

# 中国激光

## 基于自研 25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 有源光纤实现 0.25 nm, 4.23 kW 全光纤单模激光

高功率窄线宽全光纤激光器具有 GHz 量级的光谱线宽和近衍射极限的光束质量,能通过大规模阵列组束实现激光光谱合成或相干合成,进而获得高亮度激光光源。窄线宽全光纤激光器功率提升的主要限制因素是高功率光纤放大器中的非线性效应[受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)等]和热致模式不稳定(TMI)效应。在数十 GHz 量级的光谱线宽下,有效提升非线性效应阈值(特别是 SBS 阈值)和 TMI 阈值是现阶段的研究重点。2019 年,中国科学技术大学、中国工程物理研究院和清华大学联合报道了利用商用 25  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  有源光纤实现了波长为 1064 nm、光谱线宽为 0.3 nm 的 3.7 kW 激光输出, $x$ 、 $y$  方向的光束质量为  $M_x^2 = 1.358$ ,  $M_y^2 = 1.202$ 。2020 年,中国工程物理研究院实现了波长为 1030 nm、线宽为 0.18 nm 的 3 kW 激光,光束质量  $M^2 = 1.17$ 。2021 年,中国工程物理研究院报道,采用国产有源光纤(模场面积为 320  $\mu\text{m}^2$ )和 915 nm 泵浦光实现的 1064 nm 全光纤激光器的输出功率为 5.07 kW, 3 dB 线宽为 0.37 nm,  $M_x^2 = 1.252$ ,  $M_y^2 = 1.322$ 。国防科技大学采用传统 20  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  有源光纤实现了波长为 1071 nm、功率为 4.92 kW 激光,线宽为 0.59 nm,  $M^2 = 1.22$ 。

为了有效提升非线性效应和 TMI 阈值,研制新型大模场有源光纤及设计和优化种子激光光谱调控方案显得十分重要。增加有源光纤的模场面积能有效提升非线性效应阈值,然而支持过多的横模会导致 TMI 阈值降低,因此需要对光纤芯径和数值孔径(NA)进行系统设计,以平衡非线性效应和 TMI 效应。采用相位调制光谱调控技术调节单频种子输出光谱的线宽和线形,能有效压窄输

出激光的光谱线宽,同时有效抑制 SRS 和 SBS,提升激光功率。

近期,中国科学院上海光学精密机械研究所利用自主研制的低数值孔径 25  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  有源光纤和优化后的种子光谱调控方案,实现了中心波长为 1050.5 nm 的 4.23 kW 全光纤单模激光输出,输出激光的光谱线宽(半峰全宽)被压窄至 0.25 nm。该激光器采用 1050 nm 单频半导体激光作为种子源,利用多级相位调制对激光光谱进行展宽和线形优化,然后利用三级预放输出  $\sim 15$  W 激光,光谱信噪比高达 50 dB,激光功率的时域特性稳定, SRS 和 SBS 得到有效抑制。主放大器采用 976 nm 波长锁定 LD 进行双端泵浦,优化正反向泵浦比例约为 2:3,降低了 SBS 效应,有效提升了 TMI 阈值。增益光纤采用自主设计的非保偏 25  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  掺 Yb 光纤,通过调节掺杂浓度,NA 降低至 0.051,吸收系数为  $\sim 0.42$  dB/m(@ 915 nm);同时利用仿真和实验测试优化了弯曲半径,有效抑制了高阶模产生,提升了 TMI 阈值,优化后有源光纤的盘绕半径为 60 mm。当泵浦功率为 5005.8 W 时,输出激光功率为 4230 W,光光转换效率(optical-to-optical efficiency)达到 84%,后向 Stokes 光功率为 573 mW,回光反射率远小于 0.1%,如图 1(a)所示。图 1(b)显示了在最高功率下测量的激光  $M^2 = 1.15$ ,同时使用高速光电探测器(带宽为 150 MHz)监测前向激光的时域信号,没有观察到 TMI 现象,如图 1(d)所示。在整个放大过程中,激光光谱没有展宽现象。图 1(c)、(d)显示,最高功率下输出激光的光谱线宽为 0.25 nm(分辨率为 0.02 nm),均方根(RMS)线宽为 0.16 nm,信噪比高达 43 dB,20 dB 线宽(0.90 nm)内的能量集中度为 99.2%。

