

·封面文章·

# 光谱合成激光光束特性的研究进展

柏刚<sup>1,2</sup>, 杨依枫<sup>1</sup>, 晋云霞<sup>1</sup>, 何兵<sup>1,3\*</sup>, 周军<sup>1,4\*\*</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038;

<sup>4</sup>南京中科神光科技有限公司, 江苏 南京 210038

**摘要** 简要回顾了高功率光纤激光光谱合成的研究进展和现状, 介绍了影响合成激光光束质量的外界因素, 主要包括合成系统中的元器件及子光源阵列的线宽展宽。现有的理论、实验结果以及中国科学院上海光学精密机械研究所在光谱合成光束质量改进方面的最新研究进展, 有助于优化设计光纤激光器光谱合成系统的内置参数, 推动高亮度光谱合成技术的进一步发展。

**关键词** 激光光学; 光纤激光器; 光谱合成; 光束质量; 密集组束

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.040004

## Research Progress on Laser Beam Characteristics in Spectral Beam Combining System

Bai Gang<sup>1,2</sup>, Yang Yifeng<sup>1</sup>, Jin Yunxia<sup>1</sup>, He Bing<sup>1,3\*</sup>, Zhou Jun<sup>1,4\*\*</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing, Jiangsu 210038, China;

<sup>4</sup>Nanjing Zhongke Shengguang Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210038, China

**Abstract** The research progress and development status of spectral beam combining (SBC) using high-power fiber lasers is reviewed briefly, and a detailed introduction to the external factors that affect the beam quality is made. The influences of components in the SBC system and the linewidth broadening of the sub-light source array are mainly considered in the evaluation of beam quality. The summary of the existing theories and experimental results as well as the groundbreaking works for improving the beam quality of SBC in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, is helpful to optimize the design of the built-in parameters of SBC and thus the further development of high-brightness SBC techniques is promoted.

**Key words** laser optics; fiber laser; spectral beam combining; beam quality; dense combining

**OCIS codes** 140.3510; 140.3290; 140.3295; 140.3298

## 1 引言

高功率光纤激光器具有效率高、体积小、光束质量好、运行稳定可靠和环境适应性强等突出性优点,

在科学研究、工业加工等民用领域和定向能、光电对抗等国防领域具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。得益于双包层大模场掺杂光纤制造工艺和高亮度抽运源制造技术的日趋成熟, 在过去二十多年中, 光纤激光器发

收稿日期: 2018-08-02; 修回日期: 2018-08-03; 录用日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(61405202, 61705243)、上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200)、上海市优秀技术带头人计划(17XD1424800)、上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1421200)

\* E-mail: bryanho@mail.siom.ac.cn; \*\* E-mail: junzhouhd@siom.ac.cn

展迅速,输出功率也随之被不断地提升。从 1996 至 2012 年,光束质量  $M^2$  因子小于 2 的单根光纤激光功率的年增长率约为 2 dB<sup>[4]</sup>。然而,受到热效应、非线性效应、模式不稳定以及光纤端面损伤等因素的限制,单根光纤激光器的输出功率存在理论极限<sup>[5-7]</sup>。为进一步获得更高亮度的光纤激光器,国内外研究者开始探索并运用光束合成技术。

多光束合成技术是实现高功率和高光束质量激光输出的重要技术途径。通过特定的合束方法不仅可以提升输出激光功率,还可以保证输出激光具有优良的光束质量<sup>[8]</sup>。光谱合成(SBC)技术主要是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共孔径出射的方式实现光束合成。光谱合成技术具有输出光束质量好、对子光束相位没有要求、结构简单稳定等优点,展现出无可替代的重要应用价值<sup>[9-12]</sup>。早在 2000 年,林肯实验室 Daneu 等<sup>[13]</sup>就通过 11 路二极管阵列的光谱合成方法,获得了 20 倍衍射极限的激光输出。同步发展的光纤激光器的光谱合成,无需复杂的光束整形系统,输出近衍射极限的高斯光场,更适应于大规模激光阵列的合成和扩展,近年来已成为激光技术领域的研究热点<sup>[9-12,14-15]</sup>。

除功率外,合成激光的光束质量也是研究人员采用光谱合成技术的核心考量因素之一。保证高光束质量的激光输出已成为当前光谱合成技术最迫切的目标。理论上光谱合成可以在保持输入激光光束质量的情况下,通过成比例地增加路数来提高激光输出功率,实现合成光束亮度的定标放大。但在实际的合成系统中,合成光的光束质量要比单根光纤输入激光的光束质量差,这主要受激光阵列的扰动<sup>[16-17]</sup>、转换透镜的像差<sup>[18-19]</sup>、衍射光栅热畸变<sup>[20-23]</sup>和阵列光源线宽<sup>[24-26]</sup>等因素的影响。本文介绍了光谱合成的分类及主流合成方案的最新研究进展,讨论了上述因素对光谱合成光束质量的影响,细化大阵列光谱合成系统中光束质量的研究,可为高亮度光谱合成系统结构的优化设计提供重要参考。

## 2 基于光栅光谱合成的最新研究进展

光谱合成技术中可能用到的色散元件包括棱镜<sup>[27-28]</sup>、双色片(DM)<sup>[29]</sup>、体布拉格光栅(VBG)<sup>[30-32]</sup>、多层电介质(MLD)衍射光栅<sup>[33-40]</sup>。基于棱镜的光束合成由于色散能力较弱,难以分辨波

长间隔为纳米级的窄线宽激光,因此其组成阵列规模的扩展性较差。基于 DM 的光谱合成受透射谱带宽和陡峭度的制约,在阵列规模的扩展方面同样受到了限制。基于 VBG 的光谱合成方法是一种结构简洁、能够实现高光束质量激光输出的合成方法。VBG 在一定的光谱范围内具有高衍射效率与低吸收率的特性,并且其衍射效率与热吸收率可同时得到优化。但是,在高功率运转时 VBG 的热效应问题会导致合成激光的光束质量退化和衍射效率降低,这使得基于 VBG 的光谱合成方案在输出激光向更高功率发展时面临挑战<sup>[14-15]</sup>。因此,热稳定性好、衍射效率高的反射式 MLD 衍射光栅获得了研究人员的重视,在高功率高光束质量光纤激光光谱合成应用中得到快速发展。

近十年来,应用 MLD 衍射光栅光纤激光光谱合成实现了合成路数从几路到近百路、合成功率从几百瓦增长到 60 kW 量级的发展,并且具备使输出激光的功率和合成路数继续提升的潜力。高光束质量光纤激光光谱合成输出功率的增长曲线如图 1 所示,该图表明,合成光束输出功率的年增长率约为 3 dB<sup>[33]</sup>。

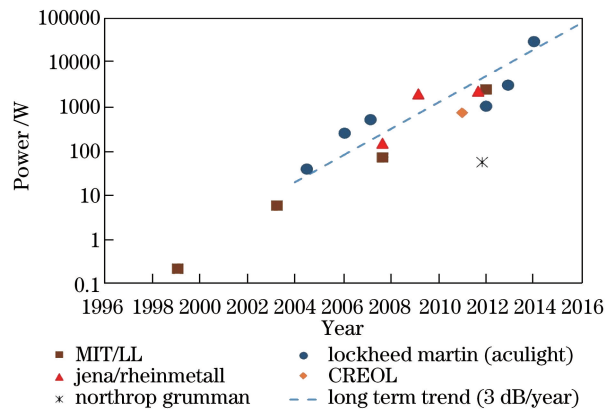


图 1 高亮度光纤激光光谱合成输出功率的年增长曲线( $M^2$  因子优于 2)<sup>[33]</sup>

Fig. 1 Output power versus year for high-brightness fiber SBC (defined as  $M^2 \leq 2$ )<sup>[33]</sup>

