

## 高功率全光纤中红外超连续谱激光器

高功率中红外超连续谱激光在环境监测、测绘计量、国防安全等领域中有重要的应用,是近年来中红外激光领域的研究热点之一。光纤光源泵浦的高功率中红外超连续谱激光器具有结构紧凑、光束质量高、输出功率高等优点。自 2009 年美国密歇根大学首次在氟化物光纤中实现平均功率为 10.5 W 的中红外超连续谱激光以来,中红外光纤超连续谱激光器的输出功率不断提升。尽管如此,受限於高功率泵浦光耦合和氟化物光纤端面损伤问题,中红外超连续谱激光的功率提升仍然较慢,且随着中红外超连续谱激光平均功率的提升,保持较长的光谱长波边( $\sim 4 \mu\text{m}$ )越来越困难。2014 年,北京工业大学报道了平均功率为 21.8 W 的中红外超连续谱,对应的光谱长波边约为  $3.8 \mu\text{m}$ ;2019 年,国防科技大学研制的中红外超连续谱激光功率突破了 30 W,对应的光谱长波边约为  $3.35 \mu\text{m}$ 。

为了兼顾中红外超连续谱激光的平均功率和带宽,在保持较大光谱宽度的同时实现高功率输出,近期国防科技大学采用石英光纤基高平均功率  $2.0\sim 2.5 \mu\text{m}$  超连续谱激光泵浦 ZBLAN( $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ ,

氟化物多组分玻璃的一种)光纤的技术方案,实现了平均功率超 40 W、光谱范围近  $4 \mu\text{m}$  的高功率中红外超连续谱激光输出。该研究的实验装置示意图如图 1 所示。使用的  $2.0\sim 2.5 \mu\text{m}$  超连续谱激光的种子源为一个  $1.5 \mu\text{m}$  电调制分布布拉格反馈激光二极管,输出脉冲宽度为纳秒量级、脉冲重复频率为 MHz 量级,平均功率为数十毫瓦。种子脉冲经铒镱共掺光纤放大器(EYDFA)放大,平均功率达到瓦量级。激光脉冲在单模石英光纤(SMF)中发生脉冲分裂的同时实现了光谱非线性展宽,获得了光谱范围为  $1.5\sim 2.2 \mu\text{m}$  的超连续谱种子激光。利用该种子激光在掺铥光纤放大器(TDFA)中实现了功率放大和光谱预展宽,获得了  $2.0\sim 2.5 \mu\text{m}$  波段的超连续谱激光脉冲。最后,通过熔接方式将该  $2.0\sim 2.5 \mu\text{m}$  波段激光脉冲耦合进一段长为 20 m 左右、纤芯直径为  $13.5 \mu\text{m}$ 、数值孔径(NA)为 0.23 的 ZBLAN 光纤中,其在 ZBLAN 光纤中产生剧烈的非线性效应,在拉曼孤子自频移等非线性作用的主导下,光谱长波边拓展至  $3 \mu\text{m}$  以上。为防止高功率条件下光纤输出端面发生损伤,在 ZBLAN 光纤输出端制备了多模  $\text{AlF}_3$  光纤端帽。

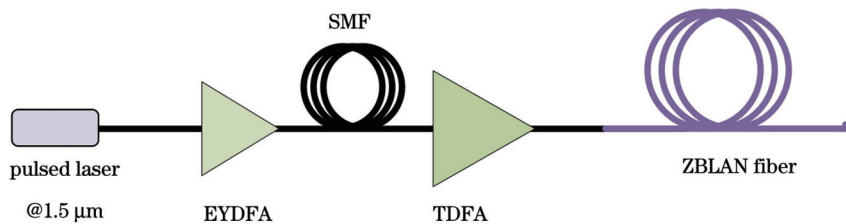


图 1 高功率中红外超连续谱激光实验装置示意图

Fig. 1 Experimental diagram setup of high power mid-infrared supercontinuum laser

中红外超连续谱激光的光谱和输出功率随泵浦功率的变化分别如图 2(a)、(b)所示。当  $2.0\sim 2.5 \mu\text{m}$  波段超连续谱激光功率(即 ZBLAN 非线性光纤的泵浦激光功率)为 55.5 W 时,输出的中红外超连续谱激光的平均功率为 40.1 W,光谱覆盖范围为  $1.90\sim 3.95 \mu\text{m}$ ,从 TDFA 输出光到 ZBLAN 光纤输出的超连续谱激光的

功率转换效率为 72.2%。对超连续谱激光光束的典型近场光斑进行了测量,强度呈近高斯分布,如图 2(a)中的伪彩色插图所示。目前,功率的进一步提升受到 ZBLAN 光纤端帽损伤的限制。下一步将优化实验装置,如通过在光纤端面镀膜等来提高光纤端面的损伤阈值,进一步提升超连续谱激光器的输出功率。

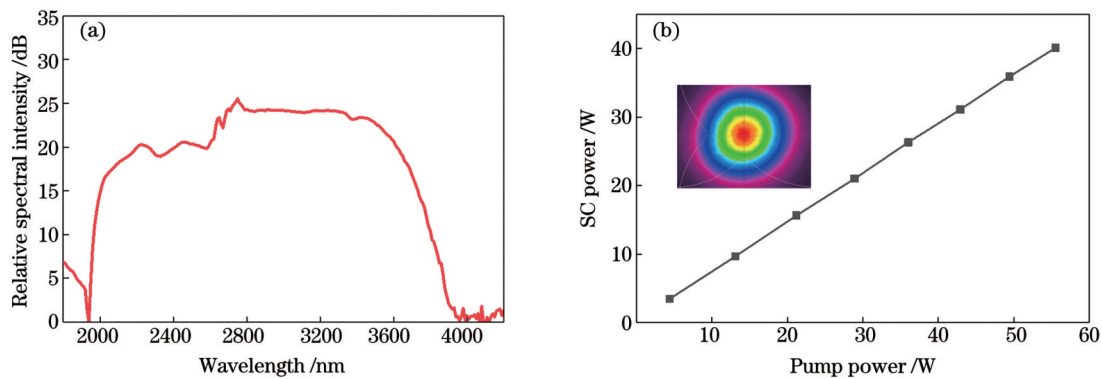


图2 高功率中红外超连续谱激光实验结果。(a)输出功率为40.1 W时的光谱;(b)输出功率随泵浦功率的变化,插图为超连续谱激光的典型近场光斑轮廓

Fig. 2 Experimental results of high power mid-infrared supercontinuum laser. (a) Spectrum when output power is 40.1 W; (b) output power versus pump power with typical near-field beam profile of supercontinuum laser shown in inset

杨林永<sup>1,2,3\*</sup>, 朱晰然<sup>1</sup>, 张斌<sup>1,2,3</sup>, 侯静<sup>1,2,3\*\*</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

<sup>2</sup>国防科技大学南湖之光实验室, 湖南长沙 410073;

<sup>3</sup>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

通信作者: \*yang\_linyong@foxmail.com; \*\*houjing25@sina.com

收稿日期: 2023-04-04; 修回日期: 2023-04-26; 录用日期: 2023-05-08; 网络首发日期: 2023-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(62205374)