



## 全固态激光中的光谱合成技术

邸鹏程<sup>1,2</sup>, 王小军<sup>1</sup>, 汪汝俊<sup>1,2</sup>, 李雪鹏<sup>1,2</sup>, 杨晶<sup>1</sup>, 宗楠<sup>1</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所 中国科学院固体激光重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190)

**摘 要:** 对多种全固态激光中的光谱合成技术进行了探讨和研究, 包括光纤激光、Yb:YAG 板条激光和半导体激光。对于光纤激光, 探讨了基于单个多层介质膜(MLD)光栅、一对 MLD 光栅、多个体布拉格光栅三种衍射光学元件的光谱合成技术中色散造成的光束质量退化问题, 指出子束光谱线型的二阶矩全宽决定了光束质量的退化量, 但所允许的光谱宽度又依赖于具体的技术选择途径。进而比较了三种光谱合成方案的优缺点。对于固体激光, 实验演示了基于 Yb:YAG 晶体的板条激光实现光谱合成的原理可行性。通过设计一个基于 MLD 光栅的振荡器内的光谱合成装置, 实现了 7 束子激光最高 241 W 的光谱合成输出, 合成后光束质量  $\beta$  因子约 4.1, 表明大功率 Yb:YAG 板条激光具有通过光谱合束技术实现功率进一步提升的潜力。对于半导体激光, 提出并设计了大模场外腔半导体激光+快轴光谱合成的技术。实验演示了 9 个 1 mm 宽 LD 芯片沿快轴方向的光谱合成, 用  $\beta$  因子评价合成后的光束质量, 在慢轴方向  $\beta \approx 6.3$ , 在快轴方向  $\beta \approx 1.6$ , 表明快轴光谱合成造成的光束质量退化是完全可控的。

**关键词:** 光谱合成; 光束质量; 板条激光; Yb:YAG; 半导体激光; 光谱线形

**中图分类号:** TN248.1

**文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.200191

## Spectral beam combing in solid-state lasers

Di Pengcheng<sup>1,2</sup>, Wang Xiaojun<sup>1</sup>, Wang Rujun<sup>1,2</sup>, Li Xuepeng<sup>1,2</sup>, Yang Jing<sup>1</sup>, Zong Nan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Solid-State Lasers, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** This paper discusses the technique of the spectral beam combing (SBC) in the solid-state lasers, including the fiber laser, the Yb:YAG slab laser, and the diode laser. For the fiber lasers, we study the beam quality degeneration (BQD) in SBC due to the dispersion of three kinds of diffraction optics elements (DOE): single multi-layer dielectric (MLD) grating, a couple of MLD gratings and multiple volume Bragg gratings (VBG). We point out that, for all cases, BQD is determined by the full-width of the second-order moments instead of the full-width of half maximum in the spectrum of sub-beams. But the value of BQD depends on the DOEs. For solid-state crystal lasers, we demonstrate the feasibility of SBC in the Yb:YAG slab laser by designing an experiment for an intra-cavity SBC employing an MLD grating. The experiment results SBC of seven sub-beams and 241 W laser output, the beam quality after SBC is  $\beta \approx 4.1$ . It indicates that the output power of the Yb:YAG slab laser can be further scaled by SBC. Finally, we demonstrate a new technique to scale the output power of the laser diodes (LD), which includes the large modal external oscillation in the slow-axis and the SBC in the fast-axis simultaneously. The experiment results the SBC of nine LDs with the slow-axis width of 1 mm, the beam qualities after SBC are  $\beta \approx 6.3$  in the slow-axis and  $\beta \approx 1.6$  in the fast-axis. It means that beam quality after the SBC in the fast-axis is controllable.

**Key words:** spectral beam combing; beam quality; slab laser; Yb:YAG; laser diode; spectral lineshape

多束激光的功率合成技术是提升激光装置总输出功率非常有效的途径。但要使多束激光在合成过程中以环围半径或环围能量表征的光束质量不发生大的退化, 应该通过共轴共孔径功率合成方法来实现。同时, 期望合成过程中不会造成大的能量损失。即要求合成过程是“高效(率)优(光束)质(量)”的。原理上有三种方法可以实现共轴共孔径功率合成: 基于衍射光学元件(DOE)的相干合成<sup>[1]</sup>、非相干偏振合成、以及非相干光谱合成<sup>[2]</sup>。共孔径

收稿日期: 2020-07-07; 修订日期: 2020-10-29

作者简介: 邸鹏程(1993—), 女, 博士, 从事高功率半导体激光及光谱合束研究; dipengcheng15@mails.ucas.edu.cn。

通信作者: 王小军(1973—), 男, 博士, 从事激光物理、超高功率全固态激光技术、新型高亮度全固态激光技术研究等; wangxj@mail.ipc.ac.cn。

相干合成方法可以同时保证高的空间亮度和光谱亮度。但该技术除了对子束的光谱宽度、偏振、相位噪声等参量有严格要求外,还对子束振幅有额外严格要求,技术难度较大,且很难实现较高的合成效率;2014年 McNaught 等实现了最大功率 2.4 kW 的合束输出,合成效率 78%<sup>[3]</sup>;2016年 Flores 等人报告了输出功率 4.9 kW、合成效率 82% 的激光输出<sup>[4]</sup>。偏振合成方法一次只能合成两束偏振方向正交的光束,如果要实现多束合成,需要在每次偏振合束后进行一次从椭圆偏振变换到线偏振的相位控制<sup>[5]</sup>,或者保证所有子束具有严格的相位一致性,以保证每次偏振合束后两个正交线偏振光变化为旋转 45° 的线偏振光;这种合成技术难度大、结构复杂。相对来说,基于 DOE 的光谱合成系统结构较为简单。Lockheed Martin 公司在 2016 年利用一个多层电介质(MLD)光栅将 96 束 300 W 窄线宽光纤激光光谱合成为一束,总功率近 30 kW,光束质量接近衍射极限<sup>[6]</sup>,展示了基于 DOE 的光谱合成的巨大潜力。迄今,基于 DOE 的光谱合成技术已经在高功率光纤激光领域获得广泛应用,在大功率半导体激光领域也得到广泛研究。本文对光纤激光光谱合成技术中光谱线型造成的光束质量退化进行细致物理分析,并给出针对 Yb:YAG 板条光谱合成技术和半导体激光光谱技术的一些创新性研究结果。

## 1 光纤激光光谱合成技术

目前基于 DOE 的光纤激光光谱合成技术有如图 1 所示的三种方案:使用单个 MLD 光栅(图 1(a))、一对 MLD 光栅(图 1(b))或体布拉格光栅(VBG)图 1(c))。其中 VBG 又可以分为透射式(T-VBG)和反射式(R-VBG),两种原理上是相同的,只是针对不同的应用需求而存在结构上的差异。

