

光学学报

高功率高光束质量级联泵浦掺镱光纤激光器研究进展

肖虎^{1,2}, 李瑞显^{1,2}, 吴函烁^{1,2}, 黄良金^{1,2}, 陈子伦^{1,2}, 杨欢^{1,2}, 闫志平^{1,2}, 王蒙^{1,2}, 潘志勇^{1,2},
王泽锋^{1,2*}, 周朴^{1**}, 陈金宝^{1,2***}

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

摘要 级联泵浦方案具有泵浦光亮度高、量子亏损小、光纤热负荷低、模式不稳定阈值高等优势,是获得高功率光纤激光的主要技术方案。目前,万瓦级高光束质量光纤激光的实现在非线性效应抑制和模式控制等方面遇到困难。本文介绍了国防科技大学近年来在高光束质量级联泵浦光纤激光器方面的研究进展,并对功率和光束质量进一步提升的可行途径进行了分析。

关键词 高功率光纤激光器; 级联泵浦; 受激拉曼散射; 光束质量

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS230991

1 引言

掺镱光纤激光器(YDFL)具有光束质量好、转换效率高、热管理方便、结构紧凑等特点,近年来在科研、工业领域得到了广泛应用^[1-3]。得益于掺镱光纤(YDF)、光纤器件和半导体激光器(LD)制造工艺水平的不断提升,YDFL的输出功率快速增长。目前,YDFL单纤最高输出功率已达 20 kW^[4-7],经功率合束的光纤激光系统最高功率已突破 100 kW^[8]。根据泵浦方案,可将高功率 YDFL 分为 LD 泵浦和级联泵浦两类。LD 泵浦方案通常使用高功率 9XX nm LD 泵浦 YDF,直接产生 1060~1090 nm 波段的高功率激光,具有结构简单、转换效率高等优势,是目前工业用光纤激光器的主要技术方案。级联泵浦方案最初是为了解决 LD 功率和亮度不足对光纤激光器输出功率的限制问题^[9-10]。受限于 LD 亮度,2010 年前,LD 直接泵浦的 YDFL 最高功率一直停留在 kW 水平。级联泵浦的 YDFL 通常以光纤激光泵浦 YDF,即先以 LD 泵浦 YDF 产生短波长激光(1020 nm 附近),再以多台短波长光纤激光器为泵浦源进行第二次泵浦,产生 1060~1090 nm 波段的激光^[11]。由于光纤激光的亮度远高于 LD,以光纤激光为泵浦源可显著提升 YDFL 的泵浦功率,从而有效解决 YDFL 功率提升受限于可注入泵浦功率的问题。2009 年,美国 IPG 公司基于级联泵浦方案实现了 10 kW 单模光纤激光输出^[11],使单模光纤激

光器功率实现了从千瓦到万瓦级的跨越,在国际高功率光纤激光领域引起了巨大轰动。

与 LD 泵浦相比,级联泵浦方案不仅具有更高的泵浦光亮度,还具有量子亏损小、光纤热负荷低、横向模式不稳定(TMI)阈值高等优势^[12-15],更有利于实现高功率光纤激光输出,因此引起了国内外研究者的广泛关注。国外的耶拿大学^[1]、克莱姆森大学^[16-17]、DSO 实验室^[18-19],国内的国防科技大学^[20-21]、清华大学^[22]、中国工程物理研究院^[23-25]和中国科学院上海光学精密机械研究所^[26]等都开展了级联泵浦高功率 YDFL 研究。作为级联泵浦 YDFL 的泵浦源,高功率、高亮度的 1018 nm 光纤激光器是实现高功率级联泵浦 YDFL 的基础。1018 nm 位于镱离子增益谱的边缘,相比 1030~1080 nm 波段,其实现高功率激光输出的难度更大^[27]。经过国内外学者的系统研究,目前已攻克 1018 nm 高功率光纤激光器的关键技术。通过增加光栅反射率^[28]、增大 YDF 的纤芯/包层比^[29]、缩短 YDF 长度^[30-31]和减小光纤端面反馈^[12,32]等方法,可有效降低 1030~1080 nm 波段放大自发辐射(ASE)的净增益,实现 1018 nm 激光器的高效、稳定运行。目前 1018 nm 光纤激光器的最高输出功率已突破 1 kW^[33],经功率合束后的 1018 nm 光纤激光输出功率已大于 5 kW(输出光纤芯径为 100 μm,数值孔径 NA=0.22)^[34]。1018 nm 激光的功率和亮度已满足数万瓦级联泵浦光纤激光器对泵浦光功率的需求^[10]。近年来,中国工程

收稿日期: 2023-05-16; 修回日期: 2023-07-10; 录用日期: 2023-07-22; 网络首发日期: 2023-08-02

通信作者: *zefengwang_nudt@163.com; **zhoupu203@163.com; ***kdchenjinbao@aliyun.com

物理研究院^[4-5]和国防科技大学^[6]相继报道了 20 kW 级联泵浦的 YDFL, 充分表明了级联泵浦方案的功率提升能力。但是, 在激光功率增长的同时保持良好的光束质量仍面临挑战。事实上, 目前 LD 泵浦和级联泵浦的高光束质量 YDFL 在功率提升方面均受到受激拉曼散射(SRS)和 TMI 效应的共同制约, 其中级联泵浦方案受 SRS 的制约更为突出。由于镱离子在 1018 nm 附近的吸收系数极低^[1,35](约为 976 nm 吸收系数的 1/15), 通常需要大幅增加 YDF 长度或增大纤芯面积来确保泵浦光充分吸收。光纤长度的增加导致 SRS 阈值降低, 而增大纤芯面积则导致 TMI 阈值下降, 光束质量控制和保持更为困难。以文献[4-7]报道的 20 kW 光纤激光器为例, 为抑制 SRS, 均采用了纤芯直径约为 50 μm 的超大芯径光纤来增大模场面积^[4-7], 但输出激光也因纤芯直径较大而难以实现单模或近单模。受限于 TMI 和 SRS, 高光束质量光纤激光功率提升极为缓慢。文献[36]详细总结了近年来国内外高光束质量 YDFL 的功率提升趋势, 除 IPG 外, 目前国内外单模光纤激光功率仍未突破 10 kW。图 1 列出了国内外近年来高光束质量 ($M^2 < 2$) 激光的最高功率^[36]。对于级联泵浦的高光束质量 YDFL, 受限于 SRS 和 TMI, 其最高输出功率长期停留在 5 kW 量级。

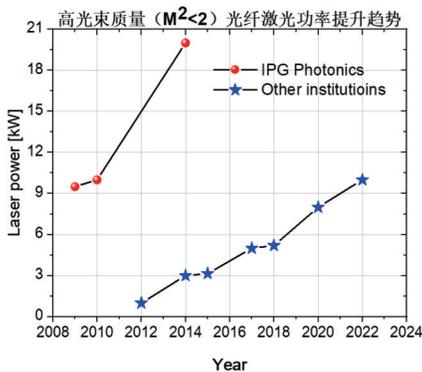


图 1 高光束质量 YDFL 功率提升趋势^[36]

Fig. 1 Power evolution of YDFL with high beam quality^[36]

文献[20, 22, 35]已对级联泵浦 YDFL 的基本概念、关键技术、发展历程和国内外研究现状等进行了详细介绍。本文结合国防科技大学高能激光团队近 3 年来在高功率高光束质量级联泵浦 YDFL 方面的研究工作, 介绍本团队基于后向/双向级联泵浦实现高光束质量激光方面的研究进展, 以及在基于特殊结构 YDF 的级联泵浦方面的探索, 并对实现 10 kW 级单模和 20 kW 高光束质量激光输出面临的问题和可行方案进行探讨。

2 研究进展

为提高 1018 nm 泵浦光吸收效率, 早期公开报道的高功率级联泵浦 YDFL 均使用了大纤芯/包层比的

YDF (纤芯、内包层直径分别为 30 μm 和 250 μm , 吸收系数约为 6 dB/m@976 nm)^[37-40]。尽管 30 μm 纤芯支持多个高阶模式, 但通过弯曲光纤增加高阶模损耗, 仍可实现高光束质量 ($M^2=1.61@4.63$ kW) 激光输出^[40]。然而, 因 YDF 较长 (>30 m), 受限于 SRS, 其最高功率仅为 5 kW 左右^[38]。更大芯径的 YDF 逐渐被应用于高功率级联泵浦, 以提高 SRS 阈值, 实现激光功率的大幅提升。随着纤芯直径的增大, 基模与高阶模式间的有效折射率差值逐渐减小, 通过弯曲光纤难以有效滤除高阶模式^[41], 在常规大模场光纤中简单有效的弯曲滤模方法并不适用于超大模场光纤。

以实现 20 kW 激光输出的 48/400 μm 光纤为例 (纤芯 NA 为 0.065, 中心波长为 1080 nm), 图 2 列出了光纤中基模和部分高阶模式的弯曲损耗和模场面积随光纤弯曲半径的变化。从图 2(a) 可以看出, 当弯曲半径为 3 cm 时, LP_{11} 模的弯曲损耗仍小于 1 dB/m, 即难以通过弯曲光纤的方式有效抑制 LP_{11} 模; 从图 2(b) 可以看出, 随着光纤弯曲半径的减小, 基模的模场面积迅速降低, 不利于 SRS 抑制。

图 3 计算了 LP_{110} 模式的弯曲损耗随光纤芯径和弯曲半径的变化 (纤芯 NA 设定为 0.065)。尽管弯曲滤模是高功率光纤激光器常用的光束质量控制方法^[42-45], 但是随着纤芯直径的增大, 弯曲损耗迅速降低。尽管弯曲损耗随着弯曲直径的减小而迅速增大, 但是在实际应用中, 为了确保光纤的长期可靠性, 光纤的弯曲直径不宜过小。若光纤的最小弯曲直径为 8 cm, 当纤芯直径大于 30 μm 时, LP_{110} 模的弯曲损耗几乎都小于 0.1 dB/m (图 3), 即难以通过弯曲实现高阶模的有效抑制。因此对于常规 YDF, 适当减小纤芯直径是获得高光束质量激光的关键。尽管减小芯径不利于 SRS 抑制, 但是采用后向/双向泵浦技术可有效提高 SRS 阈值, 实现功率提升^[45-47]。此外, 后向/双向泵浦还可提高 TMI 阈值^[47], 有利于光束质量的控制和保持。目前在 LD 泵浦的高功率 YDFL 中, 后向/双向泵浦结构已经得到广泛运用, 但对于级联泵浦 YDFL, 除 IPG 外鲜有后向/双向泵浦方案的尝试。

在后向泵浦光纤激光器中, 信号光和泵浦光的传输方向相反。在信号光传输和放大过程中, 部分信号光可能通过弯曲光纤、合束器、光纤熔接点等位置泄漏至光纤内包层, 最终经泵浦/信号合束器的泵浦臂进入泵浦源。随着信号光在 YDF 中不断放大, 进入泵浦源的信号光功率将持续增大。由于 LD 通常具有抗回光设计, 泄漏信号光对 LD 直接泵浦光纤激光器的影响相对较小^[48-49]。在级联泵浦 YDFL 中, 作为泵浦源的 1018 nm 光纤激光器对信号光极为敏感^[29,50]。由于 1018 nm 光纤谐振腔内的上能级反转粒子数较多, 进入腔内的 1080 nm 微弱信号光对 1018 nm 激光进行增益调制, 引起 1018 nm 激光功率明显波动, 从而影响激光器的稳定可靠运行。因此, 提高 1018 nm 光纤激光

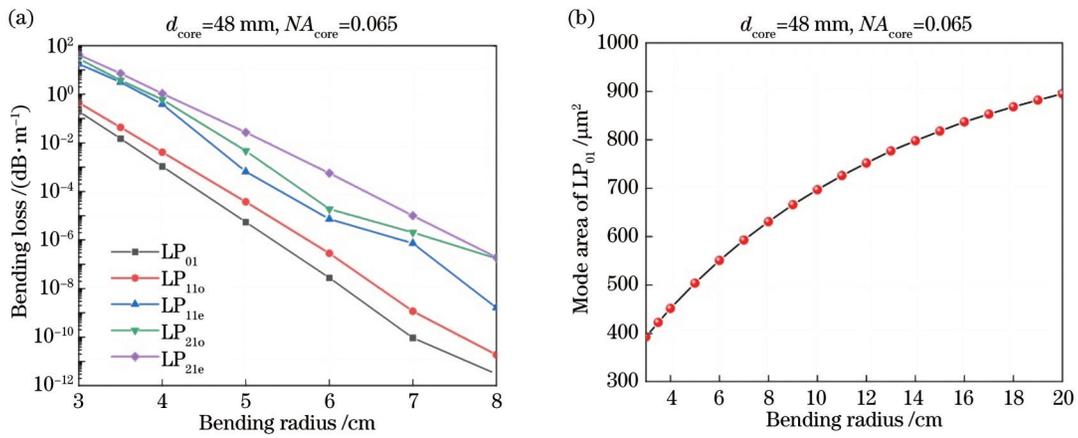


图 2 芯径为 $48 \mu\text{m}$ 、 $NA=0.065$ 的光纤中弯曲损耗和基模模场面积随弯曲半径的变化。(a) 弯曲损耗; (b) 基模模场面积
Fig. 2 Variation of bending loss and mode area of fundamental mode with bending radius in $48 \mu\text{m}$ core diameter and $NA=0.065$ fibers. (a) Bending loss; (b) mode area

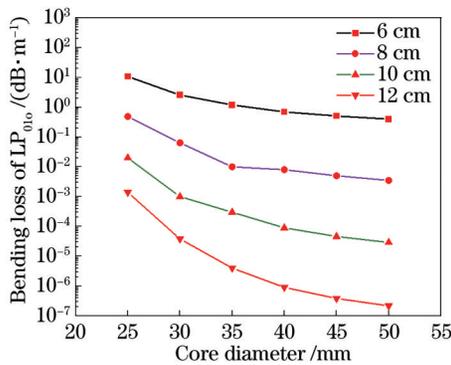


图 3 LP_{11o} 模式的弯曲损耗随光纤芯径和弯曲直径的变化
Fig. 3 Bending loss of LP_{11o} mode varied with fiber core diameter and bending diameter

