

中国激光

基于拉曼光纤激光泵浦的高功率掺镱光纤激光

900 nm 波段光纤激光在成像、通信和传感等领域被广泛应用。此外,其作为掺镱光纤激光的新型泵浦源,在泵浦亮度提升和非线性效应抑制等方面具有显著优势:一方面,相较于 900 nm 半导体激光器,光纤激光器具有更高的亮度,能够显著提升泵浦效能;另一方面,镱离子在 900 nm 处具有更强的吸收,这有助于控制增益光纤长度,从而有效抑制非线性效应。目前,900 nm 波段激光的获取主要依赖于掺镱光纤激光以及掺铈光纤激光。然而,受限于掺稀土离子光纤激光中的能级跃迁竞争,该类激光器的最大输出功率仅为百瓦量级。近日,国防科技大学研究团队通过将特殊设计的高亮度半导体激光器作为泵浦源,构建了全光纤结构的拉曼激光器,成功获得了数百瓦功率量级的 900 nm 波段高亮度激光。在此基础上,该团队将该拉曼激光作为泵浦源,实现了高功率掺镱光纤激光输出。

该研究不仅为 900 nm 波段高亮度激光输出功率提升提供了新途径,还首次展示了一种以拉曼激光器作为泵浦实现高功率掺镱光纤激光输出的新方案。这一创新性方案极具应用前景,有望在掺镱光纤激光系统泵浦效能方面实现数量级提升。

基于拉曼激光泵浦的高功率掺镱光纤激光系统由拉曼光纤振荡器以及掺镱光纤振荡器两部分组成,其结构如图 1(a)所示。拉曼振荡器采用了具有创新设计的高亮度多波长半导体激光泵浦方案,其输出波长含有多个波峰,分别为 912、915、918、924、927 nm。通过结合包括多模光纤光束净化以及谐振腔选模在内的多种亮度增强技术,拉曼激光亮度得到了有效提升。拉曼光纤振荡器的最大输出功率为 315 W,中心波长为 954 nm,最高功率下的光束质量因子 $M^2=2.45$,输出光谱如图 1(b)所示。