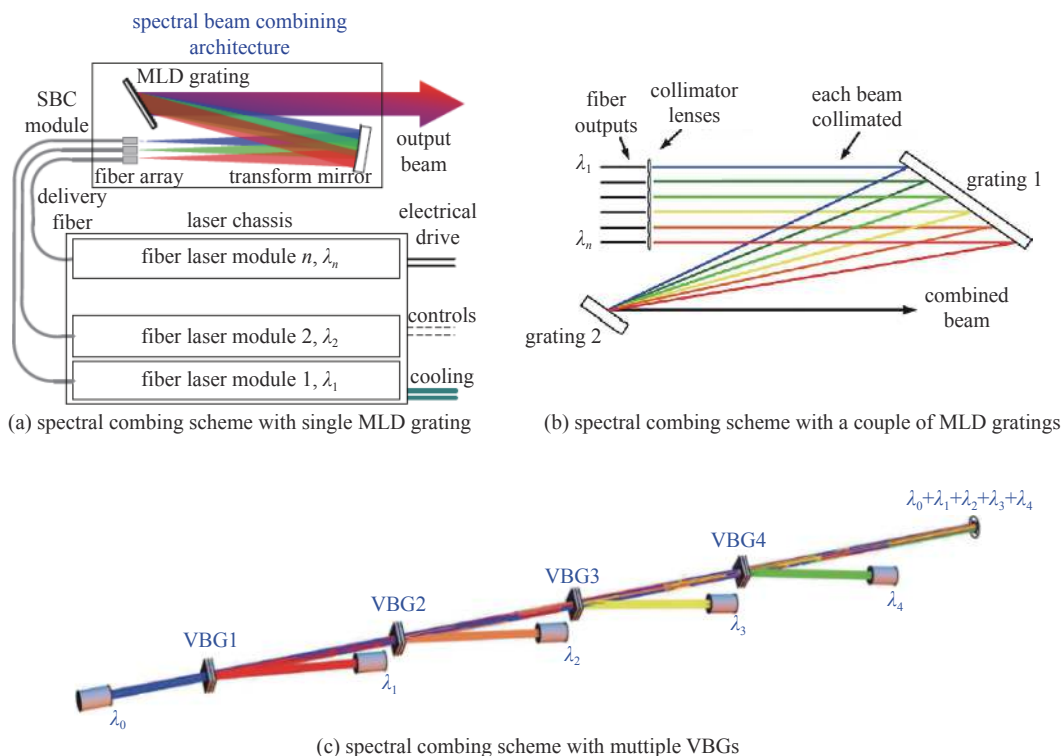


Fig. 1 Three schemes of spectral beam combining of fiber lasers based on different diffraction optics elements

图 1 三种基于不同 DOE 元件的光纤激光光谱合成方案

除了基于 MLD 光纤激光光谱合成获得 30 kW 的成果外, Lockheed Martin 公司也在前期进行了双 MLD 合成的研究,取得了一定成果,在 2009 年获得了 2 束光谱合成一束 190 W 光谱的结果<sup>[7]</sup>。Fraunhofer 研究所则在 2011 年使用一个偏振无关的 MLD 光栅实现了 4 束光谱合成 7.3 kW,  $M^2 \approx 4.3$  的结果<sup>[8]</sup>,谱间距为 8 nm。显然,对应 Yb-掺杂光纤可以使用约 40 nm 的增益谱,这样的谱间距限制了进一步定标的的能力。美国中佛罗里达大学则使用 VBG 进行谱合成<sup>[9]</sup>,实现了将 5 束 160 W、线宽 < 0.1 nm 的非保偏子束,合成得到总功率 770 W,  $M^2 \approx 1.2$  的结果,波长间隔为 0.5 nm,实现了很高的合成光束的光束质量。国内近几年在光纤激光的光谱合成技术方面也取得较大的进展,总体达到国际先进水平。

一般而言,光纤激光光谱合成过程中的光束质量退化来自如下几个因素:光栅色散、子束光轴的不一致性、光栅上子束光斑未能实现理想重合等。由于高功率光纤激光中存在较严重的非线性效应,其导致光谱展宽或者限制

光谱宽度,因此光栅色散是导致该方案中光束质量退化的主要因素。文献[7, 10-11]指出光栅的色散效应是影响合成激光光束质量的重要因素;文献[12]对基于VBG的光谱合成中色散导致光束质量退化进行了理论研究,指出合成激光的光束质量同时受到VBG和入射子束的影响。本文针对一般性的子束光谱线形,对图1所示的三种光谱合成方案中色散导致光束质量退化进行系统物理分析。

一束波长为 $\lambda$ 的理想平行光入射到MLD光栅后,其衍射光方向满足如下方程

$$m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (1)$$

式中: $m$ 为衍射阶数; $d$ 为光栅刻槽间距; $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为入射角和衍射角。本文只关心效率最高的衍射阶数 $m=-1$ 时的衍射。

那么对于任意一个单色的入射光场 $u(x, y, \lambda)$ ,这里 $x, y$ 为垂直于光轴的平面上的坐标,并且记 $x$ 垂直于光栅刻槽,则光栅衍射后的光场可以表示为

$$u'(x, y, \lambda) = \sqrt{\cos\alpha/\cos\beta}u(-x\cos\alpha/\cos\beta, y, \lambda) \quad (2)$$

当一束非单色的光以相同的角度入射在光栅上时,色散导致的出射角偏移为

$$\Delta\beta = \Delta\lambda/d\cos\beta$$

因此需要在式(2)中附加一个倾斜因子

$$u'(x, y, \lambda_0 + \Delta\lambda) = \sqrt{\cos\alpha/\cos\beta}e^{ik\Delta\lambda x/d\cos\beta}u(-x\cos\alpha/\cos\beta, y, \lambda_0) \quad (3)$$

式中: $\lambda_0$ 为入射光谱的中心波长; $\Delta\lambda$ 为光谱的半高全宽(FWHM)。

基于单个MLD光栅的光谱合成原理示意如图1(a)所示,这里光谱色散造成的光束质量退化可以利用如下式子进行严格求解。记光束的光谱线型为 $\rho(\lambda)$ ,MLD对准中心波长 $\lambda_0$ ,认为所有波长的光在较窄谱段内其空间分布都一样,则可以将入射光场写为

$$U(x, y, \lambda) = \sqrt{\rho(\lambda)}u(x, y)$$

那么使用式(3),任意光束经过一块MLD光栅衍射后的远场为

$$U_f(\xi, y, \lambda) = \sqrt{\rho(\lambda)}U_f^{(0)}(\xi - (\lambda - \lambda_0)f'/d\cos\alpha, y) \quad (4)$$

这里 $U_f^{(0)}$ 是以 $u(x, y, \lambda)$ 为出射场计算的焦距为 $L$ 的远场。通过计算用二阶矩表示的远场发射角,则色散造成的光束质量退化为

$$M_{\text{SBC}}^2 = \frac{w_0\theta}{\lambda/\pi} = M^2 \sqrt{1 + \frac{1}{\theta_0^2 d^2 \cos^2 \alpha P} \int d\lambda \lambda \rho(\lambda) (\lambda - \lambda_0)^2} \quad (5)$$

式中: $\theta_0$ 为波长 $\lambda_0$ 对应的单频光的远场发射角; $w_0$ 为单频光的近场二阶矩; $M^2$ 为没有光栅衍射的光束质量。式(5)表明光谱合成中光栅色散造成的光束质量退化与光束的二阶矩全宽有关、而与半高全宽无关。当光谱为高光谱时<sup>[10]</sup>,光束质量退化为

$$M_{\text{SBC}}^2 = M^2 \sqrt{1 + \frac{1}{2\ln 2} \left( \frac{\Delta\lambda}{d\theta_0 \cos\alpha} \right)^2} \quad (6)$$