器的抗回光能力,是实现高功率后向/双向级联泵浦的基础。

2021 年,国防科技大学通过仿真和实验分析了 1080 nm 信号光对 1018 nm YDFL 的影响^[51],如图 4 所示。仿真和实验结果表明,进入 1018 nm 激光器的 1080 nm 激光可引起 1018 nm 激光功率显著下降,且下降速率与 1018 nm 激光器的腔长、FBG 反射率、YDF 的纤芯/包层比等密切相关。通过优化 1018 nm 激光器的 FBG 反射率、YDF 长度等参数,可大幅降低 1080 nm 激光对 1018 nm YDFL 功率的影响,确保激光器稳定运行。此外,通过优化后向合束器的制作工艺、YDF 弯曲半径等,也可减少进入 1018 nm YDFL 的信号光功率,进一步减弱信号光的影响。

在解决了 1018 nm YDFL 抗回光问题的基础上,国防科技大学在国内率先开展了后向/双向级联泵浦 YDFL 研究,先后基于常规双包层 YDF 和特殊结构 YDF 实现了高功率、高光束质量激光输出。

2.1 基于常规 YDF 的高光束质量级联泵浦光纤激光器

2.1.1 25/250 μm 双包层 YDF

在公开报道的前向级联泵浦高光束质量光纤激光

器中,大多使用大芯径($\geq 30 \mu\text{m}$)光纤来提高 SRS 阈值,但大芯径光纤支持的导模数量多,难以实现光束质量的保持和控制。得益于后向泵浦的 SRS 抑制能力,可适当减小纤芯直径以实现更好的高阶模抑制效果。2021 年,本团队基于 25/250 μm 双包层 YDF 开展了后向级联泵浦实验研究^[51]。激光器为主振荡功率放大(MOPA)结构,如图 5 所示。放大级泵浦源使用 3 个 2000 W 级的 1018 nm 光纤激光模块,每个模块包含 7 台输出功率为 300 W 的 1018 nm 光纤激光器。对每台 1018 nm 光纤激光器的结构参数进行了优化,以降低包层信号光的影响。1018 nm 激光经后向 $(6+1) \times 1$ 合束器注入长度为 36 m 的 25/250 μm 双包层 YDF 中, YDF 纤芯/内包层 NA 为 0.06/0.46,包层吸收系数为 0.28 dB/m@1018 nm。放大器输出信号光功率随泵浦功率线性增长,放大过程中未出现效率下降或明显功率起伏,表明回光对作为泵浦源的 1018 nm YDFL 稳定性的影响可以忽略。受限于当时的泵浦功率,放大器的最高输出功率为 5.03 kW(光束质量 M^2 因子为 1.54)。放大器在最高功率下未出现 SRS 和 TMI 效应。当采用前向泵浦方式时,输出功率达到 3.94 kW, SRS 强度即呈非线性增长。该实验结果为国内外首次基于常规 YDF 的高功率后向级联泵浦研究结果,一方面验证了优化后的 1018 nm 光纤激光器的抗回光特性,另一方面展示了后向级联泵浦在 SRS 阈值提升方面的明显优势。

2.1.2 30/250 μm 双包层 YDF

在后向泵浦的基础上,国防科技大学开展了高功率双向级联泵浦的实验研究。激光器结构如图 6 所示。放大级前后向泵浦光分别经 $(6+1) \times 1$ 合束器和 $(2+1) \times 1$ 合束器后注入 30/250 μm 双包层 YDF。YDF 的纤芯/内包层 NA 为 0.06/0.46,包层小信号吸收系数为 0.37 dB/m@1018 nm。前后向泵浦光功率比例为 5:9 时,实现了 6.22 kW 激光输出^[52]。光束质量在放大过程中得到良好保持,最高功率时 M^2 因子为

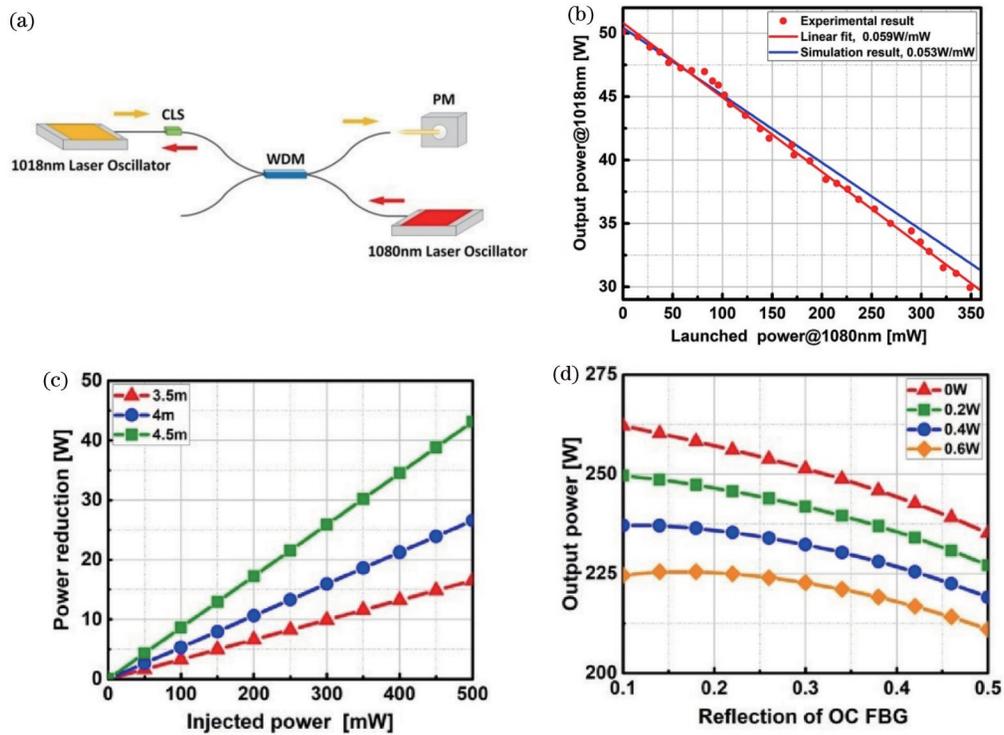


图 4 1080 nm 信号回光对 1018 nm 激光器的影响分析^[51]。(a)实验装置图;(b)1018 nm 振荡器功率随注入 1080 nm 回光变化的实验和仿真结果;(c)不同 YDF 长度下的 1018 nm 振荡器功率随注入 1080 nm 回光变化的仿真结果;(d)不同 1080 nm 回光功率下的 1018 nm 振荡器功率随低反光栅反射率变化的仿真结果

Fig. 4 Influence of 1080 nm return signal laser on 1018 nm oscillator^[51]. (a) Experimental setup; (b) experimental and simulation results of 1018 nm oscillator power changing with the injected 1080 nm return laser; (c) simulation results of 1018 nm oscillator power changing with the injection of 1080 nm return light under different YDF lengths; (d) simulation results of 1018 nm oscillator power changing with the reflectivity of OC-FBG under different return 1080 nm power

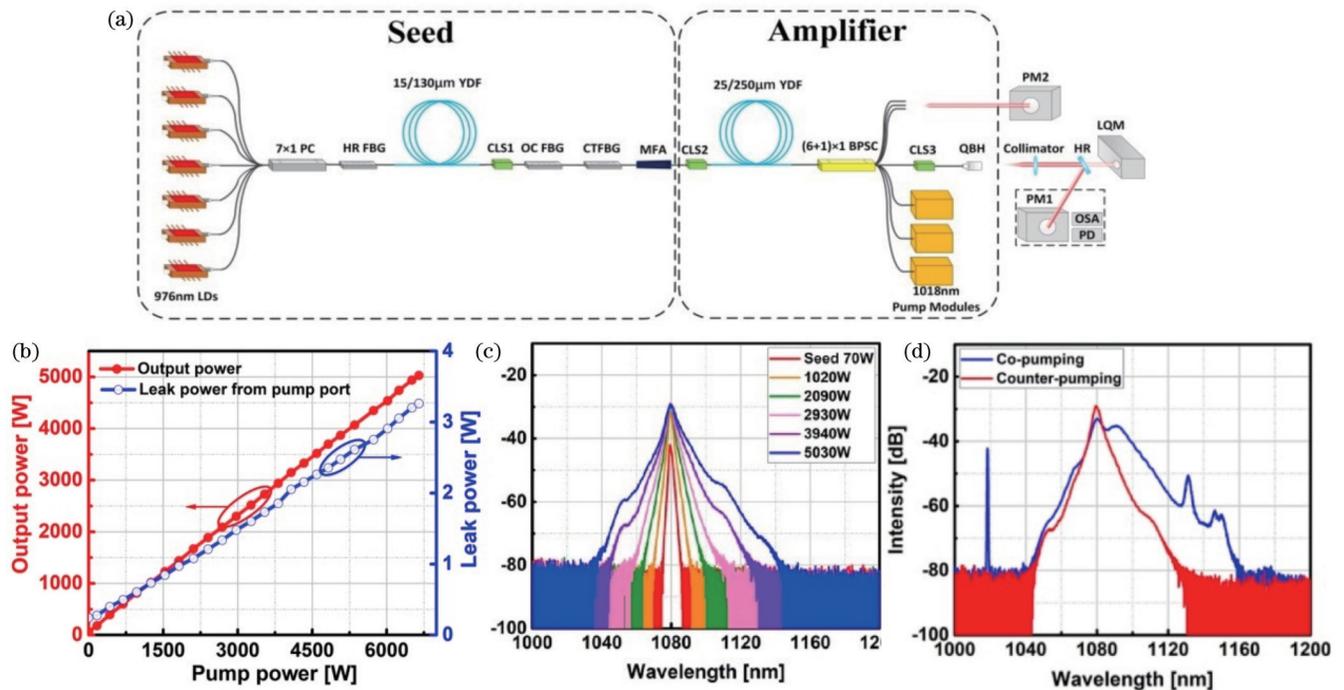


图 5 基于 25/250 μm 双包层 YDF 的后向级联泵浦放大器^[51]。(a)实验结构图;(b)输出功率;(c)不同功率下的输出光谱;(d)3.94 kW 时前向和后向泵浦级联泵浦放大器的输出光谱

Fig. 5 Backward tandem-pumped amplifier based on 25/250 μm double-clad YDF^[51]. (a) Experimental setup; (b) output power; (c) output spectra under different power; (d) output spectra of forward and backward tandem-pumped amplifiers at 3.94 kW

1.53。输出激光功率增长过程中未出现 TMI 效应,但因后向合束器仅有两个泵浦臂,可注入的泵浦光比例有

限,这在很大程度上影响了放大器的 SRS 阈值。实验中输出激光达到最高功率时的 SRS 抑制比为 22 dB。

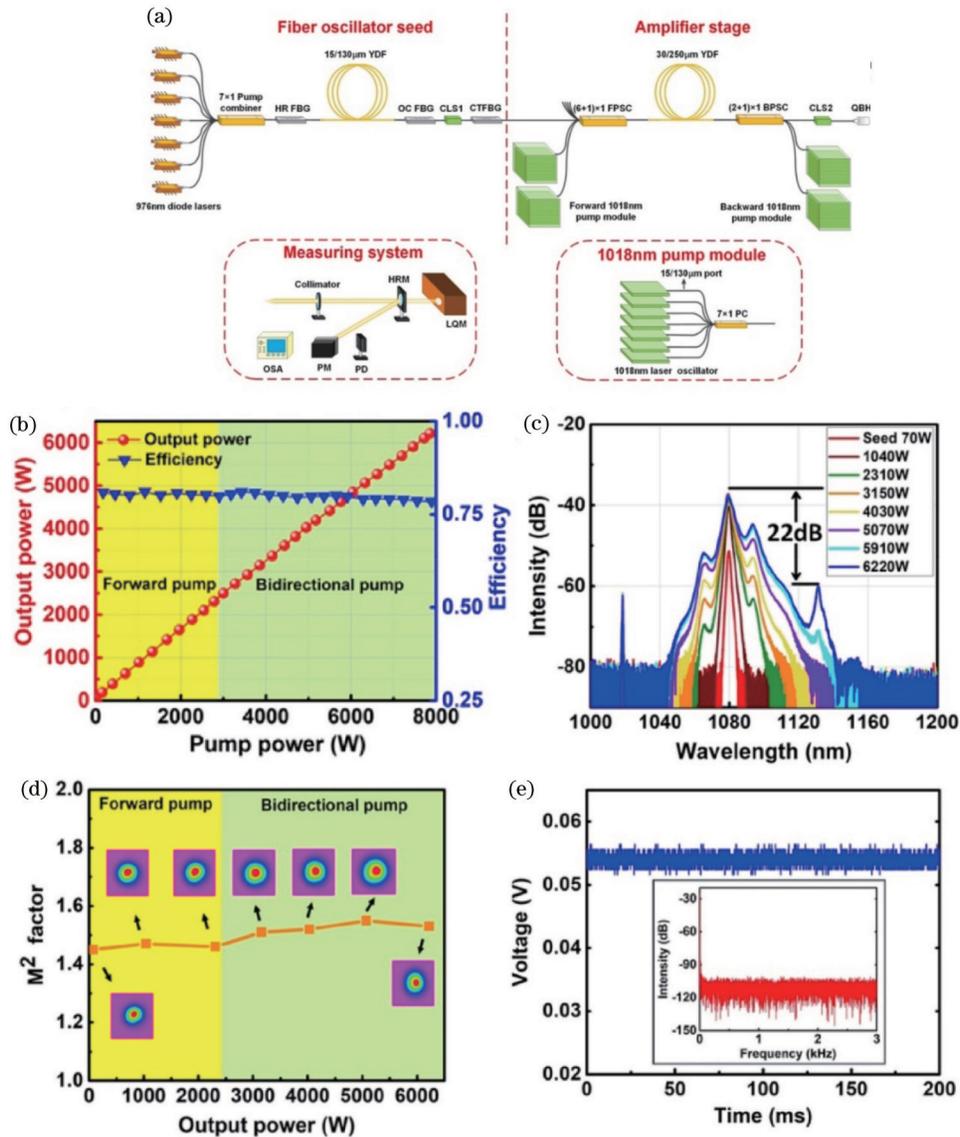


图 6 基于 30/250 μm 双向级联泵浦放大器^[52]。(a)实验结构图;(b)输出功率和效率曲线;(c)不同功率下的光谱;(d)不同功率下的光束质量和光斑形态;(e)6.22 kW 时的输出时序和频谱
Fig. 6 Bi-directional tandem-pumped amplifier based on 30/250 μm double-clad YDF^[52]. (a) Experimental setup; (b) output power and efficiency curves; (c) output spectra under different power; (d) beam quality and beam profile under different power; (e) output time trace and spectra at 6.22 kW