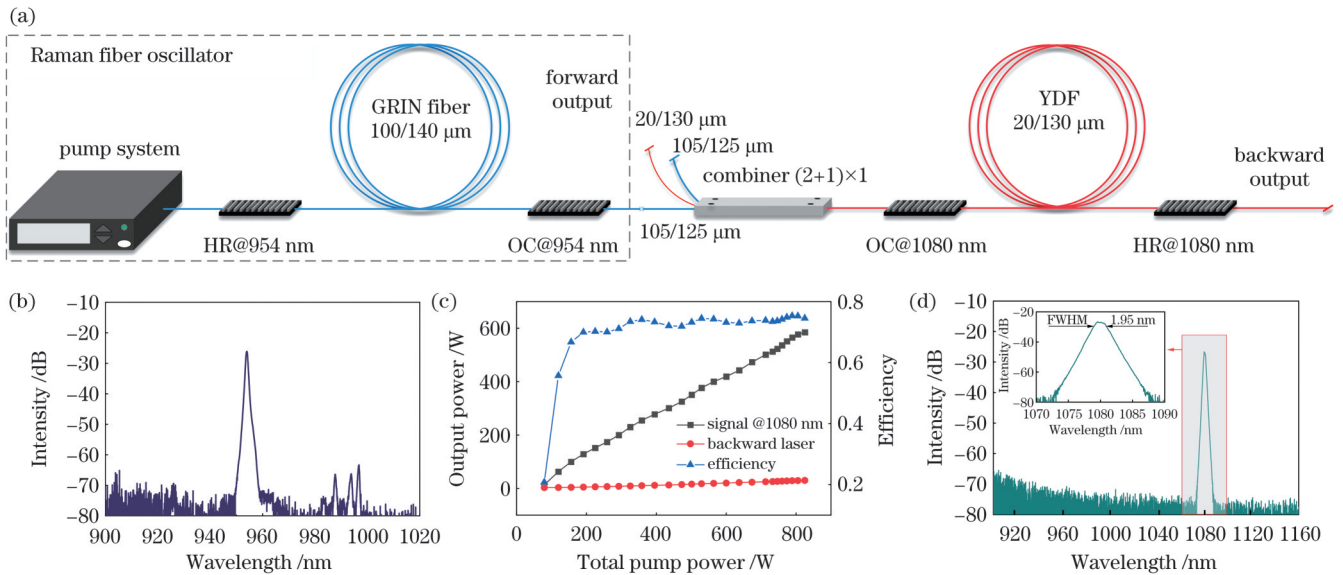


图 1 光纤激光器实验结构示意图与输出特性。(a)基于拉曼光纤激光器泵浦的掺镱光纤激光系统;(b)拉曼光纤振荡器的输出光谱;(c)掺镱光纤激光器输出功率演化;(d)最高功率下掺镱激光器的输出光谱

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental structure and output characteristics of the fiber laser. (a) Ytterbium-doped fiber laser pumped by Raman fiber laser; (b) output spectrum of the Raman fiber oscillator; (c) output power evolution of the ytterbium-doped fiber laser; (d) output spectrum of the ytterbium-doped fiber laser at maximum power

进一步,本团队将该高亮度拉曼激光作为掺镱振荡器的泵浦源。为了验证其卓越的抗回光能力,采用了后向泵浦方式。具体来说,泵浦光通过(2+1)×1后向泵浦信号合束器的单根泵浦臂(105/125 μm)进行注入。需要指出的是,拉曼激光器中的剩余泵浦光

同样可以作为 1080 nm 掺镱激光的泵浦源,从而提升整个激光系统的效率。本实验表明,至少可以向 105 μm 纤芯的多模光纤中注入超过 300 W 的 954 nm 波段高亮度激光,大大超过了当前常见的半导体激光泵浦能力。而且,954 nm 波段激光的光束质量因子

$M^2=2.45$, 远高于 $105\ \mu\text{m}$ 纤芯多模光纤可以支持的数值, 这表明可以继续提高其泵浦能力。

将长度为 $16\ \text{m}$ 、纤芯/包层直径为 $20/130\ \mu\text{m}$ 的掺镱光纤作为增益介质, 同时, 将一对中心反射波长为 $1080\ \text{nm}$ 的光纤布拉格光栅作为谐振腔, 搭建了全光纤结构的掺镱光纤振荡器。其输出功率演化如图 1(c) 所示。当最大注入泵浦功率为 $825\ \text{W}$ 时, 激光器的前后向总输出功率为 $615\ \text{W}$ 。其中: 前向输出均为信号光, 功率为 $585\ \text{W}$; 后向输出功率为 $30\ \text{W}$, 包括信号光

功率 $22.2\ \text{W}$ 和剩余泵浦光功率 $7.8\ \text{W}$ 。通过计算可得激光器的转换效率为 73.6% 。最大功率下激光器的前向输出光谱如图 1(d) 所示, 其 $3\ \text{dB}$ 线宽为 $1.95\ \text{nm}$ 。得益于镱离子在 $900\ \text{nm}$ 波段的高吸收, 光谱中未观测到剩余泵浦光和拉曼光成分。

鉴于拉曼光纤激光器具有波长灵活的优势, 下一步工作将致力于通过该方案实现其他波段(如 $980\ \text{nm}$ 和 $1018\ \text{nm}$ 等)的高亮度激光输出, 并进一步探索其作为高亮度泵浦源的潜力以及在其他领域的应用潜力。

范晨晨¹, 姚天甫^{1,2,3*}, 李阳¹, 郝修路¹, 冷进勇^{1,2,3}, 周朴^{1**}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073;

³国防科技大学高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

通信作者: *yaotianfumary@163.com; **zhoupu203@163.com

收稿日期: 2024-12-24; 修回日期: 2025-01-15; 录用日期: 2025-01-15; 网络首发日期: 2025-01-21