如果光谱线形为Lorentz谱,由于式(5)中的积分项是发散的,我们将得到一个无穷大的光束质量退化。更一般地,如果光谱分布存在一个较大的底盘,其渐进行为近似于 $[(\lambda - \lambda_0)^2 + \Delta\lambda^2]^{-1}$ ,式(5)的积分也是发散的,这意味着光谱的边带分布对光束质量退化的影响非常大。

下面来分析基于一对MLD光栅的光谱合成中(图1(b))色散导致的光束质量退化。记两块光栅间距为 $L$ ,并定义

$$L_{\text{eff}} = L\cos^2\alpha/\cos^2\beta, \quad \eta = x\cos\alpha/\cos\beta \quad (7)$$

可证明,经过双光栅衍射后光束近场为

$$U(\xi, y, \lambda) = \sqrt{\rho(\lambda)} \frac{ie^{ikL+i\phi}}{\sqrt{L_{\text{eff}}\lambda}} \int d\eta e^{\pi i(\eta-\xi)^2/L_{\text{eff}}\lambda} u(-\eta + \Delta x, y) \quad (8)$$

$$\Delta x = (\lambda - \lambda_0)L_{\text{eff}}/d\cos\alpha, \quad \phi = \pi(\lambda - \lambda_0)^2 L_{\text{eff}}/\lambda d^2 \cos^2\alpha \quad (9)$$

对于我们关心的非相干合成问题,相位因子的影响是不重要的,因此式(8)和式(9)表明,有限谱宽的光束通过

双光栅后各个光谱分量产生了一个空间平移,此平移量导致合束后的近场光束尺寸扩展,进而导致光束质量的退化,而且光栅间距越大,光束质量退化越严重。

进一步可验证,如果忽略波长变化对远场的轻微影响,经过双光栅衍射后的远场与不考虑光栅系统的远场完全相同,即远场发散角与光谱分布无关。而当两个光栅间距离很小、且入射光束是轴对称或者光谱关于 $\lambda_0$ 对称,则近场光斑尺寸可用二阶矩近似地表示为

$$w^2 = \frac{1}{P} \int dx dy \cdot x^2 \int d\lambda \times \rho(\lambda) |u(-x + \Delta x, y)|^2 = w_0^2 + \frac{L_{\text{eff}}^2}{d^2 \cos^2 \alpha P} \int d\lambda \times \rho(\lambda) (\lambda - \lambda_0)^2 \quad (10)$$

式中: $P$ 是入射光功率。则色散造成的光束质量退化为

$$M_{\text{SBC}}^2 = \frac{w\theta}{\lambda/\pi} = M^2 \sqrt{1 + \frac{L^2 \cos^2 \alpha}{w_0^2 d^2 \cos^4 \beta P} \int d\lambda \times \rho(\lambda) (\lambda - \lambda_0)^2} \quad (11)$$

当光谱为高光谱时<sup>[7]</sup>

$$M_{\text{SBC}}^2 = M^2 \sqrt{1 + \frac{1}{2 \ln 2} \left( \frac{L \Delta \lambda \cos \alpha}{d w_0 \cos^2 \beta} \right)^2} \quad (12)$$

与单MLD光谱合成方式一样,如果光谱线形为 Lorentz 谱,因为式(11)的积分也是发散的,我们仍将得到一个无穷大的光束质量退化。

根据式(5),对于单MLD光谱合成模式,显然,子束的发散角越小(或光束尺寸越大),则色散造成的光束质量退化越严重。而对于双MLD光谱合成模式,从式(11)可以看到,子束的光束尺寸越大,色散造成光束质量退化越小。此外,将式(11)与式(5)进行对比,可以看到当 $w_0/L < \theta_0$ 时,双MLD光谱合成模式所允许的子束二阶矩全宽要大于单MLD模式,反之亦然。受限于光栅的损伤阈值( $\sim 30 \text{ kW/cm}^2$ ),单MLD模式高功率合成时子束尺寸量级约为cm级,因此 $\theta_0 \sim 100 \mu\text{rad}$ ;而为了压缩波长间距,双MLD模式高功率合成时子束尺寸为 $1 \sim 3 \text{ mm}$ ,光栅间距量级为m级。因此可知双MLD模式所允许的子束二阶矩全宽可比单MLD模式高一个量级。考虑受激布里渊散射(SBS)的限制,双MLD模式所允许的子束输出功率要显著高于单MLD模式。但由于当前技术条件下,高衍射效率的MLD光栅基本上都是与偏振相关的,如何在保偏条件下实现高功率光纤激光输出仍是目前的技术难题。

光束通过VBG衍射实现光谱合成的过程相对MLD光栅而言要复杂得多,因为不但有色散造成的光束质量退化问题,VBG的结构还会显著影响到光束的衍射效率。

光束在VBG中的衍射过程可理解为光波被声波的弹性散射过程,满足微观能量守恒和动量守恒

$$\lambda_d = \lambda_i = \lambda, \quad \mathbf{K}_d = \mathbf{K}_i - \mathbf{K}_G \Rightarrow \sin \theta_i + \sin \theta_d = \lambda / n_{\text{av}} \Lambda \quad (13)$$

式中: $\lambda_i, \lambda_d$ 分别为入射光和衍射光的波长; $\mathbf{K}_i, \mathbf{K}_d, \mathbf{K}_G$ 分别为入射光、衍射光和光栅栅格波的波矢; $\theta_i$ 和 $\theta_d$ 分别为入射光、衍射光与VBG栅格法线的夹角; $\Lambda$ 为VBG栅格间距, $n_{\text{av}}$ 为VBG的平均折射率。通过联立能量守恒和动量守恒条件,可以得出Bragg条件

$$\mathbf{K}_i \cdot \mathbf{K}_G = |\mathbf{K}_G|^2 / 2 \quad \Rightarrow \quad \sin \theta_i = \sin \theta_d = \sin \theta_B = \lambda / 2 \Lambda n_{\text{av}} \quad (14)$$

式中: $\theta_B$ 为Bragg角。必须指出,当入射光波长或入射角不满足Bragg条件时,能量守恒条件被破坏,即 $|\mathbf{K}_i| \neq |\mathbf{K}_d|$ 。此时可以认为有一部分光的能量被衍射到其他方向。

显然式(14)和式(1)取 $m=1$ 的表达式完全相同,那么色散造成的光束质量退化可以由式(5)来描述。

利用VBG进行光谱合成与利用MLD光栅的最大区别在于:相同的色散量下,VBG的衍射带宽和分离角宽度远小于MLD光栅(图2~3)。

可以看到R-VBG在衍射谱上存在一个平坦区域,因此基于VBG的光谱合成最直接的结构是如图1(c)所示的“逐次添油”式结构。但因为带宽较窄,图1(c)中的VBG都是针对不同波长独立制备的,而且合成 $n$ 个子束需要 $n-1$ 个VBG(采用立体合成构型可以减少VBG的数量),要实现高功率激光输出,其光学结构将非常复杂。