2009 年,德国耶拿大学利用介质膜光栅对 4 路 500 W 功率量级的光子晶体光纤放大器进行了光谱合成的实验探索,该方法最终实现了 2 kW 的激光输出,两个方向的  $M^2$  因子分别为 2.0 和 1.8<sup>[34]</sup>。2011 年,该研究团队将子光束的输出功率提高到 2.1 kW,从而实现了 8.2 kW 的光谱合成。当合成激光的输出功率增长到 7.3 kW 时,光束质量  $M^2$  因子会劣化到 4.3,这是当时报道的光纤激光器光谱合成输出激光的最高功率水平<sup>[35]</sup>。

MLD 衍射光栅高功率光纤激光光谱合成的另

一个突出代表是美国的洛克希德·马丁公司。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, $M^2$ 小于1.4<sup>[36]</sup>。在此基础上,2014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依然保持在300 W量级,线宽控制在3 GHz左右,制造出了总输出功率为30 kW的光谱合成样机<sup>[33]</sup>。该样机的原理图如图2所示,每一路光纤激光器均采用主振荡功率放大(MOPA)的结构,但是在输出端位置不进行单独准直,而是通过一个整体的反射式准直透镜,对所有不同波长的入射激光光束进行共同准直并以不同波长对应的角度入射至衍射光栅表面的同一位置。各路光纤激光在设计时要使激光波长与其位置相对应,这样经过光栅衍射后所有的子光束就会合成一束激光,并从光栅表面沿确定方向出射。2017年3月,洛克希德·马丁公司再次刷新了他们光谱合成输出激光功率的记录,首次公开宣称其实现了60 kW级近衍射极限的光纤激光光谱合成激光输出<sup>[37]</sup>,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。

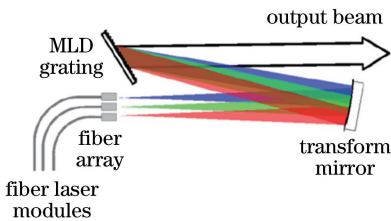


图2 30 kW 光纤激光光谱合成实验示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 2 Experimental setup for SBC of 30 kW fiber lasers<sup>[33]</sup>

国内对于光纤激光光谱合成的研究起步较晚,大部分报道是针对合成器件与合成系统的理论分析。但近几年,我国科研人员在光谱合成的实验研究上也呈现出突飞猛进的发展态势。2015年,中国工程物理研究院利用MLD衍射光栅搭建了一套双光栅光谱合成系统,对5路千瓦级MOPA结构光纤激光器进行光谱合成<sup>[38]</sup>。5路激光的中心波长覆盖范围为1060~1067 nm,最终激光的输出功率为5.07 kW,合成效率为91.2%,合成输出激光在 $x$ 和 $y$ 方向的光束质量分别为 $M_x^2 = 2.8$ ,  $M_y^2 = 2.0$ 。2016年,该研究团队对上述双光栅光谱合成系统进行扩展,合成系统的示意图如图3所示<sup>[39]</sup>。该系统组成包括10路千瓦级全光纤结构的窄谱宽子束光纤激光器和两组双电介质衍射光栅合成单元,最终获得了最大功率为9.6 kW的合成激光输出,合成效率为92%,光束质量 $M^2$ 因子为2.9。然而,该系统所

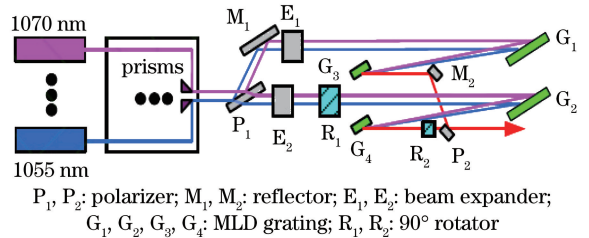


图3 中国工程物理研究院9.6 kW光谱合成实验装置示意图<sup>[39]</sup>

Fig. 3 Experimental setup for SBC of 9.6 kW fiber laser at China Academy of Engineering Physics<sup>[39]</sup>

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较为严苛的要求。

2016年,中国科学院上海光学精密机械研究所高功率光纤课题组基于MLD衍射光栅对8路光纤激光放大器实现了光谱合成<sup>[40]</sup>。其中,单路激光为1.5 kW超荧光光源的掺镱光纤放大器(YDFA),合成的激光输出功率为10.8 kW,合成效率高达94%。根据理论计算,光谱展宽导致的合成光束质量劣化会超过5。同年,由于窄线宽光纤激光器的研究取得突破性进展,根据子链路输出激光的性能,该课题组采用了单、双光栅结合的方式,实现了最高合成功率为11.27 kW的激光输出,合成效率为92.8%。当激光合成的总功率达到万瓦量级时,合成输出光束衍射倍率因子小于2.5,其系统结构的原理图如图4所示<sup>[14]</sup>。

### 3 光谱合成系统中元器件对合成激光光束质量的影响

光谱合成系统包含数个元器件,每个器件的性能都会制约合成光光束质量。因此需要建立统一的数学模型,评估单一元件对 $M^2$ 退化的贡献值。2002年,美国空军实验室的Bochove<sup>[41]</sup>提出了基于光纤激光阵列的光谱合成理论模型。根据衍射积分方法,Bochove建立的数学模型可以模拟光谱合成系统中的合成效率、带宽和光束质量,甚至可以计算透镜的离轴误差和光纤阵列排布方式带来的影响。文献<sup>[41]</sup>中比较了球面镜、四合透镜以及非球面透镜等多种透镜在合成系统中的性能差异,发现平抛透镜是相对更优的选择,这项工作对后续的研究工作具有重要的指导作用。四川大学的张彬课题组<sup>[20,22,42-44]</sup>也对光谱合成的理论发展作出了重要贡献,主要是针对闪耀光栅建立了光束传播的理论模



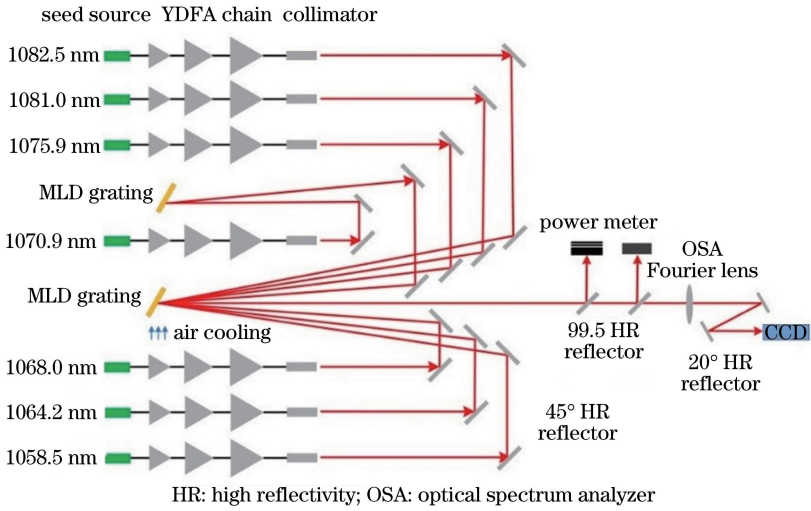


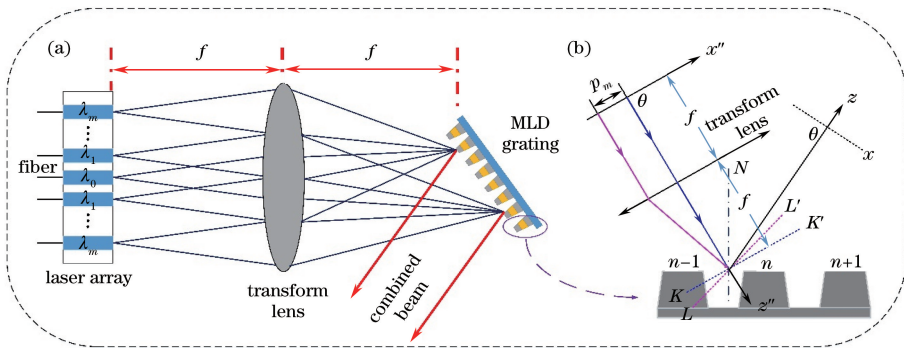
图 4 中国科学院上海光学精密机械研究所总功率为 11.27 kW 的光谱合成系统示意图

