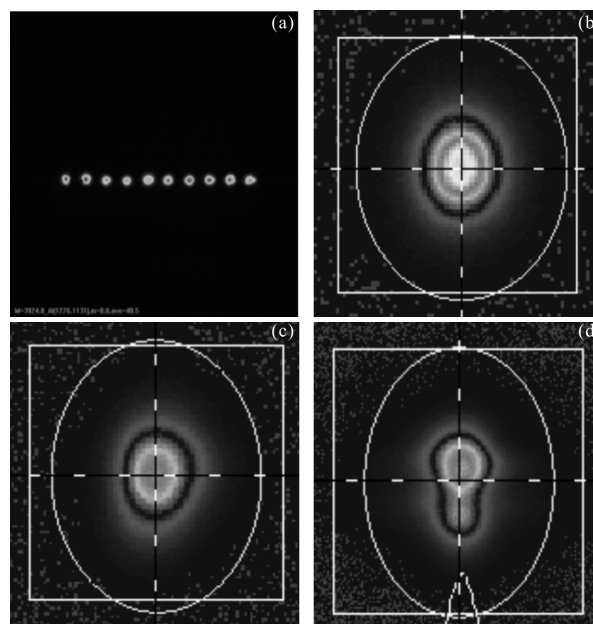


图 12 合成光束光斑分布图。(a) 10 路子束激光通过棱镜组束后的光斑近场分布; (b)~(d) 30.0 W、4.3 kW、9.6 kW 光谱合成后光斑远场分布

Fig.12 Beam profile of the combined laser beam. (a) Near field beam profile of the 10 individual fiber lasers through prisms; (b)~(d) far field beam profile of the spectral combined beam at 30.0 W, 4.3 kW, 9.6 kW

## 4 双 MLD 光栅光谱合成光源发展展望

通过进一步提升单路合成子束的功率水平、增加合成通道数量是基于双 MLD 光栅光谱合成系统进一步提升功率的主要技术途径。目前,可合成窄线宽子束功率水平已达到 3 kW<sup>[31]</sup>,偏振相关 MLD 光栅可在 25 nm 光谱范围内实现高衍射效率,由参考文献[22]中的理论模型分析可知在 25 nm 光谱范围内可支持 50 路以上的窄线宽子束合成,因此,从原理上看,采用类似图 11 的双 MLD 光栅光谱合成方案可在长波长范围(如:1 060~1 085 nm)内实现大于 120 kW 的共孔径光谱合成输出,但技术上需要进一步解决较大规模子束合成的系统集成和超高功率下光学元器件的耐强光和热管理问题。另外,由于可合成短波长窄线宽子束功率也已达 2 kW<sup>[31]</sup>,采用类似图 7 的双 MLD 光栅光谱合成方案有望在短波长范围(如:1 030~1 055 nm)光谱范围内实现大于 80 kW 的共孔径光谱合成输出。在此基础上再利用高陡度耐强光双色镜可实现长波长和短波长的光谱合成激光的共孔径合束输出,其共孔径合成输出功率有望达到 200 kW 水平,但在如此高功率负载水平下双色镜的耐强光能力和热致畸变问题面临较大的技术挑战。

已有理论研究表明,可合成窄线宽子束的输出功率有望进一步提升到 5 kW 水平<sup>[57]</sup>,随着特种光纤材料和窄线宽激光技术的进步,可以预期在不远的将来可合成窄线宽子束的输出功率可得到较程度的提高。但由于光纤激光 SBS、模式不稳定性等非线性效应的限制,可合成窄线宽子束的输出功率的提升仍然有限。采用美国诺格公司提出的共孔径相干合成技术<sup>[58]</sup>有望获得更高功率水平的满足光谱合成应用要求的窄线宽激光输出,其技术原理如图 13 所示,它利用二维衍射光学(DOE)研究实现多路窄线宽光纤激光的共孔径相干合成输出<sup>[59]</sup>。近几年,共孔径相干合成技术取得了较快的发展。2012 年美国诺格公司实现了 15 束光纤 600 W 近衍射极限输出,2013 年美国林肯实验室基于 5 路 500 W 窄线宽激光实现 1.9 kW 共孔径近衍射极限相干合成输出,合成效率 79%<sup>[60]</sup>。2016 年,美国空军实验室基于 5 路 1.2 kW 的窄线宽光纤激光器获得了 4.9 kW 的近衍射极限( $M^2 < 1.1$ )共孔径相干合成激光输出,合成效率 82%<sup>[61]</sup>。