## 2 Yb:YAG 板条激光的光谱合成技术

近年来,在高功率固体激光领域,低量子亏损的Yb掺杂材料(图4)显示出比Nd掺杂材料更大的潜力。目前,Yb:YAG薄片激光已经是产生飞秒激光的主要技术途径<sup>[13]</sup>。2018年,中国工程物理研究院应用电子学研究所研究

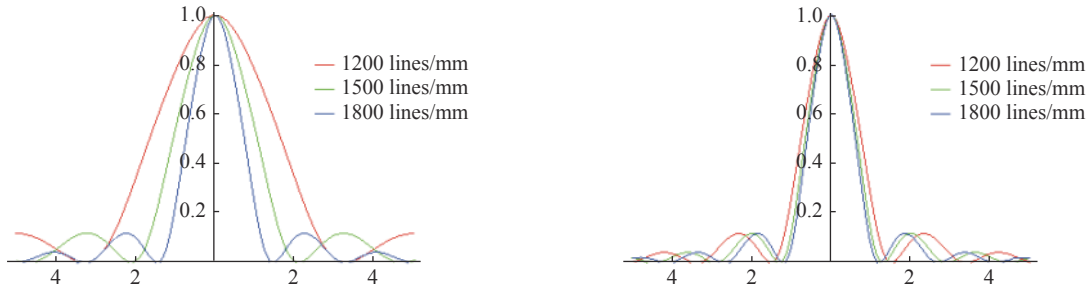


Fig. 2 Efficiency of T-VBG diffraction with different line densities change with wavelength deviation and incident angle deviation

图 2 不同刻线密度 T-VBG 衍射效率随波长偏离和入射角偏离的变化

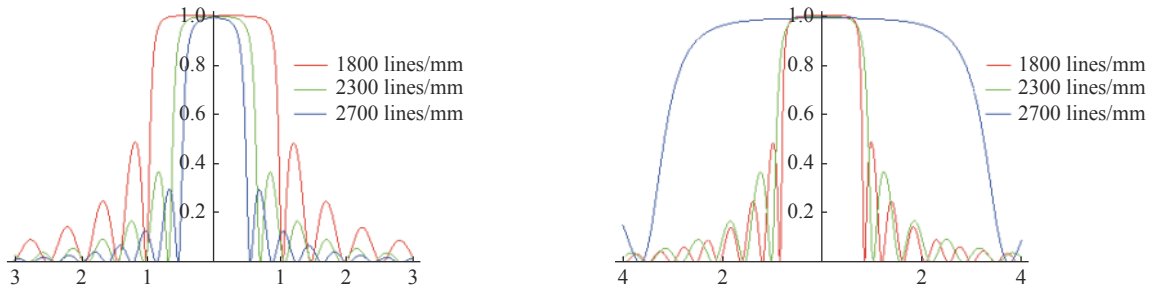


Fig. 3 Efficiency of R-VBG diffraction with different line densities changing with wavelength deviation and incident angle deviation

图 3 不同刻线密度 R-VBG 衍射效率随波长偏离和入射角偏离的变化

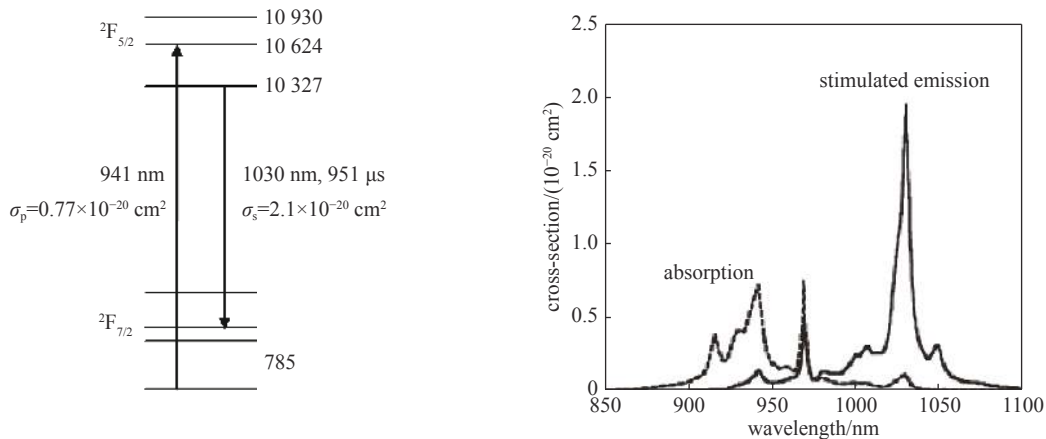


Fig. 4 Energy level structure and absorption and stimulated spectra of Yb:YAG crystal at room temperature<sup>[16]</sup>

图 4 Yb:YAG 晶体的能级结构和室温下的吸收谱和受激谱<sup>[16]</sup>

人员使用三块混合掺杂 Yb:YAG 板条组成的连续波激光放大器, 获得了 22.3 kW 的高功率激光输出<sup>[14]</sup>; 中国科学院理化技术研究所也使用板条晶体在准连续工作模式下取得非常显著的研究成果<sup>[15]</sup>。为实现更高的功率输出, 利用 Yb:YAG 晶体宽达 8 nm 的发射光谱(图 4), 使得将 Yb:YAG 激光进行光谱合束成为可能。

利用 Yb:YAG 激光进行光谱合束的方法存在一些技术上的难点。首先, 光谱合成要求子束间波长具有一定间距, 这就要求 Yb:YAG 激光在偏移其最佳增益波长时仍然具有较大的增益。室温下 Yb:YAG 晶体的饱和激光光强约为 10 kW/cm<sup>2</sup>, 因此如何保证其在偏移最佳增益波长后实现足够高的光光效率是一个难点。而且 Yb:YAG 晶体的增益谱相比 Yb 掺杂光纤要窄得多, 而受子束物理间距限制, 在较小的合成区内合成多路子激光较为困难。

为了克服这些困难, 我们设计了如图 5 所示的腔内光谱合成实验装置<sup>[17]</sup>。其中增益介质选用了尺寸为 176 mm × 33 mm × 3 mm 的双端键合 Yb:YAG 板条, 掺杂区长度为 150 mm, 采用端泵浦结构(图 6); 半导体泵浦源为两个带有快轴准直镜(FAC)的巴条面阵, 每个面阵包含两个由 30 个

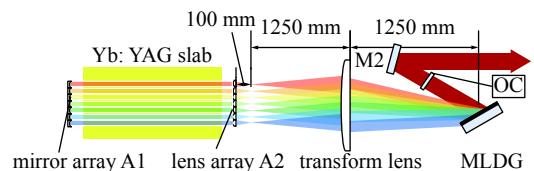


Fig. 5 Experimental scheme of spectral beam combining based on Yb:YAG slab

图 5 基于 Yb:YAG 板条的光谱合束实验方案

巴条组成的叠阵,使用准连续模式泵浦 Yb:YAG 板条,泵浦脉宽为 600  $\mu\text{s}$ ,波长为 940 nm,巴条在电流为 300 A 时的峰值功率为 300 W;注入板条的泵浦光斑尺寸为 28 mm  $\times$  2.3 mm,因此板条内泵浦光的最大强度为 22 kW/cm<sup>2</sup>。