Fig. 4 Experimental setup for SBC of 11.27 kW fibers in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences

型,探讨了光栅角色散、光栅刻蚀误差以及光栅热畸变对光谱合成系统中光束传输特性的影响。

光纤激光阵列光谱合成的原理如图 5(a)所示。每一路输入激光平行排布,激光阵列和 MLD 衍射光栅分别位于转换透镜的前后焦面。转换透镜同时具有准直和调节光路的功能,使单路激光以与波长对应的角度入射至光栅表面。分别为入射光束和衍

射光束建立各自对应的笛卡尔坐标系,如图 5(b)所示。以透镜的前焦面与当前视场所在平面的交线为  $x''$ 轴,主光轴为  $z''$ 轴建立坐标系。对于衍射合成光,沿着传播方向设置  $z$ 轴,观察平面上的  $x$ 轴垂直于衍射光束的传播方向。 $x''$ 轴上分布着  $2m+1$ 个子光束,相邻两个子光束的位置间隔为  $\Delta p$ ,即编号为  $m$ 的子光束距离原点的距离为  $p_m = m \cdot \Delta p$ 。



$\lambda_m \dots \lambda_m$ : the center wavelength of the incident laser beamlets;  
 $f$ : the focal length of the transform lens;  
 $p_m$ : the displacement between the  $m$ th laser center and the zero point;  
 $n$ : the numerical order of the relief;  
 $KK'$  and  $LL'$  are equiphase surface for the different sub-beam;  
 $N$  represents the normal of the grating plane

图 5 基于 MLD 衍射光栅的光谱合成系统。(a)原理示意图;(b)简化模型示意图

Fig. 5 SBC system based on MLD grating. (a) Schematic; (b) simplified model

假设激光阵列每个独立子光束可近似为基模高斯光束,且束腰位于  $z''=0$  的平面,束腰宽度为  $\omega_0$ ,振幅为  $E_0$ ,子光束  $m$  在平面  $z''=0$  上的光场形式为

$$E_m(x_0, 0) = E_0 \exp\left[-\frac{(x_0 - p_m)^2}{\omega_0^2}\right], \quad (1)$$

式中: $x_0$  表示子光束输出队列在  $x''$ 轴上的坐标。

MLD 衍射光栅被放置在透镜的后焦点上,从阵列光源到光栅入射面之间光学系统的 ABCD 矩阵为<sup>[20]</sup>

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z'' - f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中: $f$  为转换透镜的焦距。激光阵列发出的子光



束经过 ABCD 系统后,利用柯林斯衍射积分公式<sup>[45]</sup>可得到 MLD 衍射光栅面上的入射光场分布为

$$E_m(x'',z'') = \sqrt{\frac{1}{i\lambda_m B}} \exp(ik_m z'') \times \int_{-\infty}^{+\infty} E_m(x_0,0) \cdot \exp\left[\frac{ik_m}{2B}(Ax_0^2 - 2x_0 x'' + Dx''^2)\right] dx_0, \quad (3)$$

式中: $k_m = 2\pi/\lambda_m$ 。假设 MLD 衍射光栅每个周期内的光波复振幅相等,则有光栅面上的光场复振幅仅与周期序号数  $n$  有关,记为  $E(n)$ 。

在一个周期内求解积分建立的物理坐标  $x'$  满足  $nd \cos \beta \leq x' \leq (n+1)d \cos \beta$ ,  $x'$  到原点的方向平行于  $x$  轴,垂直于衍射合成光的传输方向, $d$  为光栅常数, $\beta$  为合成激光对应的衍射角。根据菲涅耳衍射积分公式<sup>[46]</sup>,第  $j$  个子光束在衍射方向横截面上的光场分布可表示为<sup>[20]</sup>

$$E_j(x,z) = \sum_{n=-N}^N \sqrt{-\frac{ik_m}{2\pi z}} \times \exp(ik_m z) \cdot \int_{nd \cos \beta}^{(n+1)d \cos \beta} E(n) \times \exp(ik_m \Delta_{\text{total}}) \cdot \exp\left[ik_m \frac{(x-x')^2}{2z}\right] dx', \quad (4)$$

式中: $\Delta_{\text{total}}$  是光栅引起的相位调制, $2N+1$  为光栅周期总数。因为光谱合成属于非相干叠加,所以其远场强度可由各子束激光强度直接求和得到。在已知合成光束远场分布的前提下,采用强度二阶矩方法,拟合不同传输距离  $z$  上光斑直径的平方(或束宽半径的平方)与  $z$  的二次函数关系,可以求得光束质量  $M^2$  因子<sup>[47]</sup>。

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空间布局的制约,而高集成度的密集组束技术可以在有限的空间内通过合成子束的高占空比排布实现更多的合成通道,是高功率光谱合成系统的一项关键技术。针对实际的合成系统,各组成元器件的扰动误差都会影响合成系统的光束质量,增加合成激光的  $M^2$  因子。入射激光阵列的光束偏差会导致初始的光场分布偏离标准的高斯分布。转换透镜引入的像差会改变光栅衍射前入射光场的相位分布。光栅角色散、刻蚀误差以及热畸变等都会对近场相位产生调制,从而使  $\Delta_{\text{total}}$  从常数变为以  $x'$  为自变量的函数。各组成部件对光场分布特性的改变都会对合成光束的远场强度分布及其光束质量产生重要的影响,下面就这些因素对光谱合成输出激光光束质量的影响作具体的介绍。

### 3.1 激光阵列的光束偏差对光谱合成系统光束质量的影响

实际光纤激光阵列的排布难以严格校准,输出端帽的加工误差以及周边的环境扰动都会给合成系统的输出阵列带来不可避免的光束偏差,主要的影响效果可概括为轴向平移和角向偏差。当激光阵列中某一链路发生轴向平移时,如图 6(a)所示,输出光场则需要被修正为

$$E_m(x_0,0) = E_0 \exp\left[-\frac{(x_0 - p_m - \delta x_m)^2}{w_0^2}\right], \quad (5)$$

式中: $\delta x_m$  为激光阵列中  $m$  子链路的平移量。图 6(b)表示的则是  $m$  子链路发生角向偏差时的情况,假设此时的偏转角为  $\delta \theta_m$ ,输出光场则应被修正为

$$E_m(x_0,0) = E_0 \exp\left\{-\frac{[(x_0 - p_m) \cos \delta \theta_m]^2}{w_0^2}\right\} \cdot \exp[ik_m(x_0 - p_m) \sin \delta \theta_m]。 \quad (6)$$

对于整个激光阵列,实际合成系统中所有的子链路光源都有可能受到上述扰动的影响,从而产生光束偏差。由于这些误差的产生和影响大小都具有随机性,因此合成系统的光束质量分析应遵循统计规律,选择以正态分布的概率密度函数来描述光纤激光阵列的光束偏差。为了直观地显示  $M^2$  因子的变化趋势,选择正态分布的均值作为中心点,标准差作为上下波动的误差区间,整个扰动范围内  $M^2$  因子的变化趋势如图 7 所示。可以看出,随着轴向平移量和角向偏转角的不断增加,对应的  $M^2$  均值和标准差都会随之同时增加,表明合成系统输出的光束质量在持续不断地劣化。二阶多项式  $M_x^2 = 10^{-4} \times (0.13\sigma_x^2 + 1.31\sigma_x) + 1.0$  和  $M_\theta^2 = 0.26\sigma_\theta^2 + 0.35\sigma_\theta + 1.0$  被用作经验公式来拟合  $M^2$  因子随光束偏差的变化规律<sup>[17]</sup>,为进一步定量分析光纤激光阵列的光束偏差对光谱合成系统输出光束质量的影响提供参考依据。如果仅考虑光束偏差带来的影响,若要控制合成系统的光束质量  $M^2$  因子小于 2,当轴向平移的标准差达到  $100 \mu\text{m}$  时,指向偏差的标准差则需要控制在  $1 \text{ mrad}$  以内,这为实际合成系统中输出阵列的设计提供了一定的参考。