为进一步提高 SRS 阈值,基于自研高功率(6+1)×1后向合束器对常规双包层 YDF 的功率提升能力进行了进一步探索。通过优化种子光时序特性、缩短放大级 YDF 和 GDF 长度等方式,有效抑制了 SRS 增益。通过控制注入种子光的模式成分、优化 YDF 弯曲半径等,实现了 TMI 阈值的大幅提升。基于 30/250 μm 双包层光纤,先后实现了 8.38 kW^[53]和 10.03 kW^[54]的高光束质量激光输出。图 7 所示为 10 kW 激光器的测试结果。激光器的最高输出功率为 10.03 kW,对应的整体斜率效率为 79.1%。最高功率时激光的 3 dB 线宽为 3.72 nm。尽管在最高功率时光

谱已展宽至 1160 nm,但 1135 nm 附近未出现明显的拉曼特征峰。在激光功率由 1 kW 增长至 8 kW 的过程中,光束质量 M²在 1.65~1.75 范围内小幅度变化。当输出激光功率大于 8 kW 时,光束质量随功率的增加缓慢退化,且输出激光功率 10.03 kW 时, M²为 1.92。由后向合束器内部温升引起的光斑畸变、准直器和高反射镜的热效应等可能是高功率时光束质量缓慢退化的原因之一。通过完善合束器制作工艺、改善测试光路光学元件性能和优化增益光纤的弯曲半径等方式,输出激光的光束质量有望得到改善。

基于自研常规双包层掺镱光纤,本团队在国内首

次实现了高光束质量($M^2 < 2$)单纤万瓦功率的光纤激光稳定输出。研究结果一方面证明了后向泵浦是级联泵浦 YDFL 大幅提升 SRS 和 TMI 阈值的重要技术途

径,另一方面验证了常规大模场双包层光纤具有支撑万瓦级高光束质量激光产生和放大的能力,可为万瓦级单模光纤激光器的设计和研制提供参考。

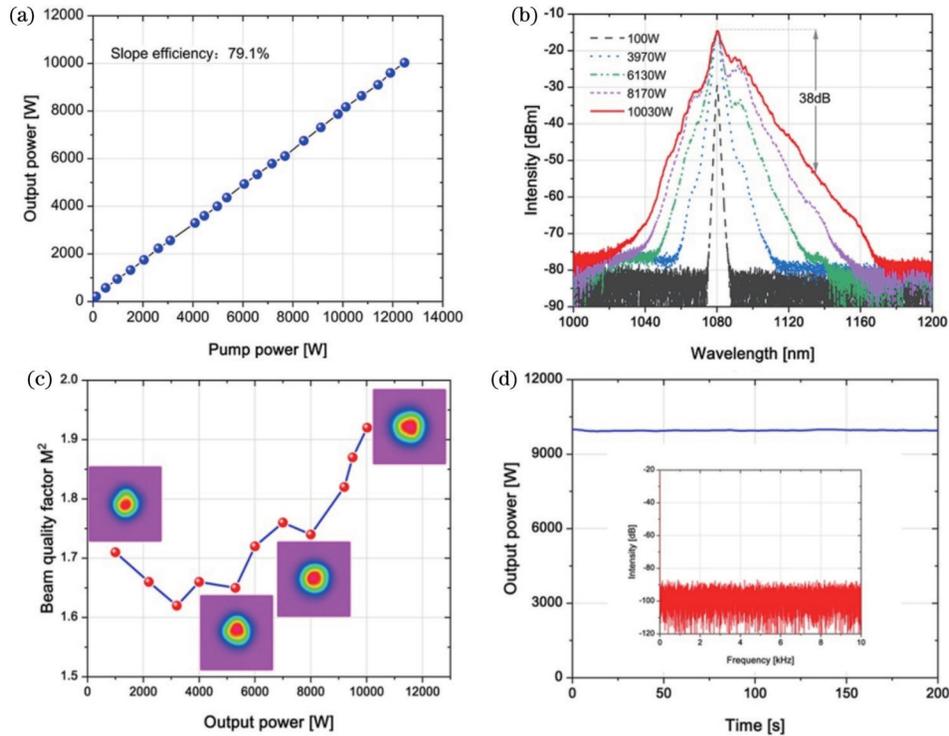


图 7 10 kW 激光器测试结果^[54]。(a)输出功率随泵浦功率变化;(b)光谱随输出功率变化;(c)光束质量随功率变化;(d)时序和频谱(插图)

Fig. 7 Experimental results of 10 kW fiber laser^[54]. (a) Output power versus pump power; (b) spectra versus output power; (c) beam quality versus output power; (d) power fluctuation and its Fourier spectra (inset)

2.2 基于特殊结构 YDF 的高光束质量级联泵浦光纤激光器

为了兼顾高功率和高光束质量,除优化泵浦方式外,国内外研究人员还从光纤设计方面开展了大量探索和尝试^[36]。通过改变光纤的横向(径向)或纵向(轴向)的几何或光学结构,实现了优于常规光纤的 SRS 抑制和模式控制效果。在国防科技大学开展相关研究之前,特殊结构的 YDF 主要应用于 LD 泵浦光纤激光器中,应用于级联泵浦的报道相对较少。本节以部分掺杂掺镱光纤(CYDF)和锥形掺镱光纤(TYDF)为例,介绍国防科技大学在基于特殊结构 YDF 的级联泵浦光纤激光器方面的研究进展。

2.2.1 CYDF

CYDF 中镱离子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,即通过改变纤芯的掺杂分布实现不同模式增益的调控(增益裁剪)^[55]。因此,通过合理设计掺杂区域的比例和掺杂浓度分布等,可在保证纤芯模场面积的同时,降低高阶模的增益,达到抑制非线性效应和保持(甚至提升)光束质量的效果。近年来国内外多家单位针对 CYDF 开展了一系列研究工作,代表性结果^[56-61]如表 1 所示。

从上述研究结果可以看出,目前 CYDF 主要应用于 LD 泵浦方案中,受限于泵浦功率或非线性效应,最高输出功率并未超过 5 kW。CYDF 实现万瓦级高光束质量输出的优势和可行性仍需进一步验证。2021 年,国防科技大学在国内率先开展了基于 CYDF 的高功率级联泵浦光纤激光器的研究^[62]。理论方面,系统分析了掺杂比例、光纤弯曲半径、模式弯曲畸变等对 CYDF 增益裁剪特性的影响,为部分掺杂光纤设计提供参考。在 CYDF 中,若掺杂区域位于纤芯的中心部分,弯曲光纤将使基模分布偏离中心,从而减小与掺杂区域重叠因子,最终可能导致基模增益明显下降。以芯径为 50 μm 、NA 为 0.06 的大模场光纤为例,图 8 所示为不同弯曲半径的光纤中基模的光强分布。随着光纤弯曲半径减小,基模的有效模场面积持续下降,同时基模分布也逐渐偏离纤芯的中心位置。

表 2 展示了掺杂比为 0.7、芯径为 50 μm 、纤芯 NA=0.06 的阶跃型 CYDF 基模/高阶模与掺杂区域的重叠因子随弯曲半径的变化(中心波长为 1080 nm)^[55]。其中,基模的重叠因子显著下降,而多数高阶模的重叠因子虽呈现下降趋势,但下降幅度相对较小。因此,弯曲光纤不利于基模增益的提取以及

表 1 高功率部分掺杂掺镱光纤激光器的典型实验结果

Table 1 Typical experimental results of high power confined doped ytterbium-doped fiber lasers

Institute	Country	Year	Fiber geometry / μm	Power / kW	M2	Pumping scheme	Ref.
Fujikura	Japan	2016	/	2	1.2	LD	[56]
Fujikura	Japan	2017	/	3	1.3	LD	[57]
HUST	China	2018	25/35/400	0.45	1.5	LD	[58]
DSO	Singapore	2018	31.5/42/250	4.1	1.59	Tandem	[18]
HUST	China	2019	23/33/395	1.2	1.43	LD	[59]
CETC	China	2020	20/30/400	2.4	1.32	LD	[60]
CAEP	China	2021	18/30/400	3.57	$M_x^2=1.942$ $M_y^2=1.774$	LD	[61]

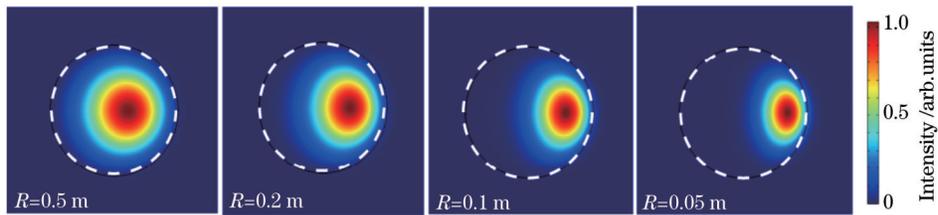


图 8 不同弯曲半径下的模场分布(白色虚线为纤芯范围)

Fig. 8 Mode field distribution under different bending radii (white dotted line is the core range)

表 2 不同光纤弯曲半径时各个模式与掺杂区域的重叠因子

Table 2 Overlap factor of each mode with doping region under different fiber bending radii

Bending radius / m	Overlap factor / %					
	LP ₀₁	LP _{11o}	LP _{11e}	LP _{21o}	LP _{21e}	LP ₀₂
0.5	81.67	64.32	64.14	48.62	48.62	54.21
0.2	72.59	62.08	51.22	49.28	49.28	52.62
0.1	41.84	56.13	34.80	49.56	49.73	41.62
0.05	11.22	39.48	22.95	39.23	49.13	42.22

高阶模的抑制,在实际应用中需要考虑模场畸变带来的不利影响。

为分析 CYDF 的增益裁剪效应随光纤弯曲半径的变化,定量计算了输出激光的模式纯度随光纤弯曲半径的变化^[55,62],如图 9 所示。将模式纯度定义为激光

中基模的能量占比。当光纤弯曲半径为 0.15 m 时,种子激光模式纯度为 0.7 和 0.9,均无法实现模式纯度净化效果,这是因为弯曲导致的模式畸变大幅降低了基模与掺杂区域的填充因子,使得 CYDF 的增益裁剪能力减弱。当光纤弯曲半径为 0.3 m 时,由弯曲引起的

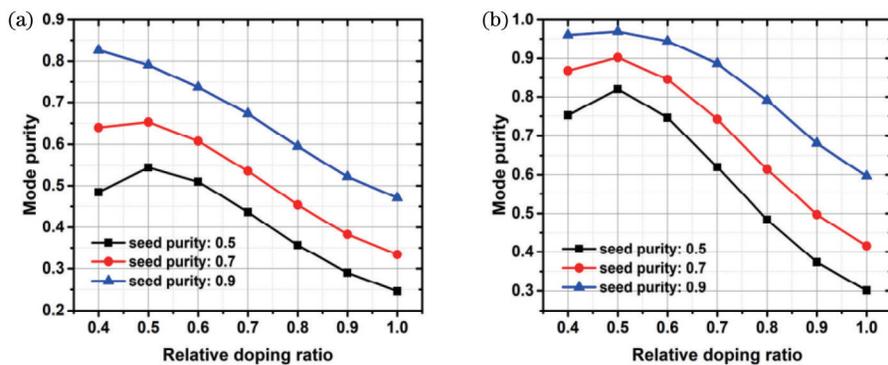


图 9 当放大器弯曲半径为 0.15 m 和 0.3 m 时,在注入不同模式纯度种子情况下输出激光模式纯度随相对掺杂半径的变化^[55]。

(a) 0.15 m; (b) 0.3 m

Fig. 9 When bending radius of the amplifier is 0.15 m and 0.3 m, output laser mode purity varied with relative doping radius under different mode purity seed injection^[55]. (a) 0.15 m; (b) 0.3 m

模式畸变较小,由 CYDF 掺杂半径变化引起的增益裁剪效应成为主导因素,注入不同模式纯度的种子激光都能通过改变掺杂占比实现模式净化效果。

此外,进一步分析了最佳掺杂比随光纤芯径的变化^[55],当种子激光模式纯度为 0.7 时,放大器输出激光的模式纯度随芯径及掺杂比的变化如图 10 所示。随着芯径增大,实现模式净化的最优掺杂比呈变小趋势。当种子激光模式纯度相同时,芯径越大,放大器输出激光的模式纯度越低。这是由芯径逐渐增大时,基模模场面积占纤芯面积的比例逐渐降低导致的。随着芯径增加,基模功率分布更向纤芯中央集中,导致能够实现模式净化效果的掺杂比区间呈现缩小趋势。因此针对不同芯径的光纤,需要分别优化设计最佳掺杂比。

在仿真设计的基础上,国防科技大学基于自研 CYDF 开展了一系列高功率实验,对其 SRS 抑制和光束质量保持/提升能力进行了验证。2021 年,本团队研制出掺杂比例为 75%、纤芯/内包层直径为 40/250 μm 的 CYDF^[62]。光纤的纤芯 NA 为 0.068,包层吸收系数为 0.8 dB/m@1018 nm,光纤长度为 25 m。基于前向级联泵浦实现了 6.2 kW 的高功率输出,实验结果如图 11 所示。输出功率增加至 4.42 kW 前,光束质量 M^2 因子保持在 1.7 附近,表明由于 CYDF 具有增