由于共孔径相干合成原理上具有较好的功率扩展性,如果将光谱合成系统中窄线宽单纤子束替换为共孔径相干合成光源,则光谱合成系统的输出功率扩展性将大大提高。不过,理论研究表明子束的偏振、相位、强度、指向、波前等参数都不同程度对共孔径相干合成效率造成影响<sup>[62]</sup>,必须对系统的多种参数进行严格的控制,这将给系统工程应用的稳定性和可靠性带来挑战。同时,具有高衍射效率的超低吸收耐强光二维 DOE 元件的设计和制备均存在很大的难度<sup>[3]</sup>,这进一步增加了提升高功率共孔径相干合成系统效率的难度。

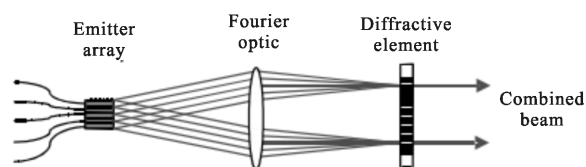


图 13 基于 DOE 的共孔径相干合成原理示意图

Fig.13 Schematic of the common aperture coherent beam combining based on DOE

## 5 结束语

多纤光谱合成利用色散光学元件实现多个具有不同中心波长的窄线宽单纤子束激光的共孔径合束输出,它能在提升输出功率同时保持良好光束质量水平,逐渐成为多纤功率合成技术的一个重要发展方向。基于双 MLD 光栅色散补偿构型的光纤激光光谱合成技术方案大幅降低了窄线宽合成子束光束质量退化程度和可合成子束的线宽要求,是未来高功率多纤高效优质光谱合成光源极具发展潜力的技术途径之一。

基于双 MLD 光栅的光纤激光光谱合成主要涉及高功率可合成窄线宽子束激光放大、高功率短波长窄线宽子束高效率放大、大色散宽波段高衍射效率 MLD 光栅和高集成度密集组束等几项关键技术,近几年这些关键技术相继取得了突破性的进展,高功率可合成窄线宽子束激光功率已经突破 3 kW,短波长窄线宽子束激光功率已突破 2 kW,基于偏振相关 MLD 光栅的多纤光谱合成输出功率也达到 10 kW 级。如何克服可合成窄线宽子束激光提升时面临的 SBS 和模式不稳定性等非线性效应限制、如何解决短波长激光放大过程的激光“再吸收”和

“ASE”是未来可合成窄线宽子束激光需要重点关注和研究的课题。采用大色散宽波段偏振无关 MLD 光栅可大幅减小双 MLD 光栅光谱合成单元的体积,但其对 MLD 光栅的槽形、槽深、光栅周期、膜层数量和厚度、占宽比等参数的设计和制备时的容差控制提出了苛刻的要求,现有技术水平尚不成熟,进一步提高大色散偏振无关 MLD 光栅的平均衍射效率和工作带宽范围是未来研究的关注焦点。另外,为了减小多路子束激光组束单元占用的空间和激光传输损耗,需要进一步发展高集成度密集组束技术,并不断提高其负载能力。

通过进一步提升单路合成子束的功率水平、增加合成通道数量,基于双 MLD 光栅光谱合成系统原理上可实现 100 kW 级高功率共孔径合成输出,结合高陡度耐强光双色镜技术或共孔径相干合成技术则有望将共孔径功率合成输出功率提升到 200 kW 以上,但技术上如何解决较大规模子束合成的系统集成和超高功率下光学元器件的耐强光和热管理等难题面临较大的挑战。