### 3.2 转换透镜对合成激光光束质量的影响

四川大学张彬课题组<sup>[18]</sup>在构建光谱合成光束质量分析的完整模型中,将转换透镜的像差影响等效为传输光场中的相位因子。每一个子光束通过转换透镜产生的像差导致 MLD 衍射光栅面的入射光场需要被修正为

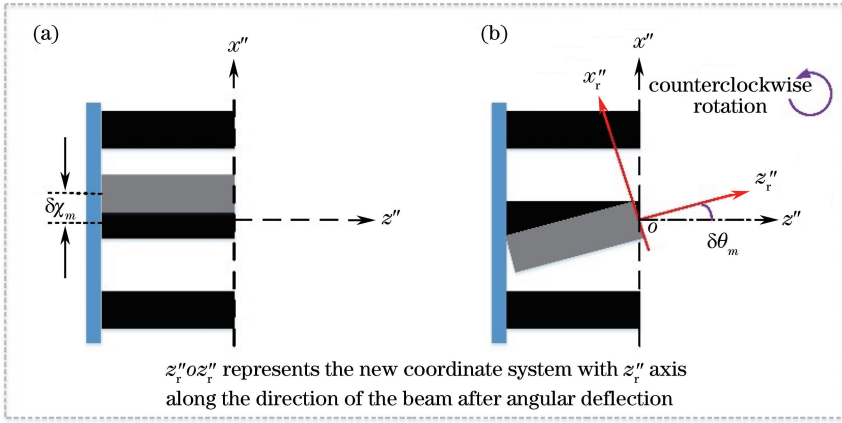


图 6 入射激光阵列的光束偏差。(a)轴向平移;(b)角向偏差

Fig. 6 Beam deviation of incident laser array. (a) Axial translation; (b) angular deflection

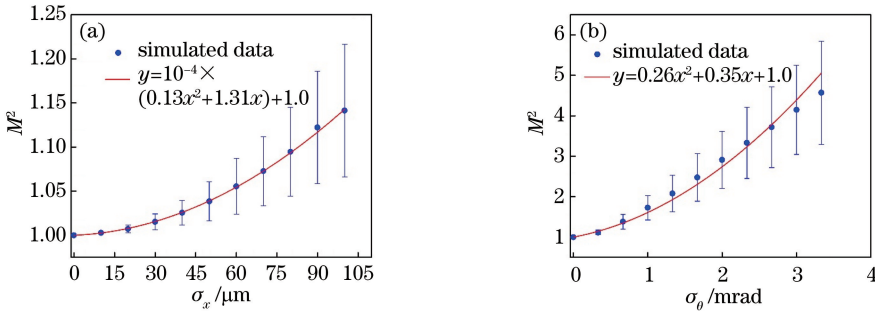


图 7 激光阵列在不同光束偏差下的  $M^2$  因子。(a)轴向平移量  $\sigma_x$ ; (b)角向偏转量  $\sigma_\theta$

Fig. 7  $M^2$  factors of laser array under different beam deviations. (a) Axial translation  $\sigma_x$ ; (b) angular deflection  $\sigma_\theta$

$$E_m(x'', z'') = \sqrt{\frac{1}{i\lambda_m B}} \exp(ik_m z'') \times \int_{-\infty}^{+\infty} E_m(x_0, 0) \times \exp(-ik_m C_4 x_0^4) \times \exp\left[\frac{ik_m}{2B}(Ax_0^2 - 2x_0 x'' + Dx''^2)\right] dx_0, \quad (7)$$

相较于(3)式,增加的指数项  $\exp(-ik_m C_4 x_0^4)$  代表引入的4次像差。 $C_4$  就是转换透镜引入的像差系数,是入射子光束波前畸变的诱因。根据(7)式得到的光栅面光场分布形式,结合前面介绍的光束传播模型,可以得到不同  $C_4$  系数下合成激光光束质量的变化情况,如图8所示。

关于透镜像差对合成激光光束质量的影响鲜有文献报道,可能是因为透镜的种类繁多,系统设计的要求也各不相同,难以系统地进行详细分析。从图8的仿真结果来看,不可否认的是,透镜像差的确会导致合成系统输出激光光束质量的劣化。因此,为了确保高光束质量的激光合成,针对转换透镜系统的光学设计优化也至关重要。在优化设计转换透镜系统时,除了像差系数会影响合成系统的光束质

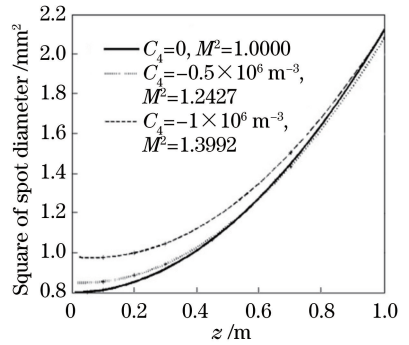


图 8 不同的4次像差系数下光束宽度随传播距离的变化曲线<sup>[18]</sup>

Fig. 8 Beam width versus propagation distance for different quartic-aberration coefficients<sup>[18]</sup>

量之外,转换透镜的焦距也会对合成系统的光束质量产生一定的影响,理论分析的结果如图9所示<sup>[19]</sup>。可以看出,如果转换透镜的焦距比较短,利用微透镜阵列压缩输入子光束的发散角,可以明显改善合成激光的光束质量,减小合成光束质量与转换透镜焦距之间的关联性,极大地提高合成系统的稳定性。

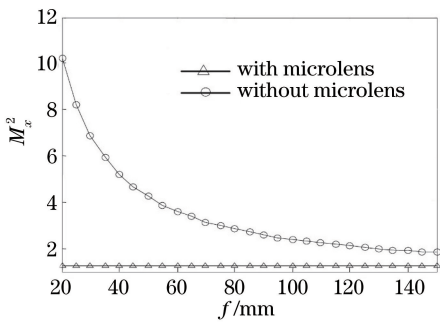


图9 光束质量随转换透镜焦距的变化曲线<sup>[19]</sup>

Fig. 9 Beam quality versus focal length of transform lens<sup>[19]</sup>

### 3.3 衍射光栅的热效应对合成系统光束质量的影响

随着光谱合成技术的不断发展,合成系统的输出功率不断提高,MLD衍射光栅所承载的功率密度也在不断增加,这对光栅的热管理提出了越来越高的要求。作为合成系统中的核心元件,虽然光栅具有较高的衍射效率,但是激光热沉积所引发的光栅热效应不可避免,合成系统的输出功率的提升使光栅热效应显得尤为突出,这也得到了科研人员的广泛关注。2004年,Liu等<sup>[48]</sup>利用迈克耳孙干涉仪在30 W的激光辐照下,观察到了金膜光栅的热畸变效应。Liu等指出光栅热畸变会导致波前失真,金膜与基底之间的光刻胶对温度较为敏感,这是导致光栅热畸变的主要原因。2006年,Loftus等<sup>[49]</sup>同样通过搭建迈克耳孙干涉仪,观测了 $1.5 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 峰值功率密度的激光辐照下衍射光栅的干涉条纹发生变化的现象。Loftus等指出对应633 nm的入射波长,光栅表面发生了大约 $0.2\lambda$  ( $\lambda$ 为光的波长)的畸变,实验装置和干涉条纹的变化如图10所示。