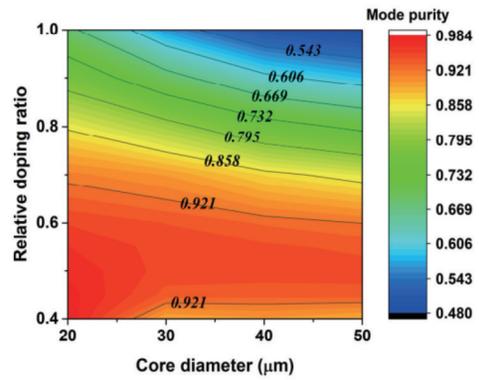


图 10 放大器输出激光模式纯度随芯径及掺杂比的变化^[55]
Fig. 10 Output laser mode purity of the amplifier varies with the core diameter and doping ratio^[55]

益裁剪特性,高阶模比例未显著增加。当功率大于 4.74 kW 时,放大器中出现 TMI 效应,光束质量随功率增长出现了明显退化。作为对比,还记录了 40/250 μm 均匀掺杂 YDF 的光束质量变化特性,如图 11(d)所示。由于缺少有效的高阶模抑制机制,输出激光的光束质量随功率的增加迅速降低,其 TMI 阈值仅为 1760 W。实验结果证明了 CYDF 在抑制高阶模增益和光束质量保持方面具有显著优势。

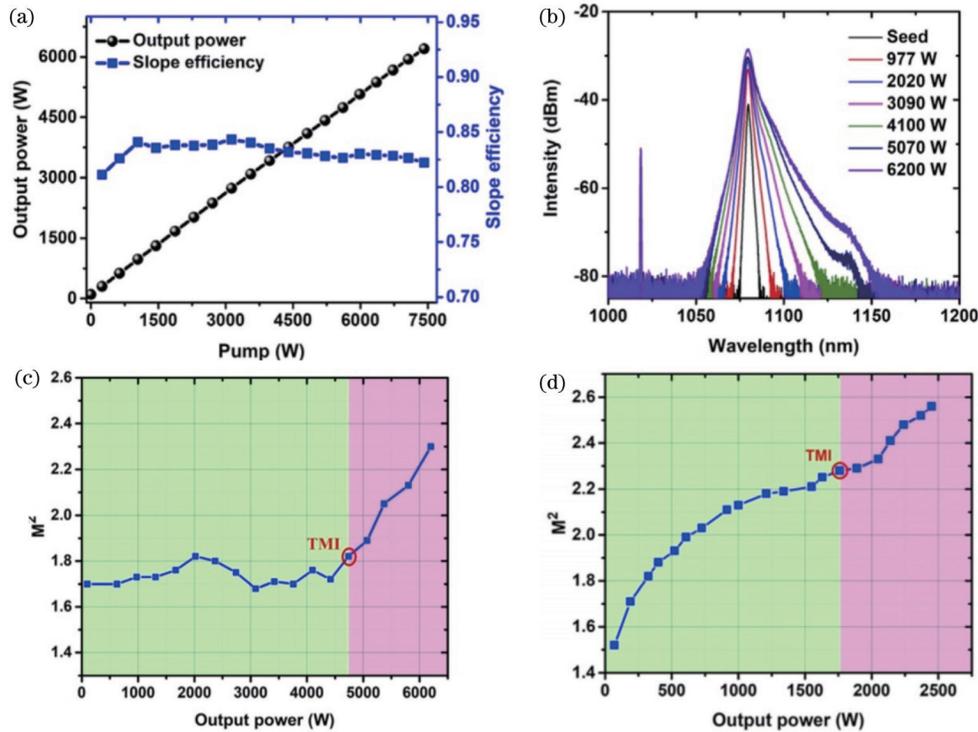


图 11 基于 40/250 μm CYDF 的前向级联泵浦放大器^[62]。(a)功率和效率曲线;(b)不同功率下的光谱;(c)基于 CYDF 放大器的光束质量变化;(d)基于 YDF 放大器的光束质量变化

Fig. 11 Forward tandem-pumped amplifier based on 40/250 μm CYDF^[62]. (a) Power and efficiency curves; (b) output spectra under different power; (c) beam quality of CYDF-based amplifier under different power; (d) beam quality of YDF-based amplifier under different power

之后通过进一步优化 CYDF 折射率分布和 NA, 增强了光纤的增益裁剪特性。基于前向泵浦实现了

7.03 kW 的激光输出,最高功率下的光束质量 $M^2=1.96$ (图 12),但功率进一步提升受限于 SRS^[63]。

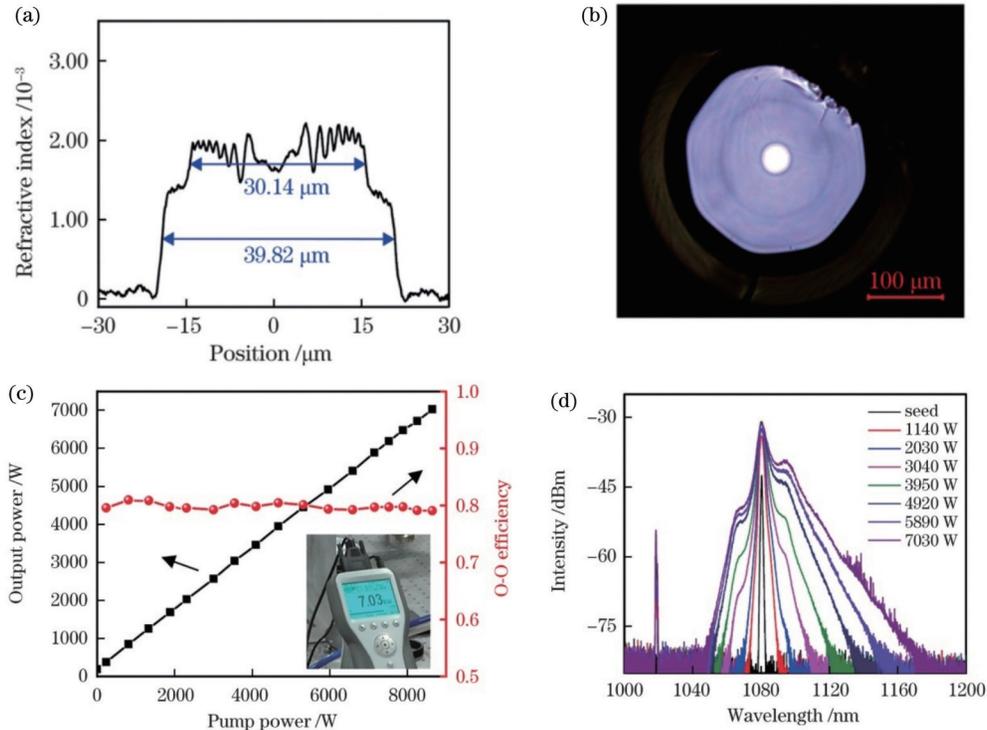


图 12 基于 40/250 μm CYDF 的前向级联泵浦放大器实验结果^[63]。(a)纤芯折射率分布;(b)光纤截面照片;(c)不同泵浦功率下的输出功率与光光效率(插图:最高输出功率时的功率计读数);(d)不同激光功率下的输出光谱
Fig. 12 Experimental results of forward tandem-pumped amplifier based on 40/250 μm CYDF^[63]. (a) Refractive index distribution of fiber core; (b) cross-section photo of the fiber; (c) output power and optical-to-optical efficiency at different pump power (inset: power meter at maximum output power); (d) output spectra at different power

为提高 SRS 阈值,进行了双向级联泵浦 CYDF 实验研究。激光器结构如图 13(a)所示。当种子信号光注入功率约为 260 W,泵浦功率为 8.99 kW(前向泵浦功率为 4.17 kW,后向泵浦功率为 4.82 kW)时,信号光功率被放大至 7.88 kW,光-光转换效率为 84.8%。最高功率时的光束质量为 1.97,SRS 抑制比为 32 dB。因后向合束器泵浦光注入能力有限,未能进一步增加后向泵浦光比例,导致功率的进一步提升仍受限于 SRS^[64]。

为实现功率的进一步提升,2022 年本团队采用后向泵浦方式,成功将 CYDF 输出功率提升至 10 kW^[65]。CYDF 的掺杂区/纤芯直径仍为 30/40 μm 。输出激光特性如图 14 所示。当泵浦功率为 12.80 kW 时,输出功率达到 10.1 kW,对应的光-光转换效率为 78.3%,拉曼抑制比约为 40 dB。输出激光的光束质量随功率的演化情况如图 14(c)所示。此时 TMI 阈值提高至 7.5 kW。在 TMI 出现前,由于部分掺杂光纤的增益裁剪作用,输出激光的光束质量随输出功率的增加逐渐从 $M^2=2.17$ (种子)提升至 1.9(7 kW)。输出功率达到 TMI 阈值后,光束质量出现明显退化,最高功率时 M^2 为 2.16。

理想情况下,CYDF 的纤芯掺杂区与非掺杂区的折射率应基本一致。目前光纤制作工艺不完善,所研制的 CYDF 纤芯掺杂区域的折射率高于非掺杂区域,导致基模和高阶模的模场均向掺杂区域收缩,使得高

阶模与掺杂区域的重叠因子增大,在一定程度上影响了 CYDF 的增益裁剪特性。目前,高功率 CYDF 输出激光中仍含有较多的高阶模成分,下一步需通过调整纤芯的掺杂组分等方式改善纤芯折射率分布的均匀性,以增强 CYDF 的增益裁剪特性,实现光束质量的提升。

2.2.2 STYDF

与 CYDF 相比,锥形光纤(TYDF)研制过程中无需增加复杂的工艺来改变光纤的掺杂分布,仅通过改变预制棒轴向几何轮廓或拉丝速度等即可改变光纤轴向结构参数。相比于均匀双包层光纤,TYDF 可在一定程度上兼顾光束质量控制和非线性效应抑制。TYDF 小芯径部分的单模/少模特性便于实现对高阶模的有效抑制,大芯径部分的大模场面积可降低纤芯功率密度,提高非线性效应阈值。根据纤芯/包层轴向的几何形状,TYDF 可分为单锥形光纤(STYDF)、双锥形(纺锤形)光纤和马鞍形光纤等^[66]。其中 STYDF 在后向泵浦时 SRS 阈值最高,且制作工艺简单^[67-68]。满足绝热拉锥条件的 STYDF 在结构上类似于模场适配器,具有良好的光束质量保持特性,在脉冲激光、单频/窄线宽激光和宽谱激光的高功率放大等方面得到了一定应用。表 3 列出了国内外基于 STYDF 的高功率激光实验结果^[69-83]。在锥形光纤研究方面,国外起步较早。2008 年,芬兰坦佩雷理工大学等率先研制出

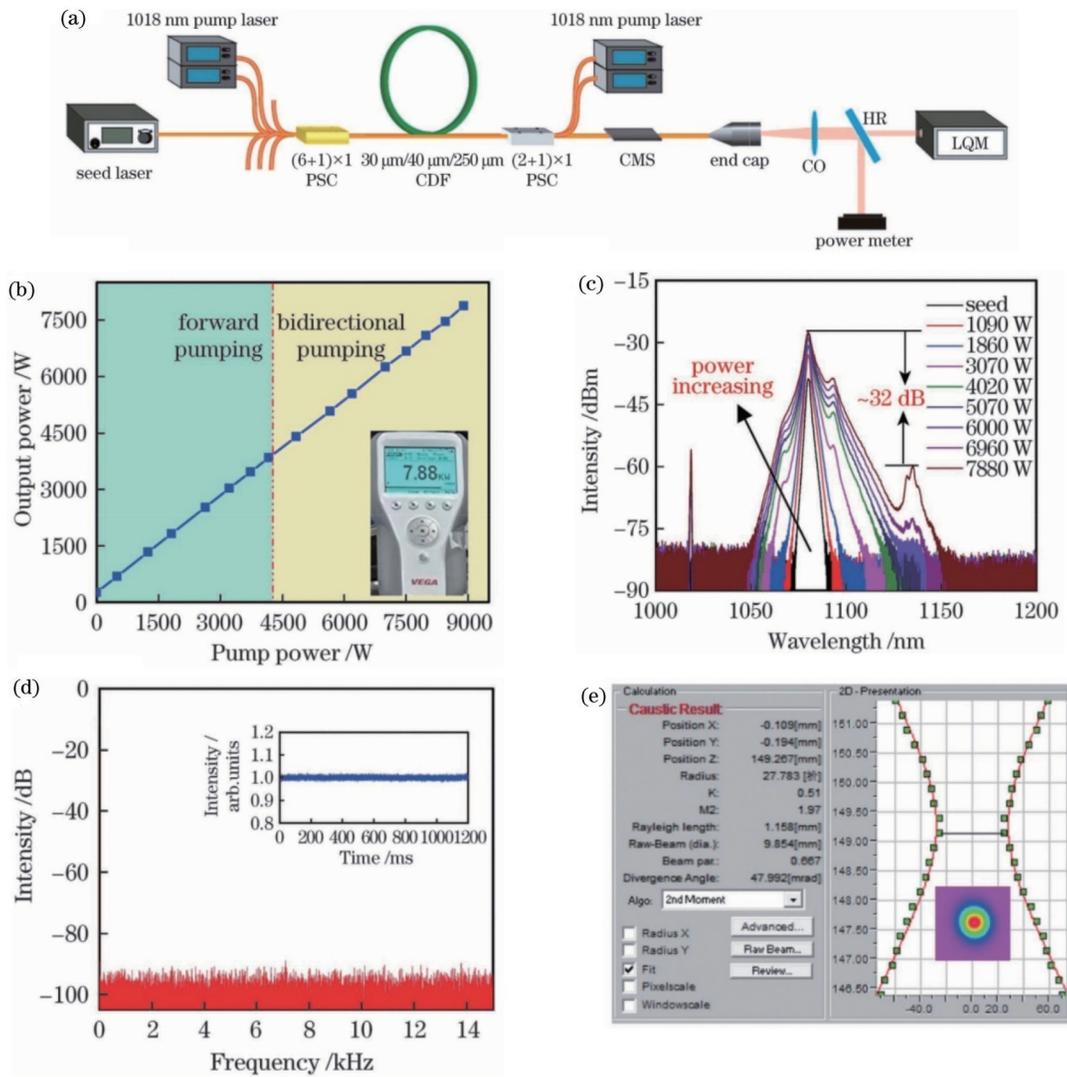


图 13 基于 40/250 μm CYDF 的双向级联泵浦放大器实验结果^[64]。(a)激光器结构;(b)输出功率随泵浦功率的变化;(c)不同功率下的光谱;(d)最大功率下的时序及频谱;(e)最大功率下的光束质量