图 5 中 A1 为 8 个曲率为 -1600 mm 的小凹面反射镜组成的阵列, A2 为 8 个焦距为 100 mm 的小凸透镜组成的阵列;为了和板条厚度(3 mm)相匹配,同时充分利用泵浦区域,每个小反射镜在光谱合成方向(板条宽度)尺寸为 2.4 mm,相邻两个小反射镜的间距  $h=2.5$  mm。变换透镜焦距  $f$  为 1250 mm,与小透镜形成 12.5 倍扩束,以避免在光栅上功率密度过高。MLD 光栅刻线密度为 1740 lines/mm,闪耀波长为 1030 nm,对应的 Littrow 角为 63.65°,衍射效率为 96%,带宽为 30 nm;光束在 MLD 上的入射和出射角分别为 69°和 60°。优化后的耦合输出镜的反射率为 78%。

虽然在图 5 的结构中存在 8 个子激光振荡器,但 A1 中有一个反射镜的光轴指向相对于其他反射镜光轴指向的偏差达到了 0.4 mrad,难以形成振荡。根据光栅方程(1),各振荡器输出激光的中心波长偏离 1030 nm 的波长偏差为

$$\delta\lambda_n = -n \frac{dh}{f} \cos \alpha, \quad n = -k + \frac{1}{2}, -k + \frac{3}{2}, \dots, k - \frac{1}{2} \quad (15)$$

取小反射镜间隔  $h$  为 2.5 mm,预计得到的光谱间隔为 0.41 nm。

实验中以频率间隔为 10 Hz、电流间隔为 20 A 依次提升泵浦功率,得到的输出功率随电流变化的曲线如图 7 所示。最终在 60 Hz, 300 A 条件下实现了 241 W 的光谱合束激光输出,对应的泵浦功率为 1300 W。最高泵浦功率时的光光效率仅约为 18.5%,这主要是由三个原因导致的:首先,泵浦阵列在达到峰值功率时对应的板条内平均泵浦光强约为 17 kW/cm<sup>2</sup>,远未达到 30 kW/cm<sup>2</sup> 的泵浦饱和光强;其次,MLD 光栅插入振荡器内部后,会产生约 8% 的往返损耗,导致输出功率出现较大下降;最后,考虑到 A1 和 A2 中小透镜和小反射镜的光束截边效应,激光束和泵浦区的交叠效率只有约 70%。

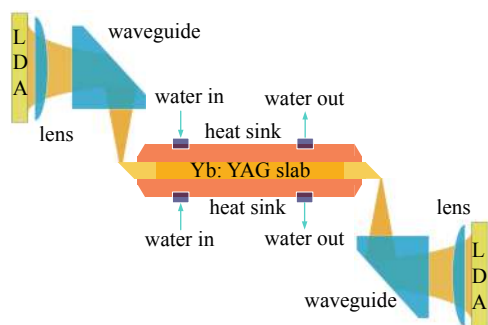


Fig. 6 Schematic diagram of Yb:YAG slab gain module

图 6 Yb:YAG 板条增益模块结构示意图

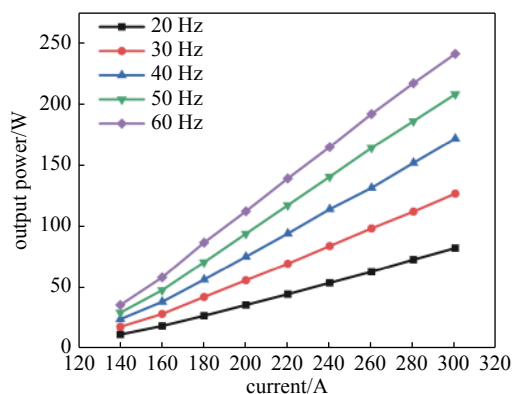


Fig. 7 Curve of beam combining power changing with the input parameters of power supply

图 7 合束功率随电源输入参数改变的曲线图

图 8 给出了利用光纤光谱仪(海洋光学 HR4000,光谱分辨率为 0.07 nm)在输出功率为 241 W 时测量到的光谱,这里给出了 3 帧随机采样的结果。从结果中可以看到,有 7 个子束形成了激光振荡,光谱间隔约为 0.38 nm,合束后整体光谱区间约为 2.3 nm,与前述理论分析相吻合。此外,还可以看到光谱分布在时域上存在抖动,但在 1029~1031.5 nm 区间,板条晶体的整体增益水平都满足要求。必须指出,因为光谱仪的分辨率为 0.07 nm,其无法测量到光谱宽度小于 0.2 nm 以下的精细光谱分布,因此图 8 中每个子峰的光谱宽度不具有参考价值。

图 9 给出了在平均输出功率为 241 W 时,用电荷耦合器件 CCD(Spiricon, LBA-FW-SCOR-20)测得的光谱合束后近场和远场的光斑分布。因为板条的宽度方向为垂直方向,MLD 的衍射方向为空间倾斜的,所以光斑分布呈现倾斜状。本文使用  $\beta$  因子来评价合成后的光束质量,其定义为:  $\beta = \theta/\theta'$ , 这里  $\theta$  为实际的光束远场发散角,  $\theta'$  为理想参考的光束远场发散角。参考光束的近场使用了图 9(a) 所示的椭圆包络,椭圆的长轴对应于光谱合成方向。计算得到合成方向和非合成方向  $\beta$  因子分别为 3.9 和 4.3,合成后总的光束质量  $\beta \approx 4.1$ 。这表明光栅色散造成的光束质量退化很小,因此子束光谱的二阶矩全宽很窄,这也是固体激光的显著优点。此外,光谱合成过程还在一定程度上抑制了高阶横模(图 9(b)),可以看到在非合成方向存在高阶横模的衍射旁瓣,使得光束质量获得一定程度