2007年,Limpert等<sup>[50]</sup>采用有限元分析方法,模拟了激光辐照下透射和反射式光栅的温度分布与热形变状况。计算结果显示:当光栅表面温度达到稳态时,透射型光栅的温度相比与环境温度上升了93 K,而反射型光栅仅上升1.1 K。Limpert等还指出,光栅热效应会带来一系列的影响,例如热透镜、光栅面形弯曲和光栅周期的改变等。根据模拟计算,透射型光栅的离焦有0.044 D ( $1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$ ),波前畸变达到 $440 \mu\text{rad}$ 。而反射型光栅的离焦只有0.0006 D,波前畸变也只有 $6 \mu\text{rad}$ 。因此,在光谱合成系统中应优先选用反射型的宽带光栅。

近期,面光栅的热畸变效应也得到了相关报

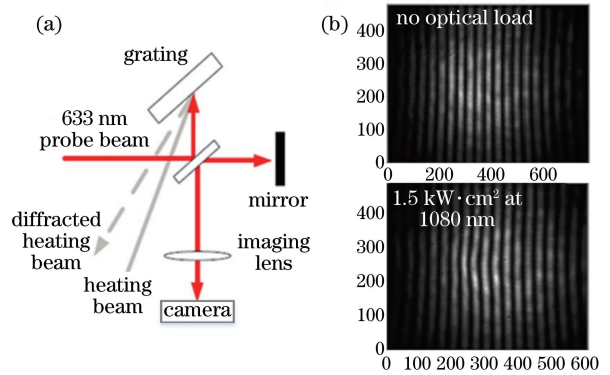


图10 MLD衍射光栅表面的热畸变。(a)实验测量的结构图;(b)有/无激光辐照下观测到的干涉条纹<sup>[49]</sup>

Fig. 10 Thermal distortion at MLD grating surface. (a) Structural diagram of experimental measurement; (b) interferograms observed with and without laser irradiation<sup>[49]</sup>

道。2016年张彬课题组报道了MLD反射型光栅热畸变对光谱合成系统的影响<sup>[22]</sup>。该课题组在建立光栅的热畸变模型的基础上,运用有限元分析方法模拟计算了光栅的温度分布与热形变分布。通过模拟计算的形变量,采用光线追踪法,计算光栅热畸变所带来的相位调制。基于相位调制,再根据该课题组之前所建立的光谱合成系统的理论模型<sup>[18,42-43]</sup>,定量分析了不同功率密度辐照下MLD衍射光栅热畸变对合成光束的远场形貌、远场发散角、光斑半径和光束质量 $M^2$ 因子的影响。如图11所示,随着激光辐照功率的增加,合成光束的旁瓣也愈发突出。张彬课题组得出的结论表明,随着合成系统输出功率的不断提高,光栅热畸变对光谱合成系统光束传播特性的影响也更加突出,只有及时解决光栅热畸变的问题,才能够有效地提高光谱合成系统的光束质量。

结合国内外的相关报道,不难发现,随着光谱合成技术的合成功率不断提高,光栅热畸变效应也越来越变得更为突出。理论模拟和实验结果都表明,光栅热畸变会引起其表面面形的变化,从而导致合成光束传播特性的改变,出现远场光斑畸变与光束质量退化的现象。光栅热畸变效应严重阻碍了光谱合成技术的应用和发展,要实现近衍射极限的输出,就必须采取有效的方法来抑制光栅热畸变。然而,根据目前的报道结果,光栅热畸变的调控机理与理论模型仍有待继续探究与完善,相应的实验研究也需要进一步深入,故下面就中国科学院上海光学精密机械研究所课题组在MLD衍射光栅热效应的研究方面开展的一系列工作进行简要的介绍。



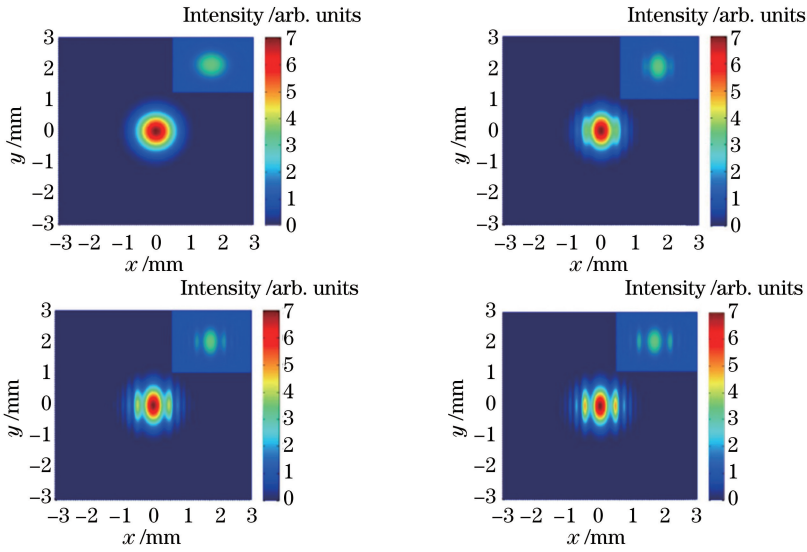


图 11 不同功率密度辐照下合成光束和单一入射光束的远场强度分布。(a)没有形变;(b)辐照功率为  $1 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  ; (c)辐照功率为  $2 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  ;(d)辐照功率为  $3 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  [22]

Fig. 11 Far-field intensity distributions of combined beam and single beam under different power densities. (a) No deformation; (b) irradiation power  $1 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  ; (c) irradiation power  $2 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  ; (d) irradiation power  $3 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  [22]

### 3.3.1 理论分析

MLD 衍射光栅表面热畸变的特点可以总结为:光栅热形变主要由薄膜结构形变、光栅结构形变和基底形变组合而成;光栅热分布、应力分布与形变形貌分布主要由辐照光强所决定。根据上述两个特点,结合严格耦合波理论,构建基于光谱合成系统的光栅热畸变模型,并用该模型来分析光栅热畸变对近场相位产生的调制作用。

MLD 衍射光栅的边界条件为两侧固定,即设定两个侧面不会产生膨胀位移,上下底面与侧面为空气自由对流边界条件。光栅表面未经任何特殊的散热处理,膜系( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{HfO}_2$ )和基质材料的热物理参数如表 1 所示。在特定的高斯激光辐照下( $3.6 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ),衍射光栅表面的温度分布以及表面形变分布如图 12 所示。从图 12(a)可以很明显

看出,达到热平衡状态时光栅的温度分布为高斯型,与辐照激光强度分布相同,在光束中心点处有最高温度,最高温度达到  $191.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 12(b)表明了光栅表面  $z$  方向上的形变量分布, $z$  方向热形变分布同样为高斯型,最大膨胀量为  $139.35 \text{ nm}$ 。

表 1 MLD 衍射光栅材料的热物理参数

Table 1 Thermophysical parameters of MLD grating materials

Parameter	$\text{SiO}_2$	$\text{HfO}_2$	Fused silica
Density / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2100	10300	2200
Specific heat / ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	722	146	670
Heat conductivity / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	7.6	0.647	1.4
Thermal expansion / ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	0.5	5.8	0.55
Young's modulus / GPa	73.1	170	72
Poisson's ratio	0.17	0.27	0.17

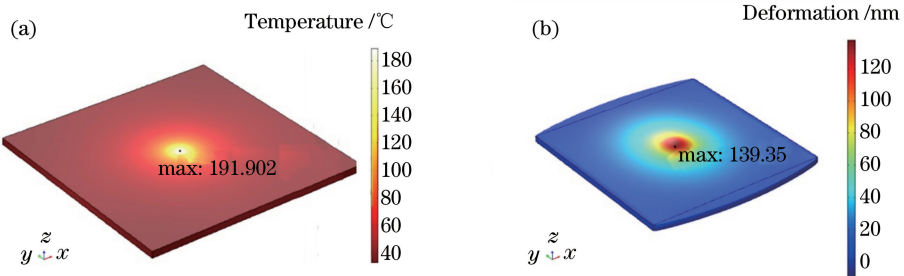


图 12 平均功率密度为  $3.6 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  的激光辐照后 MLD 衍射光栅的变化。(a)表面温度分布;(b)热形变分布  
Fig. 12 Change on MLD grating surface after laser irradiation with average power density of  $3.6 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  .

