

## 基于部分掺杂光纤的 5 kW 高光束质量光纤激光放大器

吴函烁, 李瑞显, 肖 虎, 黄良金, 杨 欢, 潘志勇, 冷进勇, 周 朴

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

近年来, 光纤激光器和放大器由于其结构紧凑、输出功率高、光束质量好等优势, 获得了广泛关注和迅速发展。随着光纤激光输出功率的不断提升, 光纤中的非线性效应, 如受激拉曼散射、受激布里渊散射等, 成为了限制功率进一步提升的主要因素。为了提高非线性效应阈值, 提高输出功率, 最直接的方式便是使用大芯径光纤。然而随着光纤模场面积增大, 光纤内支持的模式数量增加, 导致输出激光的光束质量变差。为了兼顾高功率和高光束质量激光输出, 研究人员对光纤设计进行了探索, 并提出了一系列光纤设计方案, 如低数值孔径大模场光纤、锥形光纤、部分掺杂光纤等。其中部分掺杂光纤中掺杂区域只占纤芯的一部分, 与掺杂区域重合度高的模式有利于获得更高增益, 进而形成对该模式的选择性输出。部分掺杂光纤将光纤本身的导波功能和增益特性分离, 增强了光纤设计的灵活性, 对于获取特定模式的激光输出具有重要意义。

国内外多家单位针对部分掺杂光纤开展了一系列研究工作。2016 年, 藤仓公司通过采用模场面积  $400 \mu\text{m}^2$  的部分掺杂光纤, 利用 915 nm 激光二极管 (Laser Diode, LD) 双向泵浦实现了 2 kW 的激光振荡器输出, 光束质量因子 ( $M^2$ ) 为 1.2; 次年, 该公司将输出功率进一步提升至 3 kW ( $M^2=1.3$ )。2018 年, 华中科技大学研制了纤芯和内包层直径分别为 35/400  $\mu\text{m}$  的部分掺杂光纤, 纤芯掺杂比例为 71.4%, 并基于该光纤实现了输出功率数瓦的 1080 nm 激光振荡器以及输出功率 ~450 W 的 1080 nm 激光放大器 ( $M^2\approx 1.5$ )。同年, 新加坡 DSO 国家实验室采用纤芯掺杂比例为 75% 的 42/250  $\mu\text{m}$  部分掺杂光纤搭建光纤放大器, 利用 1018 nm 激光泵浦, 实现了 4.1 kW 的 1060 nm 激光输出 ( $M^2=1.59$ )。2019 年, 华中科技大学研制了纤芯/内包层直径为 33/395  $\mu\text{m}$  的 Yb/Ce 共掺杂部分掺杂光

纤, 纤芯掺杂比例约为 70%, 基于该光纤搭建光纤放大器并使用 976 nm LD 泵浦实现了 1.39 kW 的 1080 nm 激光输出, 输出功率 1.2 kW 时  $M^2\approx 1.43$ 。此外, 通过使用该光纤搭建光纤激光振荡器, 利用 915 nm LD 反向泵浦实现了 3.14 kW 的 1081 nm 激光输出, 实验中未观测到模式不稳定以及受激拉曼散射效应, 但光束质量未表征。2020 年, 中国电子科技集团第四十六研究所研制了掺杂/纤芯/内包层直径分别为 20/30/400  $\mu\text{m}$  的部分掺杂光纤, 基于该光纤搭建光纤放大器, 并使用 976 nm LD 前向泵浦, 实现了 2.4 kW 的 1080 nm 激光输出 ( $M^2\approx 1.32$ )。2021 年, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心使用掺杂/纤芯/内包层直径分别为 18/30/400  $\mu\text{m}$  的部分掺杂光纤搭建光纤放大器, 通过采用 915 nm 和 976 nm LD 反向混合泵浦, 实现了 3.57 kW 的 1063.7 nm 窄线宽激光输出 ( $M_x^2\approx 1.942$ ,  $M_y^2\approx 1.774$ ), 该功率为目前国内公开报道的基于部分掺杂光纤实现的最高输出功率。

近期, 国防科技大学基于自主设计研制的高掺杂浓度部分掺杂光纤实现了 5 kW 的高功率高光束质量激光输出。部分掺杂光纤的纤芯、包层直径分别为 40  $\mu\text{m}$  和 250  $\mu\text{m}$ , 其纤芯中央部分掺杂直径约为 30  $\mu\text{m}$ , 在 1018 nm 处的吸收系数约为 0.8 dB/m。实验结构如图 1 所示, 种子激光为中心波长 1080 nm 的百瓦级单模光纤激光器, 泵浦源为两台三千瓦级的 1018 nm 光纤激光模组, 信号光以及泵浦光通过 (6+1)×1 合束器注入部分掺杂光纤, 放大后的激光经过包层模滤除器后通过端帽输出。

