

光学学报

3.5 kW 1050 nm 近单模全光纤激光放大器

孟祥明¹, 杨保来^{1,2,3*}, 奚小明^{1,2,3}, 王鹏^{1,2,3}, 史尘^{1,2,3}, 张汉伟^{1,2,3}, 王小林^{1,2,3**}

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

摘要 基于后向泵浦结构搭建了 1050 nm 光纤激光放大器, 将 20/400 μm 的双包层大模场掺镱光纤作为增益光纤, 采用 976 nm 稳波长半导体激光器作为泵浦源。通过优化增益光纤长度, 对短波长光纤放大器中的放大自发辐射效应进行抑制。采取优化种子时序稳定性的方法提升受激拉曼散射效应的阈值, 实现了最高 3.5 kW 的功率输出。在最高输出功率下: 输出激光在 X 方向和 Y 方向的光束质量因子分别约为 1.33 和 1.25, 此时的 3 dB 带宽为 4.07 nm, 光光转换效率为 86.3%; 时域信号稳定, 没有出现模式不稳定现象。

关键词 激光器; 光纤放大器; 放大自发辐射; 受激拉曼散射; 高功率; 近单模

中图分类号 TN242

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230555

1 引言

高功率宽谱光纤激光在光谱合成、非线性频域转换等领域有着重要应用^[1-3]。其中, 光谱合成是提升单纤激光器输出功率的重要方法之一。以往的光谱合成方案多数都是基于窄谱激光光源, 为了保证输出激光的光束质量和激光器的可靠性, 窄谱光源对单路激光线宽的要求更高^[3]。为了降低成本、缓解单路激光压力和提高合成系统的可靠性, 可实现中等功率输出的宽谱激光合成技术成为新的研究热点^[4]。作为光束非相干合成技术的一种, 光谱合成技术又可以分为基于衍射光栅的光束合成、棱镜合成和双色镜合成等^[5]。使用双色镜合成技术, 可以将两台或多台具有不同工作波长的光纤激光器的出射激光, 通过空间光路结构合成一束激光, 实现近单模高功率激光输出。这种技术的优点在于保持单路激光的光束质量, 结构简单灵活, 成本低且可靠性高。由镱离子吸收发射截面曲线^[6]可知, 掺镱增益光纤(YDF)可以提供的输出激光波长范围为 1000~1130 nm, 因此可以把掺镱光纤的输出波段分为短波波段(S)、常规波段(C)和长波波段(L)^[7]。与常规波段放大相比, 短波长放大的量子亏损较低, 使得横向模式不稳定(TMI)效应阈值提升^[8], 但是放大自发辐射(ASE)效应却会严重限制短波长光纤放大器功率的提升^[9]。当激光器输出激光的中心波长位于短波波段(如 1050 nm)时, 1070~1080 nm 的激

光处于镱离子增益峰处, 也会在增益光纤中被放大, 从而诱发很强的 ASE 光, 甚至烧毁激光器^[10]。一般来说, 由于常规波段对掺镱光纤的净增益较大, 对短波波段和长波波段进行放大时都需要考虑 ASE 的影响。

如何抑制 ASE, 是实现短波长光纤激光高功率输出必须要考虑的问题, 国内外已有多家单位围绕此问题展开研究^[11-14]。2016 年, 美国空军研究实验室的 Naderi 等^[11]基于相位调制种子方案, 搭建了 1034 nm 的窄线宽光纤放大器, 通过优化增益光纤长度, 实现了对 ASE 的抑制。2020 年, 中国工程物理研究院的 Chu 等^[12]基于主振荡功率放大器(MOPA)结构, 设计了 1030 nm 的光纤放大器, 通过优化 YDF 的长度来降低泵浦吸收, 对 ASE 进行抑制, 实现了 3.04 kW 的功率输出。2021 年, 天津大学的 Xu 等^[13]在双端泵浦方式下优化增益光纤长度来抑制光纤激光器中的 SRS 和 TMI, 在中心波长 1045.2 nm 处实现了 2.4 kW 的短波长激光输出。2022 年, 南京理工大学的 Zheng 等^[14]基于泵浦共享结构设计了 1050 nm 窄线宽光纤激光器, 通过使用泵浦共享结构和优化增益光纤长度有效抑制了 ASE。对于光纤激光器中的受激拉曼散射(SRS), 可以从光纤设计和系统结构两个方面进行抑制^[15]。从光纤设计角度, 通过控制增益光纤的基质材料^[16]、降低增益光纤的作用长度^[17]、增大模场面积等方法来提高阈值。新型的特种光纤^[18-20]和部分掺杂光纤^[21-22]由于具有特殊的光纤结构, 可以增大模场面积, 在抑制