(a) Surface temperature distribution; (b) thermal deformation distribution

根据严格耦合波理论,可以计算出各部分形变量对应的相位调控作用。与基底形变量相比,光栅其余部分的形变量几乎可以忽略不计,因此在模型中可忽略光栅其余部分热畸变带来的影响,只需考虑光栅基底的形变函数。为了探索基底热形变对近场相位的调控作用,图 13(a)给出了基底形变高度  $h$  从 0 至 150 nm 的衍射光近场相位分布,图中相位分布呈现高斯型,与基底形变函数相对应,最大相位调制量与最大形变高度  $h$  成正比。图 13(b)对应给出了不同基底形变高度下合成光束的远场强度分布。

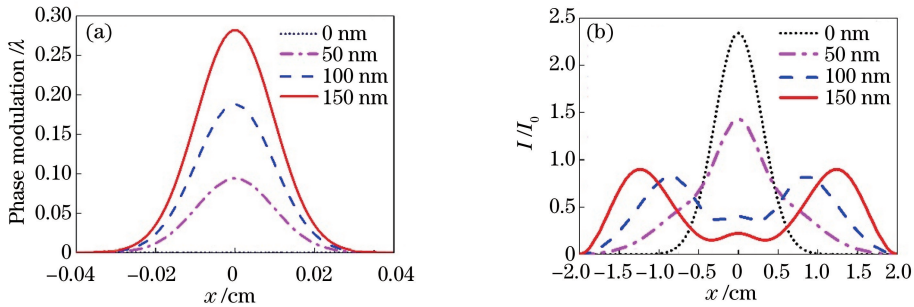


图 13 MLD 衍射光栅不同形变高度下的结果。(a)近场相位调控;(b)远场强度分布

Fig. 13 Results of MLD gratings under different deformation heights. (a) Near-field phase modulation; (b) far-field intensity distributions

表 2 MLD 衍射光栅在不同的最大形变高度下的合成激光的光束质量

Table 2 Beam quality of combined beam for MLD gratings with different maximum deformation heights

Deformation height $h$ / nm	0	50	100	150
Beam quality $M^2$	1.00	1.48	2.66	3.82

### 3.3.2 实验研究

光纤激光器在高功率输出下会出现光谱展宽的现象,这会导致光束质量退化。为了消除这一影响,突显出光栅热畸变对合成光束质量的影响,采用抽运光加热、探测光分离的方法来实现。利用干涉仪来观测不同功率密度下光栅表面的面形变化,同时利用外置的红外热像仪实时监测光栅表面的温度变化。搭建完成后的光栅热畸变在线监测平台如图 14 所示。采用 He-Ne 激光器作为探测光源,用以实时监测不同功率激光辐照下光栅表面的面形变化,如图 15 所示。从图 15 可以看出,随着激光功率的提升,干涉条纹的弯曲程度也愈发明显,这说明光栅的面形畸变也变得更加突出。图 16 则展示了当抽运光的功率密度分别为 0 和  $3.6 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  时探测光衍射光斑的分布情况。当抽运光的功率密度为 0 时,衍射光斑的光强分布为近高斯形,如图 16(a) 所示。当功率密度逐步增加到  $3.6 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  时,

随着基底形变高度  $h$  的增加,中心光强有明显的衰减现象。与此同时,两边的旁瓣能量开始增加,畸变光斑的直径也随之增加,强度分布逐渐转变为非高斯型。据此可推断,随着基底形变高度的增加,近场相位调制也随之不断增加,合成激光的光束质量则不断劣化,对应的理论计算值如表 2 所示。当形变高度从 0 上升至 150 nm 时,光束质量  $M^2$  从 1 恶化至 3.82。因此可以确定,光栅热畸变会对合成光束质量造成影响,且主要是光栅的基底膨胀。如果采用膨胀率低且厚的基底,光栅的热畸变效应可能会得到改善。

衍射光斑的光强分布发生了明显的畸变,中心强度被削弱,旁瓣强度被增强。这一现象和前文利用光束传播模型计算得到的远场强度分布[图 13(b)]相类似,理论和实验结果相吻合,有助于优化 MLD 衍射光栅的结构设计。

然而,实时监测的干涉条纹还不足以使研究人员直接获取光栅表面的完整相位信息,因此有必要对光栅的干涉条纹加以处理。利用载波傅里叶变换的方法,对采集到的干涉条纹进行处理。在连续的激光辐照下,MLD 衍射光栅的热形变会对入射光的近场相位分布产生调制,进而影响衍射光的远场强度分布,导致束腰直径减小,远场发散角增大,最后的直观表现就是光束质量  $M^2$  因子退化。

将实验测量得到的远场光斑与前文模拟计算的远场强度分布进行对比,不难发现,两者呈现相同的变化趋势,光斑形貌基本吻合。随着光栅热畸变愈加明显,中心处的光强逐渐衰减,旁瓣能量逐渐增强。实验测量结果进一步证实了光栅热畸变模型的可靠性,推动了光谱合成系统中光栅热效应的研究进展。既然光栅的热效应严重制约着合成系统的光束质量,那么针对实际的光谱合成系统,研究人员可以考虑从光栅本身的效率提升、缺陷减少和外部辅

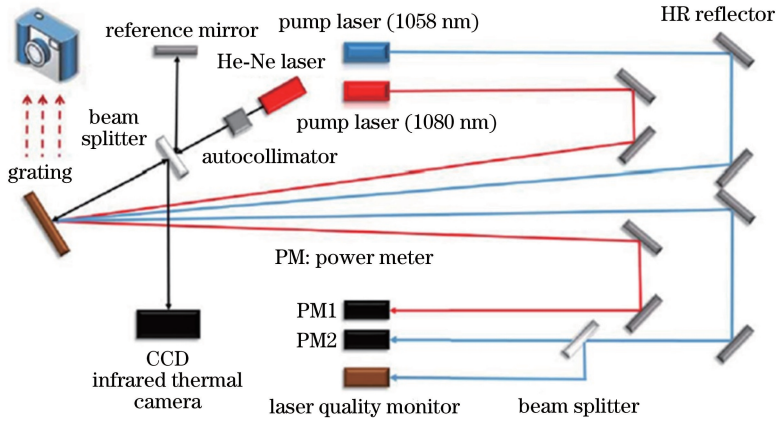


图 14 监测 MLD 衍射光栅热畸变的实验装置图

Fig. 14 Experimental setup for thermal deformation detection of MLD grating

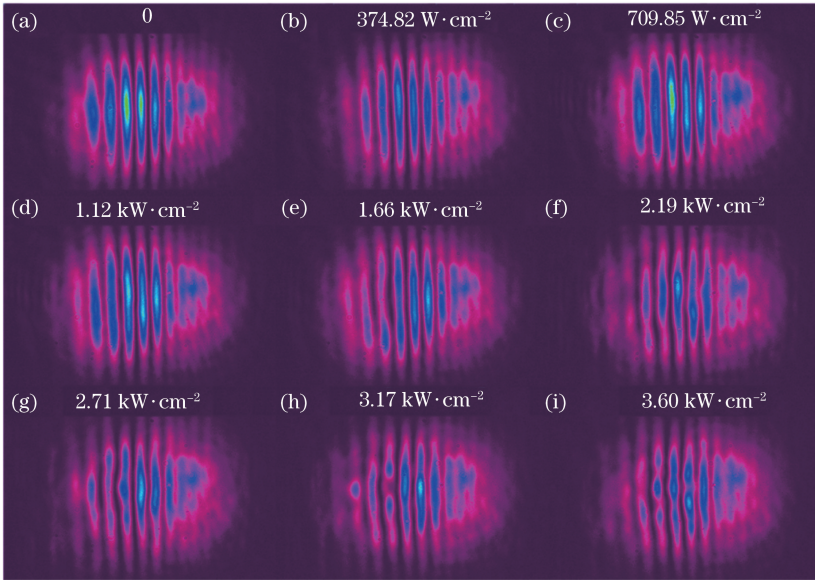


图 15 不同功率密度激光辐照下的干涉条纹图样

Fig. 15 Interference fringe patterns under laser irradiation with different power densities