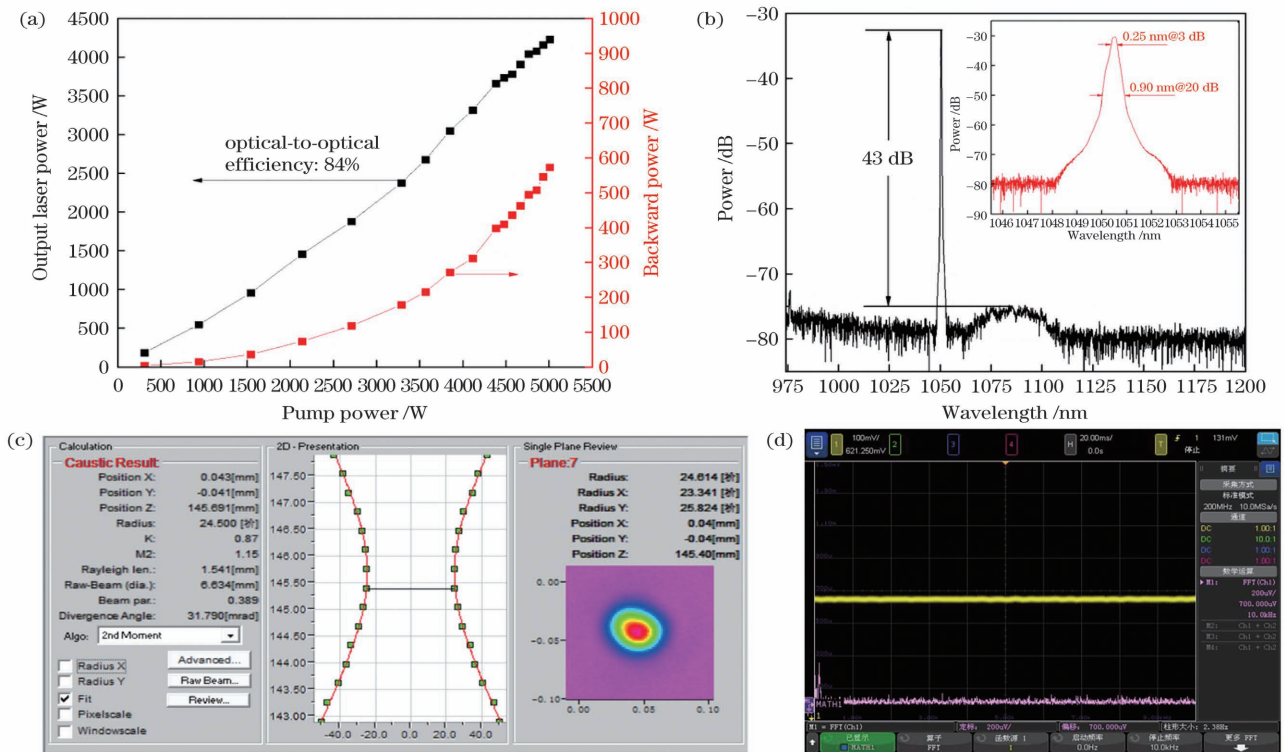


图 1 4.23 kW 光纤激光的测试结果。(a)输出激光功率和后向回光功率随泵功率的变化曲线;(b)输出激光的光谱线宽和信噪比;(c)最高功率下输出激光的光束质量;(d)最高功率下前向输出激光的时域信号(上)和频谱图(下)

Fig. 1 Measurement results of fiber laser with power of 4.23 kW. (a) Output and backward light powers versus pump power; (b) spectral linewidth and signal-to-noise ratio of output laser; (c) beam quality of output laser at maximum power; (d) signal in time domain (upper) and spectrum (lower) of forward output laser at maximum power

沈辉<sup>1,3</sup>, 张磊<sup>2,3</sup>, 李秋瑞<sup>1</sup>, 陈晓龙<sup>1</sup>, 刘恺<sup>1</sup>, 全昭<sup>1</sup>, 刘美忠<sup>1,3</sup>, 尤阳<sup>1,3</sup>, 漆云凤<sup>1,3\*</sup>,  
于春雷<sup>2,3\*\*</sup>, 孟俊清<sup>1,3</sup>, 何兵<sup>1,3</sup>, 周军<sup>1,3</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>中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800;

<sup>3</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

通信作者: \*dreamer\_7@siom.ac.cn; \*\*sdyclcy@163.com

收稿日期: 2022-03-02; 修回日期: 2022-03-16; 录用日期: 2022-04-02