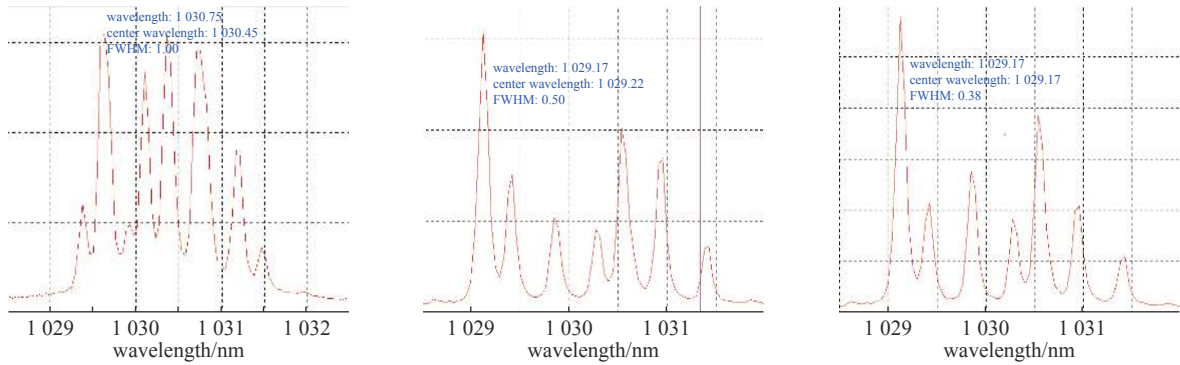


Fig. 8 Spectral measurement results of output laser after beam combining

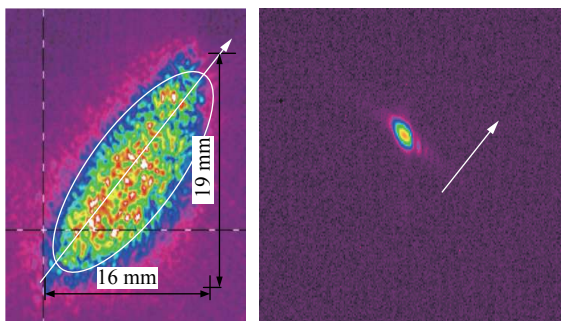
图 8 合束后输出激光的光谱测量结果

提升。

综上,在 1029~1031.5 nm 的光谱区间内, Yb:YAG 板条激光的增益水平未出现显著下降,表明大功率 Yb:YAG 板条激光具有通过光谱合束技术实现进一步提升输出功率的潜力。需要指出,因为本文只是试图对 Yb:YAG 板条激光的光谱合成可行性进行原理验证,文中的实验结构并不是优化的。较为理想的技术途径是采用多条板条放大器链路输出不同波长激光,然后再使用 MLD 光栅进行光谱合成。

### 3 半导体激光的光谱合成技术

自从 2000 年麻省理工大学 Lincoln 实验室首次提出采用光栅-外腔的方法针对半导体激光阵列的外腔光谱合束技术<sup>[18]</sup>以来,该方法受到极大地重视和关注。经过近二十年的发展,已经成为了当下发展超高亮度半导体激光的最重要技术途径。半导体激光阵列外腔光谱合成原理图如图 10 所示。



(a) near-field distribution (b) far-field distribution

Fig. 9 Near-field and far-field spot distribution of output laser after spectral beam combining

图 9 光谱合束后输出激光的近场与远场光斑分布

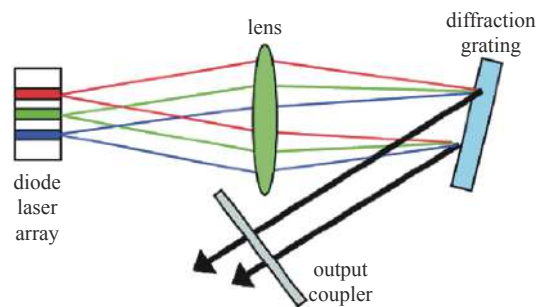


Fig. 10 Schematic diagram of external-cavity spectral beam combining of semiconductor laser array

图 10 半导体激光阵列外腔光谱合成原理图

美国的 TeraDiode 公司走在世界半导体激光光谱合成技术的前列,其于 2012 年报道了其基于 SBC 技术实现光束参量积(BPP)为 3.75 mm·mrad 的直接输出 LD 光源,输出功率可达 2030 W<sup>[19-20]</sup>,这个指标随后提高至 4000 W;美国 Alfalight 则在 2012 年报道了基于 7 个光纤耦合输出 200 W 的 SBC 模块,作为泵浦源实现了波长 1080 nm 单模连续 1 kW 近衍射极限的光纤激光输出<sup>[21]</sup>。国内开展半导体激光器光谱合束研究的主要有中科院半导体研究所、中国科学院长春光学精密机械研究所、北京工业大学、中国工程物理研究院应用电子学研究所等单位。

前述的多数技术都是针对同一个巴条上的多个发光单元,沿着巴条的慢轴方向进行光谱合成的。但使用该技术途径实现高光束质量高功率激光输出存在两个物理限制:首先,巴条上单个发光单元的输出功率的提升和光束质量存在矛盾,如果增加发光区宽度以提高单个发光点的功率,其光束质量反而会更快地下降。其次,由于“smile”效应,巴条不能太宽,这限制了通过增加发光点数量来提高合成总功率的途径。

为解决上述问题,我们提出并设计了大模场外腔半导体激光+快轴光谱合成的技术方案,如图 11 所示,其整体结构是一个立体复合外腔:LD 在慢轴方向为 5 mm 宽“mini”巴条,其上只有一个宽度 1 mm 的发光点,长度为 3 mm,前腔面镀增透膜,后腔面镀高反膜。LD 芯片的中心波长为 97x nm,后腔面与反射率 16% 的平面耦合输出镜(OC)形成外腔振荡,腔长为 500 mm,通过实现一个大基模体积的外腔振荡<sup>[22]</sup>来实现发光单元的功率和光束质量

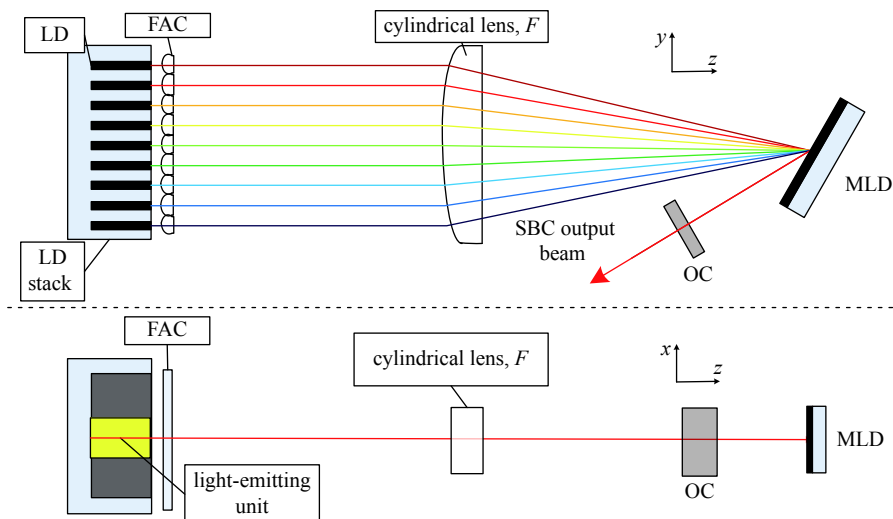


Fig. 11 Principle diagram of spectral beam combining of external-cavity semiconductor laser with large mode volume

图 11 大模体外腔半导体激光光谱合成原理图

的同步提升。在快轴方向，从 LD 芯片出射的激光经过一组微柱透镜阵列进行准直后，入射到一块焦距为 250 mm 的柱面变换透镜 F 上进行聚焦，将 MLD 光栅（刻线密度为 1800 lines/mm，衍射谱区间为 955~985 nm）放置在 F 的焦平面处对聚焦光束进行衍射，最后通过 OC 实现激光振荡和输出。由于 OC 只将在轴光束原路反射回到振荡器，不同位置的 LD 出射激光必须具有不同波长才能实现反馈振荡，因此，此方案的外腔同时实现了三个目标：慢轴方向大模场激光的产生、快轴方向的波长锁定以及快轴方向的光谱合成。