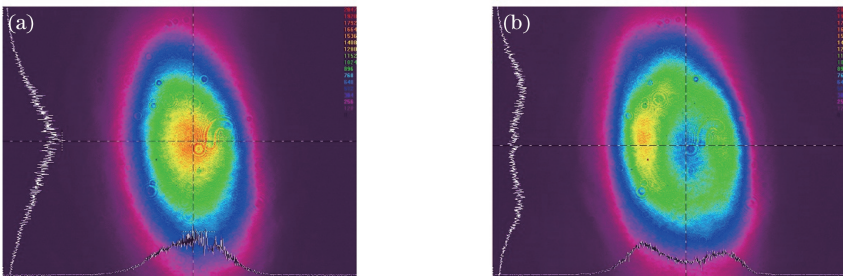


图 16 不同功率密度激光辐照下的远场强度分布。(a) 0; (b)  $3.6 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$

Fig. 16 Far-field intensity distributions under laser irradiation with different power densities. (a) 0; (b)  $3.6 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$

助的非接触式散热手段来减轻光栅表面的热积累，缓解光栅热畸变的程度，从而促使远场光斑强度分布保持原有的高斯分布。

#### 4 入射激光线宽对合成激光光束质量的影响

在上述介绍的 MOPA 式单路光束的密集组束



光谱合成技术方案中,衍射光栅具有特定的光谱分辨率,若激光的光谱宽度超过衍射光栅的光谱分辨率,衍射光将会出现角色散,这会严重影响合成光的发散角,从而使得合成激光的光束质量大幅降低。

假设合束激光以近 Littrow 结构入射至 MLD 衍射光栅表面,入射激光的中心波长为  $\lambda$ ,线宽为  $\Delta\lambda$ ,束腰半径和远场发散角分别为  $\omega$  和  $\theta$ ,入射角为  $\Theta_{\text{Littrow}}$ ,结合光栅方程( $2d \sin \Theta_{\text{Littrow}} = m\lambda$ , $d$  是光栅常数, $m$  是光栅的衍射级次)以及角色散公式,可以推算出合成激光在 MLD 衍射光栅色散面内裂化的光束质量为<sup>[40]</sup>

$$\Delta M_x^2 = \omega \cdot \pi \cdot \Delta\lambda / (2\lambda \cdot d \cdot \cos \Theta_{\text{Littrow}})。 \quad (8)$$

中国科学院上海光学精密机械研究所高功率光纤课题组曾巧妙地利用 MOPA 放大结构中自相位调制效应带来的光谱展宽现象,研究了入射子光束的激光线宽对光栅衍射效应的影响,实验结果如图 17 所示<sup>[24]</sup>。从远场衍射光斑的变化情况可以看出,随着入射激光的线宽逐渐展宽,合成激光的远场光斑在色散面  $x$  方向的展宽也越来越严重。针对

入射激光的线宽对合成激光光束质量的影响,Liu 等<sup>[48]</sup>提出了双光栅合成的方案,以弥补由于色散所造成的合成光束质量退化。采用参数完全相同、平行放置的双光栅可以实现色散补偿,从而优化合成光的光束质量。仅考虑入射激光谱线宽度对合成激光光束质量的影响,对单光栅和双光栅两种光谱合成结构的光束质量随入射激光的光谱线宽变化趋势进行模拟,线宽范围从 1 pm 扩展到 1000 pm 的变化趋势如图 18 所示。当入射激光谱线宽度低于 10 pm 时,两种光谱合成结构的合成光束质量无明显差别。当入射激光的谱线宽度大于 10 pm 且逐渐增加时,单光栅光谱合成光束质量的恶化极为快速。当入射激光谱线宽度到达 100 pm 时,光束质量  $M^2$  因子已经超过 2;当入射激光的谱线宽度到达 1000 pm 时,光束质量  $M^2$  因子急剧恶化到 10 以上。而对于双光栅光谱合成结构,合成光束质量退化则较为平缓,即使入射激光的谱线宽度到达 1000 pm,合成光束的光束质量  $M^2$  因子也没有超过 2,即光束质量  $M^2$  因子的退化量未超过 1。

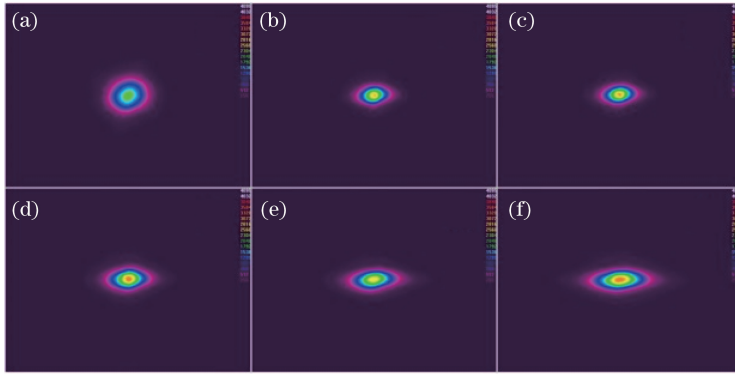


图 17 不同线宽的入射激光经 MLD 衍射光栅衍射后合成光束的远场强度分布。(a) 0.07 nm; (b) 0.15 nm; (c) 0.19 nm; (d) 0.25 nm; (e) 0.30 nm; (f) 0.41 nm

Fig. 17 Far-field intensity distributions of combined beam when incident lasers with different linewidths diffracted by MLD grating. (a) 0.07 nm; (b) 0.15 nm; (c) 0.19 nm; (d) 0.25 nm; (e) 0.30 nm; (f) 0.41 nm

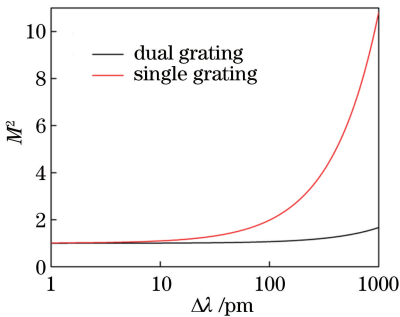


图 18 光束质量  $M^2$  因子随入射激光线宽的变化曲线

Fig. 18 Beam quality factor  $M^2$  versus incident laser linewidth

因此,与单光栅光谱合成结构相比,双光栅光谱合成结构能够大幅地降低系统对入射激光谱线宽度的要求。适当地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。该方案降低了单路激光线宽控制的需求,便于大幅度提高子链路激光光源的输出功率。但是,双光栅光谱合成的技术会在一定程度上增加阵列规模扩展的难度,对衍射光栅的面型尺寸也具有一定的限制,因此研究人员需要根据实际的应用需求在两者之间作出取舍,逐步研发出高集成化、高光束质量的光谱合成系统。

## 5 结束语

光谱合成技术利用色散光学元件实现多个具有不同中心波长的单纤子束激光的共孔径合束输出,它不仅能够提升光纤激光器的输出功率,而且能够保持输出激光良好的光束质量,解决了单根光纤激光输出功率受限的问题,逐渐成为多纤合成技术的一个重要发展方向。本文从实际出发,分析了子光束阵列偏差、转换透镜像差、光栅热畸变效应和子光束谱线线宽等几个方面对合成光束质量的影响,为光纤激光器中高亮度密集阵列组束系统的设计和输出功率进一步提升提供了参考。