#### 参考文献:

- [1] Gapontsev V, Fomin V, Ferin A, et al. Diffraction limited ultra-high-power fiber lasers [C]//Advanced Solid-State Photonics, OSA Technical Digest Series, OSA, 2010: paper AWA1.
- [2] Michalis N Z, Christophe A C. High power fiber lasers: a review [J]. IEEE Journal of Select Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 0904123.
- [3] Bourdon P, Lombard L, Durecu A, et al. Coherent combining of fiber lasers [C]//SPIE, 2017, 10254: 1025402-1-10.
- [4] Shcherbakov E A, Fomin V V, Abramov A A, et al. Industrial grade 100 kW power CW fiber laser [C]//Advanced Solid-State Lasers Congress Technical Digest, OSA, 2013: ATh4A.
- [5] Madasamy P, Loftus T, Thomas P, et al. Comparison of spectral beam combining approaches for high power fiber laser systems[C]//SPIE, 2008, 6952: 695207-1-10.
- [6] Schmidt O, Wirth C, Nodop D, et al. Spectral beam combination of fiber amplified ns-pulses by means of interference filter[J]. Optics Express, 2009, 17(25): 22974-22982.
- [7] 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: 687314-1-8.
- [8] Andrusyak O, Smirnov V, Venus G, et al. Spectral combining and coherent coupling of lasers by volume Bragg gratings [J]. IEEE Journal of Select Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 344-353.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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. (in Chinese)  
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.
- [12] 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. (in Chinese)  
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.
- [13] 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. (in Chinese)  
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.
- [14] 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 Select Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 487-497.
- [15] Wirth C, Schmidt O, Tsybin L 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.
- [16] 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: 8601115-1-5.
- [17] 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.

- [18] Liu A, Mead R, Vatter T, et al. Spectral beam combining of high power fiber lasers[C]//SPIE, 2004, 5335: 81-88.
- [19] Madasamy P, Jander D, Brooks C, et al. Dual-grating spectral beam combination of high-power fiber lasers [J]. IEEE Journal of Select Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 337-343.
- [20] Tian Fei, Yan Hong, Chen Li, et al. Investigation on the influence of spectral linewidth broadening on beam quality in spectral beam combination[C]//SPIE, 2014, 9255: 92553N.
- [21] Ma Yi, Yan Hong, Tian Fei, et al. Common apertures 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. (in Chinese)  
马毅, 颜宏, 田飞, 等. 光纤激光共孔径光谱合成实现 5kW 高效优质输出 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 040101.
- [22] 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 J Lasers, 2016, 43(9): 0901009. (in Chinese)  
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.
- [23] 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.
- [24] Huang L, Wu H, Li R, et al. 414 W near-diffraction-limited all-fiberized single frequency polarization-maintained fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2017, 42(1): 1-4.
- [25] Khitrov V, Farley K, Leveille R, et al. kW level narrow linewidth Yb fiber amplifiers for beam combining[C]//SPIE, 2010, 7686: 76860A.
- [26] 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: 791407-1-7.
- [27] 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.
- [28] Huang Z, Liang X, Li C, 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.
- [29] Sun Yihong, Feng Yujun, Li Tenglong, et al. 1.06 kW 13 GHz linewidth all fiber laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(7): 071013. (in Chinese)  
孙殷宏, 冯昱骏, 李腾龙, 等. 1.06 kW 13 GHz 线宽全光纤激光器[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(7): 071013.
- [30] Ma P, Tao R, Su R, 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.
- [31] Su R, Tao R, Wang X, et al. 2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression [J]. Laser Phys Lett, 2017, 14 (8): 085102.
- [32] Beier F, Hupel C, Nold J, et al. Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbiumdoped low NA fiber amplifier [J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6011-6020.
- [33] Platonov N, Yagodkin R, Cruz J, et al. 1.5 kW linear polarized on PM fiber and 2kW on non-PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier [C]//SPIE, 2017, 10085: 100850M.
- [34] 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.
- [35] Xu J, Liu W, Leng J, et al. Power scaling of narrowband high-power all-fiber superfluorescent fiber source to 1.87 kW [J]. Optics Letters, 2015, 40(13): 2973-2976.
- [36] Du X, Zhang H, Ma P, et al. Kilowatt-level fiber amplifier with spectral-broadening-free property, seeded by a random fiber laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(22): 5311-5314.
- [37] Li Tenglong, Li Yang, Peng Wanjing, et al. 1.1 kW narrowband spectra random fiber laser amplifier [J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(2): 0202015. (in Chinese)  
李腾龙, 李阳, 彭万敬, 等. 1.1 kW 窄光谱随机光纤激光放大[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0202015.
- [38] Smith A, Smith J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10180-10912.
- [39] Tao Rumao, Ma Pengfei, Wang Xiaolin, et al. A novel theoretical model for mode instability in high power fiber lasers[C]//Advanced Solid State Laser, 2014: AM5A.20.
- [40] Li Zebiao, Huang Zhihua, Xiang Xiaoyu. Experimental demonstration of transverse mode instability enhancement by a counter-pumped scheme in a 2 kW all-fiberized laser [J]. Photonics Research, 2017, 5(2): 77-81.
- [41] Wang Yanshan, Liu Qinyong, Ma Yi, et al. Research of the mode instability threshold in high power double cladding Yb-