因为目前 LD 前腔面的透射膜透过率最高只能镀到 99%，一般情况下外腔谐振模式和内腔导波模式间将存在模式竞争。因此必须强调，外腔 LD 的激光动力学过程和固体激光完全不同，也和内腔 LD 存在较大差异。外腔 LD 的激光性能特征都是与 LD 芯片内部的激光动力学过程密切相关的。如图 12 所示，其物理过程可以概述为：外腔 LD 出射激光经过自由空间衍射后入射到外腔光学器件上，反射光或衍射光以某些方式沿原光路返回，再次经过自由空间衍射传输后注入 LD，激光在 LD 芯片中经过传输、增益放大、以及与内腔模式竞争过程后再次出射。经过上述过程的多次反馈振荡，外腔 LD 获得模式特征给定的输出光场。这些过程密切影响到外腔 LD 对芯片储能的提取效率及输出激光的光束质量。

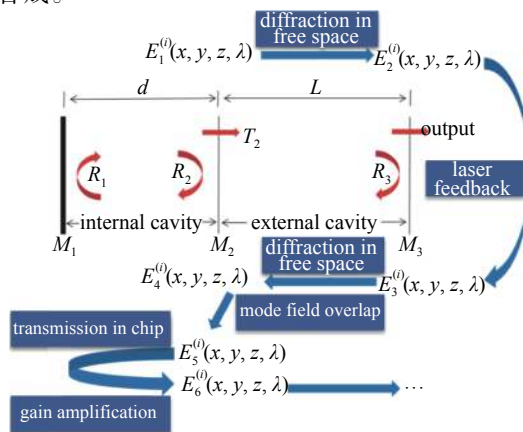


Fig. 12 Schematic diagram of physical process of external-cavity semiconductor laser

图 12 外腔半导体激光的物理过程示意图

典型准连续工况（电流为 40 A、重复频率为 160 Hz、脉宽为 500  $\mu$ s）下，实验测量到的单个芯片输出激光的典型近场光斑如图 13(a) 所示（通过漫反射屏成像），测量到的慢轴光束质量  $M^2 \approx 38.1$ （图 13(c)）。从图 13(a) 可以看到在中心很亮的外腔谐振模式两侧，出现了大发散角的内腔导波模式，这极大地影响了输出激光的光束质量。将内腔导波模式用 7 mm 宽狭缝光阑滤除后（图 13(b)），测得外腔谐振模式的功率占比约为 74%，慢轴光束质量  $M^2 \approx 11.2$ （图 13(d)），对应的  $\beta \approx 6.1$ 。与以上情况做对比，没有外腔谐振时，慢轴光束质量  $M^2 > 100$ 。因此如我们所预期，外腔半导体激光可以非常有效地改善慢轴方向的光束质量。

本文中所使用的微通道冷却器厚度为 1.8 mm，实验测量到的输出激光光谱如图 14(a) 所示，其光谱间距为 1.37 nm，与由式 (15) 给出的理论预期 1.43 nm 符合得非常好。在 CCD 上测量到的光谱合束前的近场和光谱合束后的远场分别如图 14(b)（已滤除芯片自身的内腔导波模式）和图 14(c) 所示。远场的光斑倾斜是由于各巴条间存在一定的指向不一致以及巴条与 FAC 间未能严格平行造成的。计算得到，合束后在慢轴方向  $\beta$  约为 6.3，在快轴方向  $\beta$  约 1.6，总光束质量  $\beta = 0.5(\beta_x^2 + \beta_y^2)^{1/2} \approx 3.25$ 。这表明大模场外腔半导体激光+快轴光谱合成的技术途径能够非常有效地改善半导体激光的光束质量，因此该技术在大功率直接应用方面有很大的潜力。



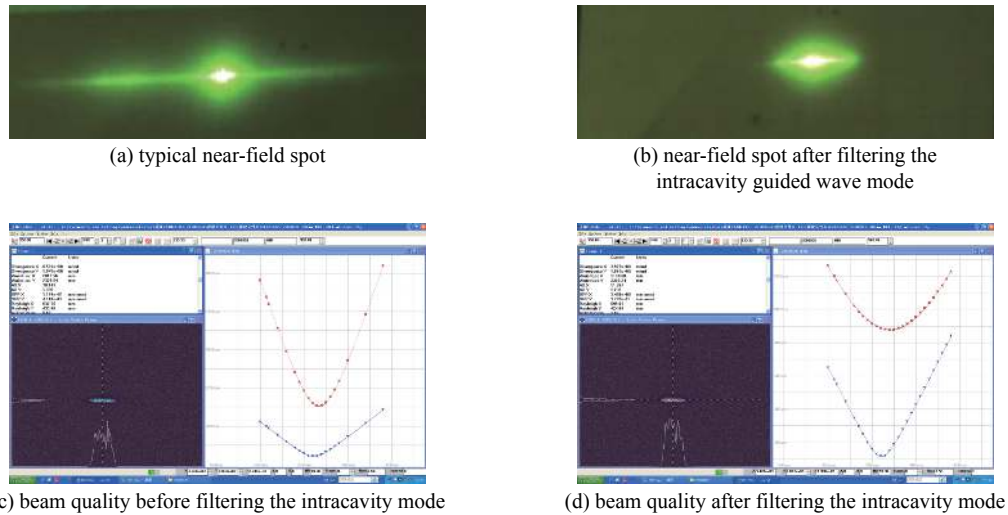


Fig. 13 The measurement of typical near-field spot and beam quality of large-mode external-cavity semiconductor laser

图 13 大模场外腔半导体激光器的典型近场光斑和光束质量测量

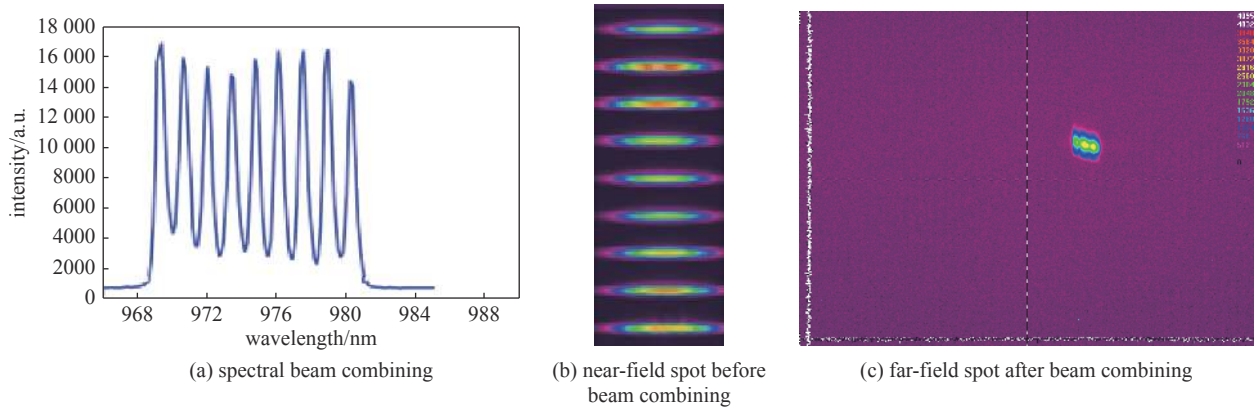


Fig. 14 Measurement of related parameters of fast-axis spectral beam combining

图 14 快轴光谱合成的相关参数测量

## 4 结论

本文对多种全固态激光中的光谱合成技术进行了探讨和研究,包括对光纤激光光谱合成中光谱线型造成的光束质量退化进行了细致物理分析,并展示和讨论了针对 Yb:YAG 板条光谱合成技术和半导体激光光谱技术的一些创新性研究的结果。