对于合成系统的元器件而言,子光束阵列的光束偏差是不可避免的。一味地人工调节是难以保证精度要求的,其一致性方面可能也会有所欠缺,故智能化的反馈控制必不可少。与此同时,控制转换透镜像差和衍射光栅的热畸变也必不可少。单透镜系统可能难以消除像差,而且稳定性不高,需要通过特殊设计的复合式透镜系统来解决这一问题。为了缓解衍射光栅表面的热效应,可以从两方面着手考虑:一是光栅本身的制作方面,可以选择热导率更高的基底材料,进一步优化表面栅型结构的设计,提升制作工艺;二是非接触式的散热处理,通过有效合理的结构设计实现更好更快的热交换。

而对于单链路光束的线宽控制而言,高功率窄线宽光纤激光器的研制将变成一个十分重要的研究课题。当前主流的相位调制技术为压窄线宽、抑制非线性效应提供了很好的保障。通过进一步提高单路合成子束的输出功率、增加合成系统的阵列数目,基于光栅光谱合成系统原理上可实现总输出功率大于100 kW、光束质量接近衍射极限的共孔径合成激光输出。但是,针对实际的合成系统,如何解决子光束的线宽压窄和功率提升的矛盾,权衡子光束的尺寸缩放和光栅热畸变的利弊,改善阵列规模扩展、提高调整精度,是当前面临的重大挑战。

## 参 考 文 献

[1] Tünnermann A, Schreiber T, Röser F, *et al.* The renaissance and bright future of fibre lasers [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2005, 38(9): S681-S693.

[2] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.

[3] Stark M. Over 50 percent wall-plug efficiency fiber

laser[J]. *Laser Technik Journal*, 2016(2): 14-16.

[4] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.

[5] 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.

[6] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, *et al.* Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18645-18654.

[7] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.

[8] Injeyan H, Goodno G D. High-power laser handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 2011: 533-571.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Zheng Y, Yang Y F, Zhao X, *et al.* Research progress on spectral beam combining technology of high-power fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201002.

郑也, 杨依枫, 赵翔, 等. 高功率光纤激光光谱合成技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201002.

[15] Ma Y, Yan H, Sun Y H, *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.
- 马毅, 颜宏, 孙殷宏, 等. 基于双光栅的光纤激光光谱合成关键技术研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0103002.
- [16] Wu Z, Yang L, Zhong Z Q, *et al.* Influence of laser array performance on spectrally combined beam [J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 63 (19): 1972-1980.
- [17] Bai G, Shen H, Yang Y F, *et al.* Theoretical analysis of beam quality degradation in spectral beam combining of fiber laser array with beam deviation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 105: 281-287.
- [18] Zhang Y, Zhang B. Analysis of beam quality for the laser beams after spectral beam combining [J]. *Optik*, 2010, 121(13): 1236-1242.
- [19] Zhan S B, Wu Z L, He F, *et al.* Influence of transform-lens focal length on spectral beam combining in an external cavity with a microlens array [J]. *Optics Communications*, 2017, 387: 223-229.
- [20] Wu Z, Zhong Z Q, Yang L, *et al.* Beam properties in a spectral beam combining system based on trapezoidal multilayer dielectric gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(2): 171-179.
- [21] Li L X, Jin Y X, Kong F Y, *et al.* Beam modulation due to thermal deformation of grating in a spectral beam combining system [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(19): 5511-5519.
- [22] Yang L, Wu Z, Zhang B. Influence of thermal deformation of a multilayer dielectric grating on a spectrally combined beam [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(32): 9091-9100.
- [23] Xu J, Chen J M, Chen P, *et al.* Study of the key factors affecting temperature of spectral-beam-combination grating [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (17): 21675-21684.
- [24] Zheng Y, Yang Y F, Wang J H, *et al.* Effective dispersion compensation of variable-linewidth fiber amplifier by single-multilayer dielectric grating [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(6): 065610.
- [25] Tian F, Yan H, Chen L, *et al.* Investigation on the influence of spectral linewidth broadening on beam quality in spectral beam combination [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9255: 92553N.
- [26] Jiang M, Ma P F, Zhou P, *et al.* Beam quality in spectral beam combination based on multi-layer dielectric grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65 (10): 104203.
- 姜曼, 马鹏飞, 周朴, 等. 基于多层电介质光栅光谱合成的光束质量 [J]. *物理学报*, 2016, 65(10): 104203.
- [27] Chang Y L, Kim B K, Sang S H, *et al.* Multi beam laser apparatus: US7991037 [P]. 2011-08-02 [2018-03-15].
- [28] R. Von Elm, C. Marois. Beam-combiner for fiber-delivered laser-beams of different wavelengths: US8599487 [P]. 2013-12-03 [2018-03-15].
- [29] Schmidt O, Wirth C, Nodop D, *et al.* Spectral beam combination of fiber amplified [J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 22974-22982.
- [30] Zeil P, Pasiskevicius V, Laurell F. Efficient spectral control and tuning of a high-power narrow-linewidth Yb-doped fiber laser using a transversely chirped volume Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (4): 4027-4035.
- [31] 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.
- [32] Liang X B, Chen L M, 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.
- 梁小宝, 陈良明, 李超, 等. 体布拉格光栅用于高功率光谱束的研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27 (7): 071012.
- [33] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, *et al.* Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9730: 97300Y.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, *et al.* Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency, and brightness [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8601: 860115.
- [37] Lockheed Martin to Deliver World Record-Setting



- 60 kW Laser to U. S. Army [OL]. (2017-03-16) [2018-03-15]. <http://news.lockheedmartin.com/2017-03-16-Lockheed-Martin-to-Deliver-World-Record-Setting-60kW-Laser-to-U-S-Army>.
- [38] Ma Y, Yan H, Tian F, *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.
- [39] Ma Y, Yan H, Peng W J, *et al.* 9.6 kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers [J]. 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.
- [40] Zheng Y, Yang Y F, Wang J H, *et al.* 108 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [41] Bochove E J. Theory of spectral beam combining of fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(5): 432-445.
- [42] Wu Z, Zhong Z Q, Yang L, *et al.* Analysis of characteristics of combined beam in spectral beam combining system based on multilayer dielectric grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(5): 0542051.  
吴真, 钟哲强, 杨磊, 等. 基于多层介质膜光栅的谱合成系统光束特性分析 [J]. *物理学报*, 2016, 65(5): 0542051.
- [43] Zhang Y, Zhang B, Zhu S J. Analysis of the property of the beam after spectral beam combining [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(8): 4590-4595.  
张艳, 张彬, 祝颂军. 谱合成光束特性的模拟分析 [J]. *物理学报*, 2007, 56(8): 4590-4595.
- [44] Wu Z, Ito T, Akiyama H, *et al.* Effect of interaction between the internal cavity and external cavity on beam properties in a spectrally beam combined system [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(5): 772-778.
- [45] Collins S A. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1970, 60(9): 1168-1177.
- [46] Goodman J W. *Introduction to Fourier optics* [M]. New York: Roberts & Company Publishers, 2005.
- [47] Siegman A E. How to (maybe) measure laser beam quality [C] // *Diode Pumped Solid State Lasers: Applications and Issues*, January 1, 1998, Washington, D. C. United States. Washington: Optical Society of America, 1998: MQ1.
- [48] Liu A P, Mead R, Vatter T, *et al.* Spectral beam combining of high-power fiber lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5335: 81-89.
- [49] Loftus T H, Liu A P, Hoffman P R, *et al.* 258 W of spectrally beam combined power with near-diffraction limited beam quality [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6102: 61020S.
- [50] Limpert J, Roser 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.