Fig. 13 Experimental results of bi-directional tandem-pumped amplifiers based on 40/250 μm CYDF^[64]. (a) Laser structure; (b) output power versus pump power; (c) output spectra under different power; (d) output time trace and spectrum at maximum power; (e) beam quality at maximum power

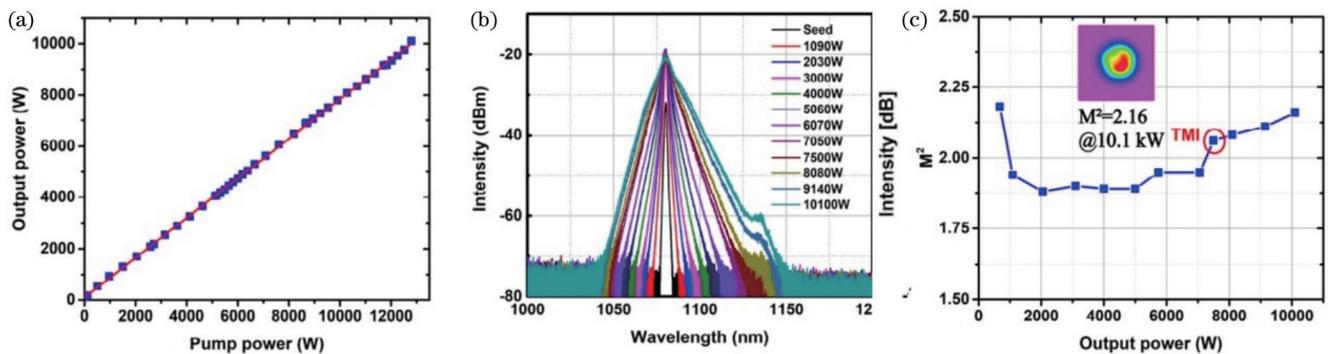


图 14 基于 40/250 μm CYDF 的后向级联泵浦放大器测试结果^[65]。(a)输出功率随泵浦功率的变化;(b)不同功率下的光谱;(c)不同功率下的光束质量

Fig. 14 Experimental results of backward tandem-pumped amplifier based on 40/250 μm CYDF^[65]. (a) Output power versus pump power; (b) spectra under different power; (c) beam quality at different power

大拉锥比的 STYDF,并开展了 LD 泵浦实验研究。得益于良好的光束质量保持和传输能力,STYDF 能够在直径接近 100 μm 的纤芯中实现单模输出^[75]。但是,目前国外的相关研究主要集中于脉冲激光、单频/窄线宽激光的放大,激光器最高输出功率仍未突破 kW,且大多为空间结构。在国内,国防科技大学、中国工程物理研究院等近年来也开展了全光纤结构

的锥形光纤激光器研究。LD 泵浦 STYDF 实现了最高 6.11 kW 的输出功率,该激光功率相比国外的实验结果有了较大提升,但与当前常规 YDF 的输出功率和光束质量相比尚未体现出明显优势。此外,国内报道的 STYDF 的大端芯径相对较小(约 30 μm),其优于常规光纤的光束质量保持特性并未得到充分验证。

表 3 基于 STYDF 的典型高功率激光实验结果
Table 3 Typical experiment results of high power laser employing STYDF

Institute	Country	Year	Fiber geometry / μm	Fiber length /m	Power /W	M^2	Ref.
TUT	Finland	2008	6.5/200-26/800	20	212	<1.02	[69]
TUT	Finland	2009	10.8/145-65/839	24	600	<1.08	[70]
TUT	Finland	2010	20/320-58/930	23.5	750	1.7	[71]
INO	Canada	2016	35/250-56/400	2.8	100	<1.2	[72]
NUDT	China	2017	21.2/417.3-30.4/609.6	33	1470	1.8	[73]
NUDT	China	2018	20/237.1-46.9/579.9	7.2	260	2.27	[74]
TUT	Finland	2018	13/110-96/792	3.3	70	1.09	[75]
NUDT	China	2019	20/400-30/600	33	1720	2.1	[76]
NUDT	China	2019	20/400-30/600	22	2170	2.2	[77]
NUDT	China	2020	30/250-49/404	1.27	550	1.47	[78]
CAEP	China	2021	10/155-26/400	18	1200	1.2	[79]
NUDT	China	2022	35/250-56/400	3.8	694	<1.35	[80]
NUDT	China	2022	20/400-30/600	17	4000	1.46	[81]
NUDT	China	2022	20/400-30/600	35.4	6110	2.57	[82]
Ampliconyx	Finland	2022	10/100-97/970	7.5	513	<2	[83]

尽管 TYDF 在级联泵浦中的应用尚未见公开报道,但实际上 TYDF 尤其是 STYDF 与级联泵浦结合更具优势。一方面,由于 1018 nm 泵浦光亮度高,可缓解泵浦光在锥形光纤传输时因渐晕效应(vignetting effect)^[71]造成的泵浦光泄漏,降低光纤涂覆层损伤风险;另一方面,STYDF 的大端区域可降低信号光功率密度,缓解 SRS 对级联泵浦光纤激光器功率提升的限制。

2022 年,国防科技大学首次开展了 STYDF 的高功率级联泵浦研究。理论方面,分析了 STYDF 锥区长度、拉锥比例等对 SRS 阈值和模式演化特性的影响。以 30/250~48/400 μm STYDF 为例,不同小端/锥区/大端长度($L_1/L_2/L_3$)时的 SRS 阈值仿真计算结果如表 4 所示。仿真时光纤总长度为 40 m,吸收系数为 0.35 dB/m@1018 nm。当前向泵浦(信号光和泵浦光均从 STYDF 小端注入)时,大端长度 L_3 对 SRS 阈值有较大影响。当 L_3 大于 20 m 时,SRS 阈值才能接近 10 kW。当后向泵浦(信号光从 STYDF 小端注入,泵浦光从大端注入)时,因信号光和拉曼光增益主要集中在光纤后半段, L_1 、 L_2 、 L_3 的取值对 SRS 阈值的影响相对较小。从表 4 可以看出,几乎所有参数的 STYDF 对应的 SRS 阈值均大于 20 kW。仿真结果表明,尽管

STYDF 的平均纤芯直径小于均匀光纤,但采用后向泵浦方式可以有效降低平均纤径减小对 SRS 阈值的影响。通过合理选择 L_1 、 L_2 、 L_3 参数,可以达到接近均匀 48/400 μm YDF 的 SRS 阈值的效果。

实验方面,研制出 30/250~48/400 μm 的 STYDF 并开展了高功率实验。光纤的小端/锥区/大端光纤长度分别为 6 m/20 m/6 m,如图 15(a)所示。光纤的纤芯 NA 为 0.068,包层吸收系数约为 0.4 dB/m@1018 nm。为提高 SRS 阈值,激光器采用后向级联泵浦的 MOPA 结构。1080 nm 信号光从 STYDF 的小端注入,1018 nm 泵浦光从大端注入 STYDF 内包层。为验证 STYDF 光束质量保持能力,光纤的最小盘绕半径大于 15 cm,以排除弯曲滤模对光束质量的影响。输出激光特性如图 15(b)~(d)所示。信号输入光纤与 STYDF 小端参数不匹配,导致注入 STYDF 的信号光存在一定比例的高阶模。此外,由于制作工艺不完善,自研的(6+1) \times 1 后向合束器也引起输出激光的光束质量退化。实验中测得单模种信号光经放大级后的光束质量 M^2 因子为 1.8。当注入泵浦光时,因基模和高阶模均可获得增益, M^2 因子由 1.8 增加至 2.2 左右(2100 W)并保持稳定。继续增加功率至最高输出功率(10.13 kW)的过程中, M^2 因子一直保持在 2.2 附

表 4 基于 30/250~48/400 μm TYDF 的级联泵浦放大器 SRS 阈值仿真结果

Table 4 Calculated SRS threshold of tandem-pumped amplifier based on 30/250-48/400 μm TYDF

$L_1, L_2, L_3 / \text{m}$	Average core diameter / μm	$P_{\text{SRS}} / \text{W}$ (forward pump)	$P_{\text{SRS}} / \text{W}$ (backward pump)
40,0,0	30	4044	9393
5,34,1	38.1	7320	20259
5,30,5	39	7711	21326
5,25,10	40.125	8183	22393
5,20,15	41.25	8731	23295
5,15,20	42.375	9279	23871
5,10,25	43.5	9827	24363
10,29,1	36.975	6772	19276
10,25,5	37.875	7124	20344
10,20,10	39	7594	21574
10,15,15	40.125	8104	22639
10,10,20	41.25	8652	23297
0,0,40	48	10999	24939

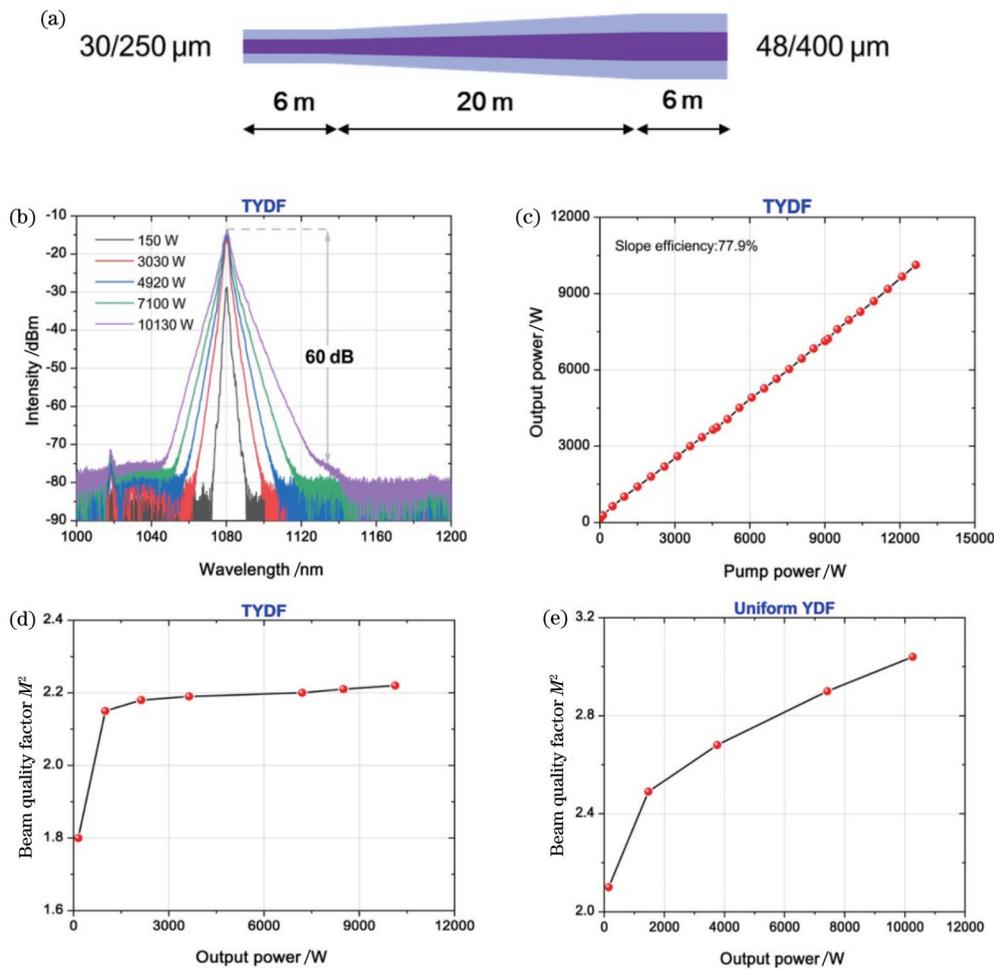


图 15 基于 30/250~48/400 μm STYDF 的后向级联泵浦放大器实验结果。(a)TYDF 纵向截面图;(b)不同功率下的光谱;(c)输出功率随泵浦功率的变化;(d)基于 TYDF 放大器的光束质量变化;(e)基于 YDF 放大器的光束质量变化

Fig. 15 Experimental results of backward tandem-pumped amplifiers based on 30/250-48/400 μm STYDF. (a) TYDF longitudinal section; (b) spectra under different power; (c) output power versus pump power; (d) beam quality of TYDF-based amplifier under different power; (e) beam quality of YDF-based amplifier under different power

近。10.13 kW 时的 SRS 抑制比大于 60 dB, 表明功率进一步提升不受限于 SRS。因光纤的制造工艺不完善等, 继续增加泵浦功率时光纤大端出现了损伤, 未能进行更高功率的实验。作为对比, 基于同一预制棒拉制了均匀 48/400 μm YDF, 其光束质量随功率变化如图 15(e) 所示。随着功率的增加, 输出激光的光束质量逐渐变大, 10.28 kW 时 M^2 因子为 3.04。实验结果初步证明了 STYDF 在优化级联泵浦光纤激光器光束质量方面具有明显优势。下一步通过优化 STYDF 的小端/锥区/大端长度、拉锥比等参数, 并改进后向合束器工艺, 有望实现功率和光束质量的同步提升。