对于光纤激光,探讨了基于单个 MLD 光栅、一对 MLD 光栅、多个 VBG 三种衍射光学元件的光谱合成。建立了光栅色散造成光束质量退化的一般性物理模型,指出光束质量退化决定于子束光谱线型的二阶矩全宽、而非半高全宽,因此光谱线形对光束质量退化有显著的影响。此外,物理模型显示,对于单 MLD 光谱合成模式,子束的发散角越小(或光束尺寸越大),则色散造成的光束质量退化越严重。而对于双 MLD 光谱合成模式,子束的光束尺寸越大,色散造成光束质量退化却越小。因此双 MLD 模式所允许的子束二阶矩全宽可比单 MLD 模式高一个量级。考虑 SBS 的限制,双 MLD 模式所允许的子束输出功率要显著高于单 MLD 模式。但在当前技术条件下,高衍射效率的 MLD 光栅基本都是偏振相关的,如何在保偏条件得到足够高功率的光纤激光输出目前仍是技术难题。对于基于 VBG 的光纤激光光谱合成,因为反射式 VBG 在衍射谱上存在一个平坦区域,其最佳的结构是如图 1(c) 那样的“逐次添油”式结构。该结构合成  $n$  个子束需要  $n-1$  个 VBG(采用立体合成构型可以减少 VBG 的数量),而且不同 VBG 都是针对不同波长独立制备的,要实现高功率激光输出,其光学结构将非常复杂;进一步考虑到当前工艺水平制备的 VBG 在高功率下存在较大的热变形,高功率光纤激光光谱合成器件暂时应优选 MLD 光栅。

进一步实验演示了基于 Yb:YAG 晶体的板条激光实现光谱合成的原理可行性。通过设计一个基于 MLD 光栅振荡器内光谱合成装置,实现了 7 束 mm 级子激光最高为 241 W 光谱合成输出,合成后光束质量  $\beta$  因子约 4.1,基本达到子激光光束质量水平。实验表明,至少在 1029~1031.5 nm 光谱区间内,Yb:YAG 板条激光的增益水平未出现

显著下降,表明大功率 Yb:YAG 板条激光具有通过光谱合束技术实现功率进一步提升的潜力。

最后,针对 LD 巴条的慢轴方向进行光谱合成中,同时实现高光束质量、高功率激光输出存在彼此矛盾的物理和技术限制难题,提出并设计了大模场外腔半导体激光+快轴光谱合成的技术。该技术方案在 LD 的慢轴方向通过实现一个大基模体积的外腔振荡来实现发光单元的功率和光束质量的同步提升;在快轴方向通过外腔腔内光谱合成近一步提升功率。实验结果表明,单就慢轴方向而言,大模体积的外腔谐振将无外腔谐振时的慢轴光束质量从  $M^2 > 100$  提升至  $M^2 \approx 11.2$  ( $\beta \approx 6.1$ ),表明大模体积外腔谐振的半导体激光可以非常有效地改善慢轴光束质量。实验进一步实现了 9 个大模体积外腔 LD 芯片沿快轴方向的光谱合成,合成后的光束质量在慢轴方向  $\beta$  约为 6.3,在快轴方向  $\beta$  约 1.6,表明快轴方向光谱合成造成的光束质量退化是完全可控的。因此该技术途径能够非常有效地改善半导体激光的光束质量,在大功率直接应用方面有很大的潜力。

#### 参考文献:

- [1] Thielen P A, Ho J G, Burchman D A, et al. Two-dimensional diffractive coherent combining of 15 fiber amplifiers into a 600 W beam[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3741-3743.
- [2] Bochove E J. Theory of spectral beam combining of fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(5): 432-445.
- [3] McNaught S J, Thielen P A, Adams L N, et al. Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kW beam[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20: 0901008.
- [4] Flores A, Dajani I, Holten R, et al. Multi-kilowatt diffractive coherent combining of pseudorandom-modulated fiber amplifiers[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55: 096101.
- [5] Liu Z J, Ma P G, Su R T, et al. High-power coherent beam polarization combination of fiber lasers: progress and prospect[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A7-14.
- [6] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, et al. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[C]//Proc of SPIE. 2016: 97300Y.
- [7] Madasamy P, Jander D R, Brooks C D, et al. Dual-grating spectral beam combination of high-power fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 337-343.
- [8] 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.
- [9] Andrusyak O, Smirnov V, Venus G, et al. Spectral combining and coherent coupling of lasers by volume Bragg gratings[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 344-353.
- [10] 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.
- [11] 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: 104203. (Jiang Man, Ma Pengfei, Zhou Pu, et al. Beam quality in spectral beam combination based on the multi-layer dielectric grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65: 104203)
- [12] 周泰斗, 梁小宝, 赵磊, 等. 体布拉格光栅色散对衍射光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44: 0201019. (Zhou Taidou, Liang Xiaobao, Zhao Lei, et al. Effect of dispersion of volume Bragg grating on the quality of diffraction beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 0201019)
- [13] Südmeyer T, Kränkel C, Baer C R E, et al. High-power ultrafast thin disk laser oscillators and their potential for sub-100-femtosecond pulse generation[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2009, 97(2): 281-295.
- [14] Wang Dan, Du Yinglei, Wu Yingchen, et al. 20 kW class high-beam-quality CW laser amplifier chain based on a Yb:YAG slab at room temperature[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 3838-3841.
- [15] Guo Yangding, Peng Qinjun, Bo Yong, et al. 24.6 kW near diffraction limit quasi-continuous-wave Nd: YAG slab laser based on a stable-unstable hybrid cavity[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1136-1139.
- [16] Dong Jun, Michael B, Mao Yanli, et al. Dependence of the Yb<sup>3+</sup> emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2003, 20(9): 1975-1979.
- [17] 王小军, 杨晶, 韩琳, 等. 一种多波长非相干光谱合束板条激光振荡器: CN201910193822.9[P]. 2019-05-24. (Wang Xiaojun, Yang Jing, Han Lin, et al. A kind of multi-wavelength incoherent spectral beam-combining slab laser oscillator: CN201910193822.9[P]. 2019-05-24)
- [18] Daneu V, Sanchez A, Fan e 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.
- [19] Huang R K, Chann B, Burgess J, et al. Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO<sub>2</sub>, and solid state lasers[C]//Proc of SPIE. 2012: 824102.
- [20] Hecht J. Beam combining cranks up the power[J]. *Laser Focus World*, 2012, 48(6): 50-53.
- [21] Xiao Y, Brunet F, Kanskar M, et al. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 3296-3301.
- [22] 王小军, 宗楠, 彭钦军, 等. 一种高功率高光束质量外腔半导体激光器: CN201811197771.9[P]. 2019-11-15. (Wang Xiaojun, Zong Nan, Peng Qinjun, et al. A high power and high beam quality external cavity semiconductor laser: CN201811197771.9[P]. 2019-11-15)