种子信号光注入功率约为 100 W, 在泵浦功率为 5986 W 时, 信号光被放大到 5075 W, 斜效率为 83.11%, 最大功率下输出光谱未见明显拉曼光成分, 不同泵浦功率下的输出功率以及各输出功率下的光谱如图 2 所示, 输出功率进一步提升受限于泵浦功率。

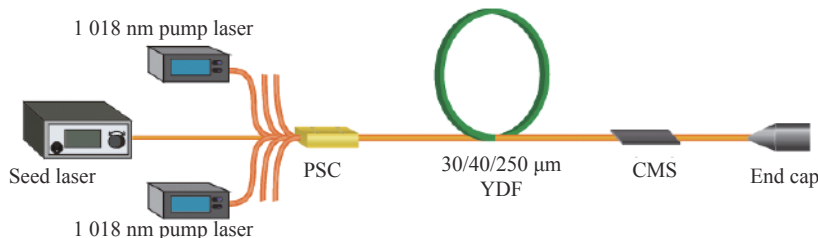


图 1 部分掺杂光纤放大器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of the confined-doped fiber amplifier (PSC: pump and signal combiner; YDF: ytterbium-doped fiber; CMS: cladding mode stripper)

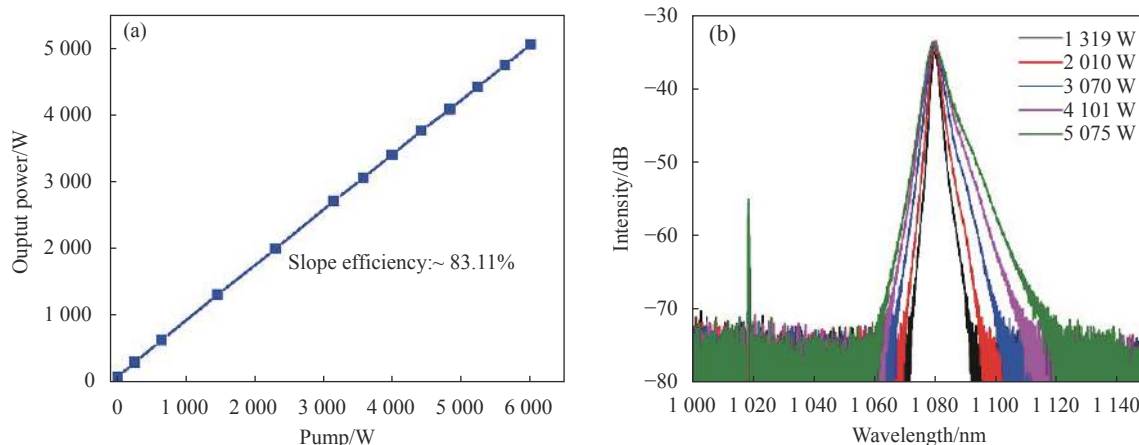


图 2 (a) 输出功率随泵浦功率变化曲线; (b) 不同功率下的输出光谱

Fig.2 (a) Output power versus the pump power; (b) output spectra under different output powers

利用通用光束质量测量仪测得种子激光经过放大器后的光束质量因子  $M^2=1.7$ , 在不同输出功率下光束质量因子及光斑形态如图 3 所示, 最大输出功率时  $M^2=1.89$  (与功率放大前光束质量因子  $M^2=1.7$  相比, 放大功率过程中光束质量因子基本保持)。

该工作证明了大模场部分掺杂光纤在高功率光纤激光器中模式控制以及拉曼效应抑制方面的优势, 为获得更高功率的高光束质量光纤激光器提供技术支持。

**致谢** 感谢国家自然科学基金项目 (62035015)、湖南省创新研究群体项目 (2019JJ1005) 等对文中工作的支持; 感谢肖亮、宋家鑫、何加威、周聪等在实验过程中的支持和帮助。

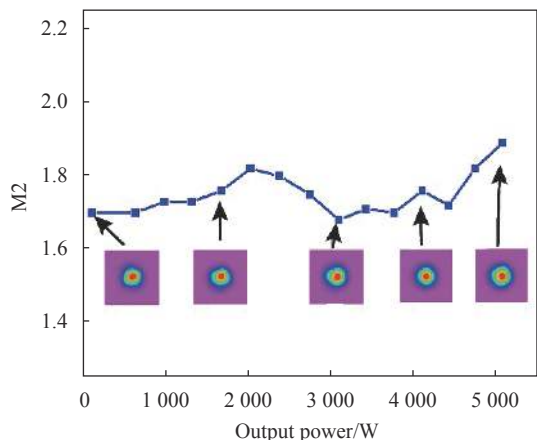


图 3 不同输出功率时的光束质量因子及光斑形态

Fig.3 Beam quality factors and beam profiles under different output powers