3 总结与展望

3.1 小结

2010 年之前, 受限于泵浦光亮度, LD 直接泵浦的 YDFL 输出功率相比级联泵浦存在明显差距。经过十多年的发展, LD 的功率和亮度持续提升, 大模场 YDF 设计、制造水平不断提高, 助力 LD 泵浦的 YDFL 输出功率迅速增长。目前 LD 泵浦的 YDFL 最高功率已突破 20 kW^[84], 其功率水平已与级联泵浦 YDFL 相当。因级联泵浦 YDFL 结构相对复杂、插头效率低且研制成本高, 若仅从实现高功率输出方面进行对比, 级联泵浦方案目前并无明显优势。但得益于级联泵浦固有的低量子亏损、强增益饱和特性, 其可实现数倍于 LD 泵浦 YDFL 的 TMI 阈值提升^[85-87]。以芯径为 30 μm 的常规 YDF 为例, 9XX nm LD 泵浦时 TMI 阈值低于 1 kW^[86], 而使用 1018 nm 级联泵浦时 TMI 阈值大于 4 kW^[38]。在非线形效应方面, 尽管较长 YDF 导致级联泵浦 YDFL 的 SRS 阈值更低, 但在后向泵浦条件下, YDF 长度对 SRS 阈值的影响相较于前向泵浦大幅降低, 可有效缓解 SRS 对级联泵浦 YDFL 功率提升的限制。而且随着功率的提升, 为降低 YDF 的热负荷并提高 TMI 阈值, LD 泵浦方案所使用的 YDF 长度也逐渐增加。以文献[82]报道的 LD 泵浦的 6 kW YDFL 为例, 其 YDF 长度为 35.4 m, 与目前级联泵浦 YDFL 所用光纤长度已较为接近。近三年来, 国防科技大学在高光束质量级联泵浦 YDFL 功率提升方面取得突破。本团队在国内率先开展了高功率后向级联泵浦研究, 大幅提升了激光器 SRS 阈值。先后基于常规 YDF、CYDF 和 STYDF 等实现了万瓦级高光束质量光纤激光输出, 其光束质量明显优于 LD 直接泵浦的万瓦级光纤激光器^[88]。研究结果充分表明, 级联泵浦方案在获得万瓦级高光束质量激光方面仍具有明显优势。

同时需要指出, 级联泵浦 YDFL 光束质量和功率的进一步提升仍面临巨大挑战。在光束质量提升方面, 所介绍的万瓦级 YDFL 的光束质量与 IPG 的 10 kW 单模光纤激光相比仍存在明显差距。所使用的 3 种光纤均无法实现万瓦级单模或近单模 ($M^2 < 1.5$)

激光输出。对于常规 30/250 μm YDF, 因弯曲无法充分滤除纤芯中支持的 LP_{11} 模, 故难以实现单模运转。此外, 随着弯曲半径的减小, TMI 阈值将迅速下降^[89-90], 从而限制了功率的线性增长。对于 CYDF, 尽管其光束质量优于相同芯径的全掺杂 YDF, 但因高阶模始终与掺杂区域有一定重叠, 因此仍可获得增益, 即输出激光中仍将存在一定比例的高阶模, 导致 CYDF 目前也无法实现万瓦级单模输出。对于 STYDF, 其光束质量相比常规光纤的提升主要依赖于其光束质量保持特性, 因缺少主动模式控制机制, 对放大过程中因纤芯内的耦合或散射等机制产生的高阶模可能无法实现有效抑制, 因此实现万瓦级单模输出也面临困难。在功率提升方面, 目前 30/250 μm YDF 的输出功率已接近 SRS 阈值, 无法实现功率的大幅提升。对于 CYDF, 因在万瓦附近出现了 TMI, 继续增加功率将导致光束质量迅速退化, 无法实现高光束质量输出。对于 STYDF, 其 10 kW 时的 SRS 抑制比仍大于 60 dB 且未出现 TMI, 因此最有可能实现功率的大幅提升, 但其在更高功率条件下的模式演变和 TMI 阈值特性仍需深入研究。

3.2 展望

对 SRS 和 TMI 效应的有效抑制, 是目前高功率高光束质量 YDFL 性能进一步提升的关键因素, 也是近年来高功率光纤激光领域的研究热点。而高性能的增益光纤则是实现 SRS 和 TMI 抑制的基础。为了获得高功率高光束质量光纤激光, 国内外研究者设计或研制出多种特殊结构光纤。除 CYDF 和 TYDF 外, 沟壑光纤^[91-93]、3C 光纤^[94-95]、低 NA 光纤^[96-98]、纺锤形光纤^[99-101]、马鞍形光纤^[102-103]等也受到了关注, 部分光纤已在千瓦甚至数千瓦功率实现了单模或近单模输出, 但能否实现万瓦级高光束质量激光输出仍待理论和实验验证。文献[36]已对各种光纤的结构和原理等进行介绍, 本节分别从 SRS 和 TMI 抑制两个方面, 分析适用于级联泵浦方案光纤的设计和改进方法。

在 SRS 抑制方面, 主要从提高 1018 nm 泵浦光吸收系数方面改进光纤。当纤芯模场面积不变时, 通过提高吸收系数来缩短光纤长度是提高 SRS 阈值的有效方法。YDF 的吸收系数由镱离子掺杂浓度、泵浦光填充因子(纤芯包层比)和包层结构等因素共同决定^[1]。在镱离子的掺杂浓度无法大幅提高, 纤芯直径不宜继续增大的情况下, 改变光纤的内包层几何尺寸或结构有可能成为提高吸收系数的有效途径。

1) 减小包层直径

由于 1018 nm 泵浦光亮度比 LD 高 1~2 个量级, 可通过减小 YDF 内包层直径来提高吸收系数。以 48/400 μm YDF 为例, 其内包层直径减小至 300 μm 时, 泵浦光吸收系数可提高 78%。根据现有合束器制作水平, 直径为 300 μm 的内包层仍可注入数万瓦泵浦光, 即可支持数万瓦激光输出。

2) 改变内包层形状

为了便于光纤熔接,目前的 YDF 内包层几何形状通常为八角形或圆形(保偏光纤)。实际上,D形、六边形或星形等内包层结构更有利于泵浦光吸收^[104-108]。文献[104]报道了一种星形内包层结构的 YDF,该 YDF 展现出较高的吸收系数。YDF 的模场直径为 21 μm ,包层吸收系数为 1.73 dB/m@976 nm。得益于此 YDF 的高吸收系数,使用 7.5 m 的 YDF 前向泵浦实现了 5 kW 单模激光输出,初步证明了特殊包层结构在提升吸收系数方面的优势。在常规八边形内包层光纤的吸收系数有限的情况下,六边形或星形等结构的

内包层设计有望成为未来高功率 YDF 的选择。

3) 改变内包层结构

除改变内包层形状外,改变光纤的内包层结构也可达到增强泵浦光吸收的效果。文献[108]设计了一种类似保偏光纤的结构来实现吸收系数的提升。与保偏光纤在内包层添加掺硼高折射率区不同,该光纤的内包层中存在 4 个对称的掺氟低折射率区域,如图 16 所示。由于低折射率区的存在,传输泵浦光的内包层等效面积减小,相当于提高了泵浦光填充因子。对比实验表明,此结构的 20/400 μm YDF 的包层吸收系数比常规八边形光纤提高了约 50%。

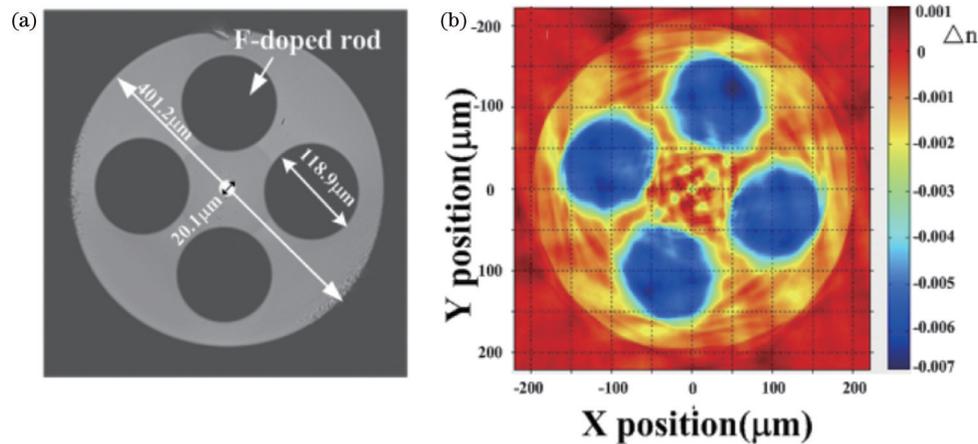


图 16 包层掺氟光纤结构图^[108]。(a)包层截面;(b)包层折射率分布

Fig. 16 Structure of YDF with F-doped inner cladding^[108]. (a) Cross section of inner cladding; (b) 2D refractive index of inner cladding

在模式控制方面,可从减小纤芯 NA 和增大高阶模损耗等方面进行光纤设计。

1) 减小纤芯 NA

减小纤芯 NA 不仅可减少纤芯导模数量,还可增大高阶模弯曲损耗,有利于获得高光束质量激光。通常低 NA 光纤的研制需降低纤芯掺杂浓度,导致光纤吸收系数下降,不利于非线性效应抑制。文献[19]提出一种实现低 NA 光纤的新方法:在不降低纤芯掺杂浓度的前提下,通过在包层中添加锆元素来提高包层折射率,达到减小纤芯与内包层间折射率差的效果。基于此方法,研制了纤芯直径为 30 μm 、纤芯 NA 为 0.04 的低 NA 光纤。当光纤弯曲半径为 15 cm 时,即可实现近单模激光输出($M^2=1.27$)。此类光纤可在不影响吸收系数的前提下降低纤芯 NA,为级联泵浦方案所需超大模场光纤的设计提供参考。

2) 增加高阶模损耗

增大光纤高阶模弯曲损耗是获得高功率单模激光的最常用方法。但对于常规阶跃光纤,因高阶模弯曲损耗随纤芯直径增大而迅速减小,弯曲滤模的作用逐渐减弱。与阶跃光纤相比,沟壑型光纤在不改变纤芯折射率的前提下,通过在包层添加低折射率环,即可达到增大高阶模弯曲损耗的效果。根据折射率环的数量,可将沟壑光纤分为单沟壑光纤和多沟壑光纤,其中

单沟壑光纤结构相对简单,研制难度小。本团队通过仿真和实验对比了单沟壑光纤和阶跃光纤的高阶模弯曲损耗、模场面积^[93],研究结果表明,在纤芯直径相同的情况下,单沟壑光纤具有更大的纤芯模场面积,且高阶模弯曲损耗比阶跃光纤高 1~2 个量级。基于自研的单沟壑光纤(纤芯直径为 25 μm ,NA 为 0.06)在弯曲直径为 12 cm 时实现了单模激光输出($M^2=1.07$)。实验结果初步证明了单沟壑光纤的高阶模抑制能力。近期,美国 OFS 公司利用前向泵浦方案实现了 5 kW 单模激光输出^[104]。尽管他们未透露 YDF 的技术细节,但相关文献中提到其 YDF 具有大的高阶模损耗特性。他们还指出,增加纤芯中的高阶模损耗,是在增大纤芯模场面积的同时保持较高 TMI 阈值的前提。因此,具有高阶模损耗特性的沟壑光纤,极有可能成为下一步级联泵浦方案 YDF 的选择。

在一种光纤难以兼顾 SRS 和 TMI 的情况下,将多种光纤的优势融合,可能是高功率光纤激光器设计和研制的重要方向。基于万瓦级高光束质量级联泵浦 YDFL 的实验结果,并结合对 YDF 设计和改进的思考,本团队分别设计了实现 10 kW 单模 YDFL 和 20 kW 高光束质量($M^2<2$)YDFL 的技术方案。为兼顾 SRS 和 TMI 抑制,两个方案中的 YDF 都应具备大模场面积、强泵浦吸收、大高阶模弯曲损耗等特性。

10 kW 单模 YDFL 为单级 MOPA 结构。放大级增益光纤为均匀双包层 YDF, 纤芯和内包层直径分别为 25 μm 和 200 μm 。由于内包层直径减小, 其泵浦光吸收系数相比 25/250 μm YDF 可提高约 56%, 因此 YDF 可由 40 m 缩短至 25 m。同时通过增大内包层折射率的方式, 将纤芯 NA 降低至 0.04~0.05 以增大纤芯模场面积并增加高阶模弯曲损耗。为提高 SRS 阈值, 放大级仍采用后向泵浦方式。后向合束器(PSC)采用 $(6+1)\times 1$ 结构, 由于 1018 nm 泵浦光亮度足够高, 其泵浦臂光纤可采用 105/125 μm 或 50/125 μm 多模光纤。为降低尾纤长度对 SRS 的不利影响, 合束器输出光纤、包层光滤除器(CPS2)和端帽(QBH)尾纤可采用大芯径光纤($>40\ \mu\text{m}$)来降低纤芯功率密度。

20 kW 高光束质量 YDFL 结构与图 17 所示的 10 kW 单模光纤激光器结构相似, 仍为后向泵浦的单级 MOPA 结构, 其增益光纤可采用 STYDF。STYDF 的小端纤芯/内包层直径为 20/175 μm , 大端纤芯/内包层直径为 40/350 μm 。通过改变内包层几何形状或结构等方式, 将包层吸收系数提升至 0.5 dB/m。光纤总长度设定为 30 m 左右。为增大纤芯模场面积并便于抑制高阶模, 需要通过增加包层折射率等方式将纤芯 NA 降低至 0.04~0.05。为抑制 TMI, 还可考虑将单沟壑结构与 STYDF 结合。后向合束器采用 $(6+1)\times 1$ 结构, 参考现有 1018 nm 激光参数, 其泵浦光注入光纤的纤芯/内包层直径采用 105/125 μm 即可。为抑制 SRS, 合束器输出光纤、包层光滤除器(CPS2)和端帽(QBH)尾纤可采用大芯径光纤($>50\ \mu\text{m}$)来降低纤芯功率密度。

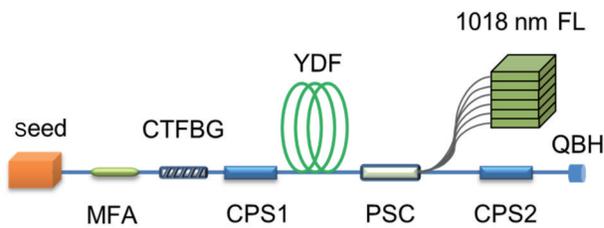


图 17 10 kW 单模光纤激光器结构示意图

Fig. 17 Schematic of 10 kW single mode fiber laser

需要说明的是, 上述方案的设计尚未考虑热效应的影响。随着吸收泵浦功率的增加, YDF 温度升高, 纤芯和包层的折射率发生变化, 可能对光纤的波导特性和高阶模抑制能力产生影响。因此需要在激光器和光纤设计时, 考虑热致折射率变化等因素, 提前对光纤的芯径和折射率等参数进行预补偿, 以确保在高功率运行时仍可实现高光束质量激光输出。