- doped fiber amplifiers[J]. *Ann Phys*, 2017, 529(8): 1600398.
- [42] Huang Y, Edgecumbe J, Ding Jianwu, et al. Performance of kW class fiber amplifiers spanning a broad range of wavelengths: 1028-1100nm[C]//SPIE, 2014, 8961: 89612K.
- [43] Yagodkin R, Platonov N, Yusim A, et al. >1.5 kW narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier with 40 nm bandwidth[C]//SPIE, 2015, 9728: 972807-1-6.
- [44] Sun Yinhong, Ke Weiwei, Feng Yujun, et al. 1 030 nm kilowatt-level ytterbium-doped narrow linewidth fiber amplifier [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(6): 0601003. (in Chinese) 孙殷宏, 柯伟伟, 冯昱骏, 等. 1 030 nm 千瓦级掺镱光纤窄线宽激光放大器[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0601003.
- [45] Naderi A, Dajani I, Flores A. High-efficiency, kilowatt 1 034 nm all-fiber amplifier operating at 11 pm linewidth[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 1018-1021.
- [46] Chen Hui, Guan Heyuan, Zeng Lijiang, et al. Fabrication of broadband, high-efficiency, metal-multilayer-dielectric gratings [J]. *Optics Communications*, 2014, 329(2014): 103-108.
- [47] Hu Anduo, Zhou Changhe, Cao Hongchao, et al. Polarization-independent wideband mixed metal dielectric reflective gratings[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4902-4906.
- [48] Naderi A, Dajani I, Flores A. High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(8): 940-942.
- [49] Clausnitzer T, Limpert J, Zollner K, et al. Highly efficient transmission gratings in fused silica for chirped-pulse amplification systems [J]. *Applied Optics*, 2003, 42 (34): 6934-6938.
- [50] Rumpel M, Moeller M, Moormann C, et al. Broadband pulse compression gratings with measured 99.7% diffraction efficiency[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 323-326.
- [51] Kemme S A, Scrymgeour D A, Peter D W. High-efficiency diffractive optical elements for spectral beam combining[C]//SPIE, 2012, 8381: 83810Q.
- [52] Zheng Ye, Yang Yifeng, Wang Jianhua, 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.
- [53] Cho H, Kim H, Lee Y. Design and fabrication of multilayer dielectric gratings for spectral beam combining [C]//SPIE, 2015, 9556: 955615-1-6.
- [54] Shen Biyao, Zeng Lijiang, Li Lifeng, et al. Fabrication of polarization independent gratings made on multilayer dielectric thin film substrates [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(11): 111013. (in Chinese) 申碧瑶, 曾理江, 李立峰, 等. 多层介质膜偏振无关光栅的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(11): 111013.
- [55] Beresnev L, Motes R, Townes K, et al. Design of a noncooled fiber collimator for compact, high-efficiency fiber laser arrays[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): B169-B178.
- [56] 李腾龙, 查从文, 彭万敬, 等. 2 kW 窄光谱随机光纤激光放大输出[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0415003.
- [57] Sun Yinhong. Theory and experiment study on fiber laser with high power and narrow linewidth[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2016: 51-53. (in Chinese) 孙殷宏. 高功率窄线宽光纤激光器理论和实验研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2016: 51-53.
- [58] Cheung E, Ho J, Goodno G, et al. Diffractive- optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(4): 354-356.
- [59] Thielen P, Ho J, Burchman D, et al. Two-dimensional diffractive coherent combining of 15 fiber amplifiers into a 600 W beam[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(18): 3741-3743.
- [60] Redmond S M, Fan T Y, Ripin D J, et al. Diffractive coherent combining of a 2.5 kW fiber laser array into a 1.9 kW Gaussian beam[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(14): 2832-2834.
- [61] Flores A, Ehrenreich T, Holten R, et al. Multi-kW coherent combining of fiber lasers seeded with pseudo random phase modulated light[C]//SPIE, 2015, 9728: 97281Y.
- [62] Goodno G, Shih C, Rothenberg, et al. Perturbative analysis of coherent combining efficiency with mismatched lasers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 25403-25414.