高性能的增益光纤是获得高功率高光束质量光纤激光的关键。经过近十年的快速发展, YDFL 的单纤最高输出功率已大于 20 kW, 但除 IPG 外, 国际上仍未有第二家单位实现万瓦功率的单模激光输出。近年

来, 高光束质量光纤激光的发展进入了瓶颈期, 但高功率高光束质量光纤激光器应用需求的牵引, 以及光纤激光理论的逐渐完善和光纤器件制造工艺的不断进步, 必将推动新型光纤的研制, 助力高光束质量 YDFL 输出功率继续提升。

参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [2] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.
- [3] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers [J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.
- [4] 李峰云, 黎玥, 宋华青, 等. 全国产光纤材料器件实现高 SRS 抑制比 20.88 kW 输出[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2116002. Li F Y, Li Y, Song H Q, et al. The national optical fiber material devices achieve high SRS rejection ratio of 20.88 kW output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2116002.
- [5] 林傲祥, 肖起榕, 倪力, 等. 国产 YDF 有源光纤实现单纤 20 kW 激光输出[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0916003. Lin A X, Xiao Q R, Ni L, et al. Domestic YDF active fiber realizes single fiber 20 kW laser output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0916003.
- [6] 肖虎, 潘志勇, 陈子伦, 等. 基于自研光纤和器件实现 20 kW 高光束质量激光稳定输出[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 1616002. Xiao H, Pan Z Y, Chen Z L, et al. Stable output of 20 kW high beam quality laser based on self-developed optical fiber and device[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 1616002.
- [7] 施建宏, 杜天怡, 马盖明, 等. 全国产工业化光纤激光器实现单纤 22.07 kW 功率稳定输出[J]. 中国激光, 2022, 49(24): 2416003. Shi J H, Du T Y, Ma G M, et al. All-domestic industrial fiber laser realizes stable output of 22.07 kW single fiber power[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(24): 2416003.
- [8] Shcherbakov E A, Fomin V V, Abramov A A, et al. Industrial grade 100 kW power CW fiber laser[C]//Advanced Solid-State Lasers Congress, October 27-November 1, 2013, Paris, Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2013: ATh4A.2.
- [9] Minelly J, Laming R, Townsend J, et al. High-gain fibre power amplifier tandem-pumped by a 3 W multi-stripe diode[C]//Optical Fiber Communications Conference 1992, February 2, 1992, San Jose, California, USA. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 1992: TuG2.
- [10] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18645-18654.
- [11] Stiles M. New developments in IPG fiber laser technology[C]//Proceeding of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009.
- [12] Xiao H, Leng J Y, Zhang H W, et al. High-power 1018 nm ytterbium-doped fiber laser and its application in tandem pump [J]. Applied Optics, 2015, 54(27): 8166-8169.
- [13] Popp A, Voss A, Graf T, et al. Thin-disk laser-pumping of ytterbium-doped fiber laser[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(12): 887-894.
- [14] Wirth C, Schmidt O, Kliner A, et al. High-power tandem pumped fiber amplifier with an output power of 2.9 kW[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3061-3063.
- [15] Ma P F, Xiao H, Meng D R, et al. High power all-fiberized and narrow-bandwidth MOPA system by tandem pumping strategy for thermally induced mode instability suppression[J]. High

- Power Laser Science and Engineering, 2018, 6(4): e57.
- [16] Gu G C, Liu Z Y, Kong F T, et al. Highly efficient ytterbium-doped phosphosilicate fiber lasers operating below 1020 nm[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 17693-17700.
- [17] Kong F T, Gu G C, Hawkins T W, et al. Efficient 240 W single-mode 1018 nm laser from an Ytterbium-doped 50/400 μm all-solid photonic bandgap fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 3138-3144.
- [18] Seah C P, Lim W Y W, Chua S L. A 4 kW fiber amplifier with good beam quality employing confined-doped gain fiber[C]// Laser Congress 2018 (ASSL), November 4-8, 2018, Boston, Massachusetts. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2018: AM2A.2.
- [19] Lim K J, Seah S K W, Ye J Y E, et al. High absorption large-mode area step-index fiber for tandem-pumped high-brightness high-power lasers[J]. Photonics Research, 2020, 8(10): 1599-1064.
- [20] 肖虎, 冷进勇, 周朴, 等. 高功率级联抽运掺镱光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201007.
Xiao H, Leng J Y, Zhou P, et al. High power tandem-pumped Yb-doped fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201007.
- [21] 周朴, 冷进勇, 肖虎, 等. 高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2000001.
Zhou P, Leng J Y, Xiao H, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2000001.
- [22] 肖起榕, 田佳丁, 李丹, 等. 级联泵浦高功率掺镱光纤激光器: 进展与展望[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1501004.
Xiao Q R, Tian J D, Li D, et al. Tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers: progress and opportunities[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1501004.
- [23] 高聪, 代江云, 李峰云, 等. 自研万瓦级同带泵浦掺镱石英玻璃光纤[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0315001.
Gao C, Dai J Y, Li F Y, et al. Homemade 10-kW ytterbium-doped aluminophosphosilicate fiber for tandem pumping[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0315001.
- [24] 代江云, 刘念, 李峰云, 等. (1+1)型泵浦增益一体化光纤实现同带泵浦万瓦激光输出[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1816001.
Dai J Y, Liu N, Li F Y, et al. The (1+1) type pump gain integrated fiber realizes the output of 10,000-watt laser pumped by the same band[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1816001.
- [25] 高聪, 刘念, 李峰云, 等. (1+1)型长距离侧面泵浦光纤实现 17.4 kW 激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(5): 051002.
Gao C, Liu N, Li F Y, et al. 17.4 kW (1+1) long distance side-pumped laser fiber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(5): 051002.
- [26] 张磊, 楼风光, 王孟, 等. 同带泵浦的万瓦级三包层掺镱光纤[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1315001.
Zhang L, Lou F G, Wang M, et al. Yb-doped triple-clad fiber for nearly 10 kW level tandem-pumped output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1315001.
- [27] Kurkov A S. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers[J]. Laser Physics Letters, 2007, 4(2): 93-102.
- [28] Kalyoncu S K, Yeniay A. High brightness 1018 nm monolithic fiber laser with power scaling to >500 W[J]. Applied Optics, 2020, 59(16): 4763-4767.
- [29] Xiao H, Zhou P, Wang X L, et al. High power 1018 nm ytterbium doped fiber laser with an output power of 309 W[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(6): 065102.
- [30] Midilli Y, Efunbajo O B, Şimşek B, et al. 1018 nm Yb-doped high-power fiber laser pumped by broadband pump sources around 915 nm with output power above 100 W[J]. Applied Optics, 2017, 56(25): 7225-7229.
- [31] Yan P, Wang X J, Wang Z H, et al. A 1150-W 1018-nm fiber laser bidirectional pumped by wavelength-stabilized laser diodes [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 0902506.
- [32] Tian J D, Xiao Q R, Li D, et al. Suppressing the amplified spontaneous emission in the high-power 1018-nm monolithic fiber laser by decreasing the feedback from the inner reflections [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2020, 37(8): 2514-2522.
- [33] Platonov N, Shkurikhin O, Fomin V, et al. High-efficient kW-level single-mode ytterbium fiber lasers in all-fiber format with diffraction-limited beam at wavelengths in 1000-1030 nm spectral range[J]. Proceeding of SPIE, 2020, 11260: 1126003.
- [34] 谷炎然, 冷进勇, 肖虎, 等. 5 kW 全光纤结构 1018 nm 激光合成[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(12): 120101.
Gu Y R, Leng J Y, Xiao H, et al. 5 kW all-fiber 1018 nm laser combining[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(12): 120101.
- [35] 肖虎. 掺镱光纤激光级联泵浦技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012.
Xiao H. Study on Yb-doped fiber laser cascade pumping technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [36] Chen X, Yao T F, Huang L J, et al. Functional fibers and functional fiber-based components for high-power lasers[J]. Advanced Fiber Materials, 2023, 5(1): 59-106.
- [37] Xiao H, Leng J Y, Zhang H W, et al. High-power 1018 nm ytterbium-doped fiber laser and its application in tandem pump [J]. Applied Optics, 2015, 54(27): 8166-8169.
- [38] Tao R M, Xiao H, Zhang H W, et al. Dynamic characteristics of stimulated Raman scattering in high power fiber amplifiers in the presence of mode instabilities[J]. Optics Express, 2018, 26(19): 25098-25110.
- [39] Wang Z H, Yu W L, Tian J D, et al. 5.1 kW tandem-pumped fiber amplifier seeded by random fiber laser with high suppression of stimulated Raman scattering[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2021, 57(2): 6800109.
- [40] Mete B, Yeniay A, Ecevit N, et al. High brightness in-band pumped fiber MOPA with output power scaling to >4.6 kW[J]. Applied Optics, 2022, 61(34): 10121-10125.
- [41] Li M J, Chen X, Liu A P, et al. Limit of effective area for single-mode operation in step-index large mode area laser fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(15): 3010-3016.
- [42] Kong L C, Leng J Y, Zhou P, et al. Thermally induced mode loss evolution in the coiled ytterbium doped large mode area fiber [J]. Optics Express, 2017, 25(19): 23437-23450.
- [43] Yang B L, Wang P, Zhang H W, et al. 6 kW single mode monolithic fiber laser enabled by effective mitigation of the transverse mode instability[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 26366-26374.
- [44] Huang Z M, Shu Q, Tao R M, et al. >5 kW record high power narrow linewidth laser from traditional step-index monolithic fiber amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(21): 1181-1184.
- [45] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, et al. All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300-W output power[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(20): 1864-1867.
- [46] Wang Y. Stimulated Raman scattering in high-power double-clad fiber lasers and power amplifiers[J]. Optical Engineering, 2005, 44(11): 114202.
- [47] Shi C, Su R T, Zhang H W, et al. Experimental study of output characteristics of bi-directional pumping high power fiber amplifier in different pumping schemes[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1502910.
- [48] 976 nm-530 W (VBG) [EB/OL]. [2023-03-03]. https://www.bwt-bj.com/product/details64_5922.html.
- [49] EVER BRIGHT. Products center [EB/OL]. [2023-03-03]. <http://www.everbrightphotonics.com/companyfile/3/>.

- [50] Glick Y, Sintov Y, Zuitlin R, et al. Single-mode 230 W output power 1018 nm fiber laser and ASE competition suppression[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(7): 1392-1398.
- [51] Li R X, Wu H S, Xiao H, et al. More than 5 kW counter tandem pumped fiber amplifier with near single-mode beam quality[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 153: 108204.
- [52] Li R X, Wu H S, Xiao H, et al. More than 6 kW near single-mode fiber amplifier based on a bidirectional tandem pumping scheme[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(23): 6804-6810.
- [53] 李瑞显, 吴函烁, 肖虎, 等. 后向同带泵浦光纤激光实现大于 8 千瓦高光束质量输出[J]. *光学学报*, 2022, 42(14): 1436001.
- [54] Li R X, Wu H S, Xiao H, et al. Backward band pumped fiber laser realizes high beam quality output greater than 8 kW[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1436001.
- [54] 肖虎, 李瑞显, 陈子伦, 等. 后向级联泵浦的 10 kW 高光束质量光纤激光器[J]. *光学学报*, 2022, 42(23): 2336001.
- [54] Xiao H, Li R X, Chen Z L, et al. Backward cascade pumped 10 kW high beam quality fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(23): 2336001.
- [55] 吴函烁. 基于部分掺杂光纤的大功率光纤激光器关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2022.
- [55] Wu H S. Research on the key techniques of high power confined-doped fiber laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022.
- [56] Mashiko Y, Nguyen H K, Kashiwagi M, et al. 2 kW single-mode fiber laser with 20-m long delivery fiber and high SRS suppression[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 972805.
- [57] Ikoma S, Nguyen H K, Kashiwagi M, et al. 3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10083: 100830Y.
- [58] Liao L, Zhang F F, He X L, et al. Confined-doped fiber for effective mode control fabricated by MCVD process[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(12): 3244-3249.
- [59] Zhang F F, Wang Y B, Lin X F, et al. Gain-tailored Yb/Ce codoped aluminosilicate fiber for laser stability improvement at high output power[J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20824-20836.
- [60] Wang B, Pang L, Liu J. Single mode 2.4 kW part-doped ytterbium fiber fabricated by modified chemical vapor deposition technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11427: 114271X.
- [61] Huang Z M, Shu Q A, Luo Y, et al. 3.5 kW narrow-linewidth monolithic fiber amplifier at 1064 nm by employing a confined doping fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(10): 2945-2952.
- [62] Wu H S, Li R X, Xiao H, et al. High-power tandem-pumped fiber amplifier with beam quality maintenance enabled by the confined-doped fiber[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31337-31347.
- [63] 吴函烁, 安毅, 肖虎, 等. 国产部分掺杂光纤实现 7 kW 高光束质量激光输出[J]. *中国激光*, 2021, 48(24): 2416002.
- [63] Wu H S, An Y, Xiao H, et al. Realization of 7 kW laser output with high beam quality by domestic partially doped fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(24): 2416002.
- [64] 吴函烁, 李瑞显, 肖虎, 等. 双向级联泵浦部分掺杂光纤实现近 8 kW 高光束质量激光输出[J]. *中国激光*, 2022, 49(7): 0716002.
- [64] Wu H S, Li R X, Xiao H, et al. Two-way cascade pumping partially doped fiber to achieve high beam quality laser output of nearly 8 kW[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(7): 0716002.
- [65] 黄良金, 吴函烁, 李瑞显, 等. 用于 10 kW 级高光束质量激光输出的国产部分掺杂光纤[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(11): 111002.
- [65] Huang L J, Wu H S, Li R X, et al. Domestic partially doped fiber for 10 kW high beam quality laser output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(11): 111002.
- [66] 王小林, 文榆钧, 张汉伟, 等. 变纤芯直径掺镱光纤激光器: 现状与趋势[J]. *中国激光*, 2022, 49(21): 2100001.
- [66] Wang X L, Wen Y J, Zhang H W, et al. Ytterbium-doped core-diameter-variable fiber laser: current situation and development tendency[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(21): 2100001.
- [67] 史尘. 高功率长锥形掺镱光纤放大器研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [67] Shi C. Study on high power long tapered Yb-doped fiber amplifier[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [68] 叶云. 基于变纤芯直径掺镱光纤的高功率光纤激光技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2022.
- [68] Ye Y. Research on high power fiber laser based on ytterbium-doped fiber with variable core diameter[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022.
- [69] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. Single-mode 212 W tapered fiber laser pumped by a low-brightness source[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(13): 1416-1418.
- [70] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. 600 W power scalable single transverse mode tapered double-clad fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1203-1214.
- [71] Filippov V, Kerttula J, Chamorovskii Y, et al. Highly efficient 750 W tapered double-clad ytterbium fiber laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12499-12512.
- [72] Roy V, Paré C, Labranche B, et al. Yb-doped large mode area tapered fiber with depressed cladding and dopant confinement[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10083: 1008314.
- [73] Shi C, Zhang H W, Wang X L, et al. kW-class high power fiber laser enabled by active long tapered fiber[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6(2): e16.
- [74] Huang L, Zhou Z C, Shi C, et al. Towards tapered-fiber-based all-fiberized high power narrow linewidth fiber laser[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, 61(7): 971-981.
- [75] Fedotov A, Noronen T, Gumenyuk R, et al. Ultra-large core birefringent Yb-doped tapered double clad fiber for high power amplifiers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6581-6592.
- [76] Yang B L, Zhang H W, Shi C, et al. High power monolithic tapered ytterbium-doped fiber laser oscillator[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7585-7592.
- [77] Ye Y, Xi X M, Shi C, et al. Comparative study on transverse mode instability of fiber amplifiers based on long tapered fiber and conventional uniform fiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(8): 085109.
- [78] Lai W C, Ma P F, Liu W, et al. 550 W single frequency fiber amplifiers emitting at 1030 nm based on a tapered Yb-doped fiber[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20908-20919.
- [79] Li Y W, Gao C, Liu N A, et al. Fabrication and properties of domestic long tapered ytterbium-doped fiber with high tapering ratio[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12169: 1216999.
- [80] Li W, Ma P F, Chen Y S, et al. 694 W sub-GHz polarization-maintained tapered fiber amplifier based on spectral and pump wavelength optimization[J]. *Optics Express*, 2022, 30(15): 26875-26885.
- [81] Ye Y, Lin X F, Yang B L, et al. Tapered Yb-doped fiber enabled a 4 kW near-single-mode monolithic fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(9): 2162-2165.
- [82] 叶云, 奚小明, 杨保来, 等. 后向泵浦长锥形掺镱光纤实现 6 kW 激光输出[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(10): 20220596.
- [82] Ye Y, Xi X M, Yang B L, et al. Backward pumping long tapered Yb-doped fiber to realize 6 kW laser output[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(10): 20220596.
- [83] Ustimchik V, Chamorovskii Y, Filippov V. High average power (500 W/50 ps) and high peak power (3.2 MW/50 ps) picosecond pulsed MOPA system with tapered double-clad ytterbium fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 11981: 119810T.

- [84] 奚小明, 杨保来, 张汉伟, 等. LD 直接泵浦全光纤激光器输出功率突破 20 kW[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(2): 021001.
Xi X M, Yang B L, Zhang H W, et al. 20 kW monolithic fiber amplifier directly pumped by LDs[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(2): 021001.
- [85] Dong L A, Ballato J, Kolis J. Power scaling limits of diffraction-limited fiber amplifiers considering transverse mode instability[J]. Optics Express, 2023, 31(4): 6690-6703.
- [86] 陶汝茂. 高功率窄线宽近衍射极限光纤激光放大器热致模式不稳定研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
Tao R M. Study on thermal mode instability of high power narrow linewidth near diffraction limit fiber laser amplifier[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [87] 王小林, 王鹏, 吴函烁, 等. LD 泵浦高亮度光纤激光器: 设计、仿真与实现[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 20230242.
Wang X L, Wang P, Wu H S, et al. Design, simulation and implementation of direct LD pumped high-brightness fiber laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(6): 20230242.
- [88] 杨保来, 杨欢, 王鹏, 等. 基于自研光纤的 LD 泵浦光纤激光器实现 10 kW 输出[J]. 中国激光, 2022, 49(20): 2016001.
Yang B L, Yang H, Wang P, et al. LD pumped fiber laser based on self-developed fiber realizes 10 kW output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(20): 2016001.
- [89] Wu H S, Li H B, An Y, et al. Transverse mode instability mitigation in a high-power confined-doped fiber amplifier with good beam quality through seed laser control[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2022, 10(6): e44.
- [90] Li R X, Li H B, Wu H S, et al. Mitigation of TMI in an 8 kW tandem pumped fiber amplifier enabled by inter-mode gain competition mechanism through bending control[J]. Optics Express, 2023, 31(15): 24423-24436.
- [91] Jain D, Baskiotis C, Sahu J K. Mode area scaling with multi-trench rod-type fibers[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1448-1455.
- [92] Jain D, Jung Y, Kim J, et al. Mitigation of TMI in an 8 kW tandem pumped fiber amplifier enabled by inter-mode gain competition mechanism through bending control[J]. Optics Express, 2023, 31: 24423-24436.
- [93] 黄良金. 大功率光纤激光器的模式分解及模式控制[D]. 长沙: 国防科技大学, 2016.
Huang L J. Mode decomposition and mode control of high power fiber laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [94] McComb T S, McCal D, Farrow R, et al. High-peak power, flexible-pulse parameter, chirally coupled core (3C) fiber-based picosecond MOPA systems[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8961: 896112.
- [95] Kanskar M, Zhang J, Koponen J, et al. Narrowband transverse-modal-instability (TMI)-free Yb-doped fiber amplifiers for directed energy applications[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105120F.
- [96] Khitrov V, Minelly J D, Tumminelli R, et al. 3 kW single-mode direct diode-pumped fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8901: 89016V.
- [97] Xu W B, Lin Z Q, Wang M, et al. 50 μm core diameter Yb³⁺/Al³⁺/F⁻ codoped silica fiber with $M^2 < 1.1$ beam quality[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 504-507.
- [98] Beier F, Hupel C, Kuhn S, et al. Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14892-14899.
- [99] Zeng L F, Xi X M, Ye Y, et al. Near-single-mode 3 kW monolithic fiber oscillator based on a longitudinally spindle-shaped Yb-doped fiber[J]. Optics Letters, 2020, 45(20): 5792-5795.
- [100] Zeng L F, Pan Z Y, Xi X M, et al. 5 kW monolithic fiber amplifier employing homemade spindle-shaped ytterbium-doped fiber[J]. Optics Letters, 2021, 46(6): 1393-1396.
- [101] Zhang Z L, Lin X F, Zhang X, et al. Low-numerical aperture confined-doped long-tapered Yb-doped silica fiber for a single-mode high-power fiber amplifier[J]. Optics Express, 2022, 30(18): 32333-32346.
- [102] Ye Y, Lin X F, Xi X M, et al. Novel constant-cladding tapered-core ytterbium-doped fiber for high-power fiber laser oscillator [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9(2): e21.
- [103] Ye Y, Lin X F, Xi X M, et al. Demonstration of constant-cladding tapered-core Yb-doped fiber for mitigating thermally-induced mode instability in high-power monolithic fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2022, 30(14): 24936-24947.
- [104] Nicholson J W, Pincha J, Kansal I, et al. 5 kW single-mode output power from Yb-doped fibers with increased higher-order mode loss[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12400: 1240002.
- [105] Kouznetsov D, Moloney J V. Efficiency of pump absorption in double-clad fiber amplifiers II: broken circular symmetry[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2002, 19(6): 1259-1263.
- [106] Philippe L, Doya V, Philippe R, et al. Experimental study of pump power absorption along rare-earth-doped double clad optical fibres[J]. Optics Communications, 2003, 218(4/5/6): 249-254.
- [107] Koška P, Peterka P, Aubrecht J, et al. Enhanced pump absorption efficiency in coiled and twisted double-clad thulium-doped fibers[J]. Optics Express, 2016, 24(1): 102-107.
- [108] Liu R, Yan D P, Chen M, et al. Enhanced cladding pump absorption of ytterbium-doped double cladding fiber with internally modified cladding structures[J]. Optical Materials Express, 2019, 10(1): 36-45.

Research Progress in Tandem-Pumped High-Power and High-Beam Quality Ytterbium-Doped Fiber Laser

Xiao Hu^{1,2}, Li Ruixian^{1,2}, Wu Hanshuo^{1,2}, Huang Liangjin^{1,2}, Chen Zilun^{1,2}, Yang Huan^{1,2}, Yan Zhiping^{1,2}, Wang Meng^{1,2}, Pan Zhiyong^{1,2}, Wang Zefeng^{1,2*}, Zhou Pu^{1**}, Chen Jinbao^{1,2***}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

²Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract

Significance Compared with the laser diode (LD)-pumped scheme, the tandem-pumped scheme has the advantages of high pump brightness, small quantum defect, and low thermal load, making it the main technical solution for ultra-high power ytterbium-doped fiber lasers (YDFs). Nevertheless, due to the weak absorption of Yb-ions at 1018 nm, it is necessary to enlarge the core diameter or increase the length of YDF to improve the total pump absorption, resulting in more severe nonlinear effects [mainly stimulated Raman scattering (SRS)] and transverse mode instability (TMI). Despite the 20 kW YDFs have been obtained based on YDF with a core diameter of about 50 μm and tandem-pumped scheme, the beam quality is poor for the lacking of efficient mode control. It is very challenging to maintain excellent beam quality with increasing power actually, due to the contradictions between the SRS and TMI suppression strategies. Although IPG photonics has announced a 10 kW single-mode YDFL tandem pumped by 1018 nm YDFs as early as 2009, no other institutions have ever reported >5 kW YDFL with high beam quality ($M^2 < 2$) as of 2021. We presented the research progress on tandem-pumped YDFs achieved by National University of Defense Technology in the past three years. Possible approaches to enhance power and beam quality were also discussed.

Progress To balance high power and high beam quality, we proposed a backward/bidirectional tandem-pumped solution. Although backward/bidirectional pumping schemes are widely applied in LD-pumped laser systems, investigations on their technicalities in tandem-pumped YDFL are very rare in open publications. The primary reason is that in the tandem-pumped YDFL, the 1018 nm fiber laser which functions as the pump source, is highly susceptible to the signal light. Even a small proportion of signal light coupled into the 1018 nm fiber laser might cause significant power decline, even leading to the destruction of the 1018 nm laser. By optimizing the 1018 nm laser oscillator and the backward combiner, we successfully reduced the adverse effects of signal laser on the pump source and ensured the stable operation of the backward/bidirectional pumping system. Then by employing the optimized 1018 nm fiber lasers as a pump source, the benefits of a backward tandem pump were first demonstrated with conventional 25/250 μm YDF. The signal power was boosted to 5 kW ($M^2 = 1.54$) free of TMI or SRS. On the contrary, the SRS threshold of the YDFL was only 3.94 kW when the YDF was forward pumped. Afterward, the bidirectional pump scheme was also tested with 30/250 μm YDF. A 6.22 kW laser output with $M^2 = 1.53$ was obtained by using a 30/250 μm YDF, but further power scaling was limited by SRS. For higher power, the backward pump scheme was applied and the maximum laser power reached 10.03 kW ($M^2 = 1.92$) without SRS or TMI.

In addition to optimizing the pump scheme, special fiber designs were also considered. The geometric or optical structure in the transverse or longitudinal direction of the YDF was modified for SRS suppression and mode control. By using confine-doped YDF (CYDF) of which only part of the core was selectively doped, it was possible to tailor the gain of high-order modes for better beam quality. The influence of key parameters, including the doping ratio, core diameter of CYDF, and mode content of seed laser, on the beam cleanup effect of CYDF was numerically analyzed. According to the simulation, the CYDF with core/inner cladding diameter of 40/250 μm and a relative doping ratio of 0.75 was designed, fabricated, and applied in a backward tandem-pumped YDFL. 10.1 kW laser power at 1080 nm was realized with $M^2 = 2.16$. The beam quality was superior to that of conventional double-clad YDF with an equivalent core diameter. Besides, tapered YDF (TYDF) that has varied core and cladding diameter along the longitudinal direction was also fabricated and used in tandem pump for the first time. The core/inner cladding diameter of the input and output end of the TYDF was 30/250 μm and 48/400 μm respectively. The beam quality of the signal laser was well maintained during the high-power scaling process. The M^2 factor was measured to be about 2.2 at 10.13 kW, which was much better than that of the 48/400 μm YDF drawn from the same fiber preform. Our special structured fibers have demonstrated superior SRS suppression and mode control compared with conventional double-clad fibers.

Conclusions and Prospects Our team has taken a lead in conducting research on high-power backward/bidirectional tandem pumps in China, which has resulted in a significant improvement in the SRS threshold while keeping good beam quality of the YDFL. We have achieved fiber laser output of tens of kilowatts based on conventional YDF, CYDF, and STYDF, with significantly better beam quality than fiber lasers pumped by LD of the same power. However, it should be noted that further improvements to the beam quality and power of the tandem-pumped YDFL still pose significant challenges. Existing solutions have not been able to achieve >10 kW single-mode laser. Next, the team will continue to deepen the research on the evolution of SRS and TMI at extremely high-power levels. The focus of our future work is to improve the pump absorption of the gain fiber, reduce the NA of the core, and increase the loss of higher-order modes. With the help of high-performance gain fibers and advanced fiber optic devices, we hope to steadily improve the output power and beam quality of tandem-pumped YDFLs.

Key words high-power fiber lasers; tandem pump; stimulated Raman scattering; beam quality