收稿日期: 2023-02-15; 修回日期: 2023-03-14; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(62005315)

通信作者: *yangbaolai1989@163.com; **chinawxllin@163.com

SRS 方面也有优势。2023 年, Zeng 等^[19]应用纺锤型结构的增益光纤实现了 6 kW 的高功率激光输出, 有效地平衡了 TMI 与 SRS 之间的综合抑制问题。部分掺杂的光纤是通过中心局部掺杂来提高基模的增益, 并降低高阶模的增益。目前, 部分掺杂的光纤已经实现 8 kW 功率的激光输出^[22]。在系统设计中, 常见的抑制 SRS 的方法有使用啾啾倾斜光纤布拉格光栅 (CTFBG)^[23-24]、改变泵浦方式^[25]、优化种子源特性^[26-29] 等。2016 年, Wang 等^[26]采用 1080 nm 的连续种子源搭建了双端泵浦光纤放大器, 通过对比不同种子功率的拉曼阈值, 发现 SRS 阈值与注入的种子光功率成反比。2020 年, Wang 等^[27]通过实验对比得出结论: 其他条件相同时, 不同种子源类型对应的 SRS 阈值不同。种子源时域稳定性的不一致导致 SRS 阈值不同。短波长高功率的宽谱光纤放大器在双色镜合成等领域有着重要应用, 目前公开报道的 1050 nm 波段的光纤放大器输出功率有待提升^[30]。在功率提升过程中, 仍需要综合考虑激光器内 ASE、非线性效应与模式不稳定的综合抑制效果。

本文设计并搭建了一种后向泵浦的 1050 nm 光纤放大器, 通过对激光器的模式不稳定效应、SRS 效应和 ASE 效应的综合抑制, 实现了功率为 3.5 kW 的高效率、高光束质量的光纤激光输出。在最大功率处 X 方向和 Y 方向的光束质量因子分别约为 1.33 和 1.25。该光纤放大器在 3.5 kW 处时域信号稳定, 实验过程中所有器件的温度未出现异常, 实现了稳定激光输出。

2 实验结构

1050 nm 光纤放大器的结构如图 1 所示, 包括两部

分: 种子激光器和放大级。种子激光器的泵浦源由两台 976 nm 稳波长半导体激光器 (LD) 组成, 单个 LD 的最高功率为 250 W。两个 LD 通过 $(2+1) \times 1$ 的侧面泵浦合束器 (S-PC) 耦合进线型谐振腔。谐振腔腔体由低反光纤布拉格光栅 (OC-FBG) 和高反光纤布拉格光栅 (HR-FBG) 构成, 刻蚀光栅的光纤尺寸为 $20/400 \mu\text{m}$ 。HR-FBG 和 OC-FBG 在中心波长 1050 nm 处的反射率分别为 99% 和 9.7%, 3 dB 带宽分别为 4 nm 和 2.05 nm。腔内的掺镱光纤是初始长度为 9 m 的 $20/400 \mu\text{m}$ YDF, 纤芯和内包层的数值孔径 (NA) 分别为 0.06 和 0.46, 其在 976 nm 处的包层吸收系数约为 1.2 dB/m。光纤的最小弯曲直径为 8 cm。高反光栅与包层光滤除器 (CLS-1) 连接, 滤除掉多余的包层光。为了消除端面反射, 此处的光纤切割了 8° 斜角。侧面泵浦合束器的输出纤与放大级的 YDF 熔接, 放大级 YDF 尺寸同样为 $20/400 \mu\text{m}$, 纤芯和内包层的数值孔径分别为 0.065 和 0.46, 其在 976 nm 处的包层吸收系数约为 1.2 dB/m。放大级的光纤长度选取参考文献^[13]和^[14]的研究结果, 最终选定长度为 9 m 的 YDF 进行后续放大器实验, 以保证完全吸收泵浦光。考虑到光纤弯曲对 TMI 抑制效果和光光转换效率的影响^[31-33], 在实验中将放大级的 YDF 弯曲盘绕在水冷板上, 最小弯曲直径为 10.5 cm。YDF 的另一端与 $(6+1) \times 1$ 后向泵浦合束器 (B-PSC) 熔接, 合束器的泵浦臂与 6 个高亮度的 800 W 的 976 nm 稳波长 LD 连接, 泵浦耦合效率大于 97%。合束器输出的激光经过包层 (CLS-2) 滤除后, 从光纤端帽 (QBH) 输出。实验的测试系统由功率计、光谱仪、示波器和光束质量因子测试仪组成。在实验中, 所有实验器件均采用 20°C 水冷。

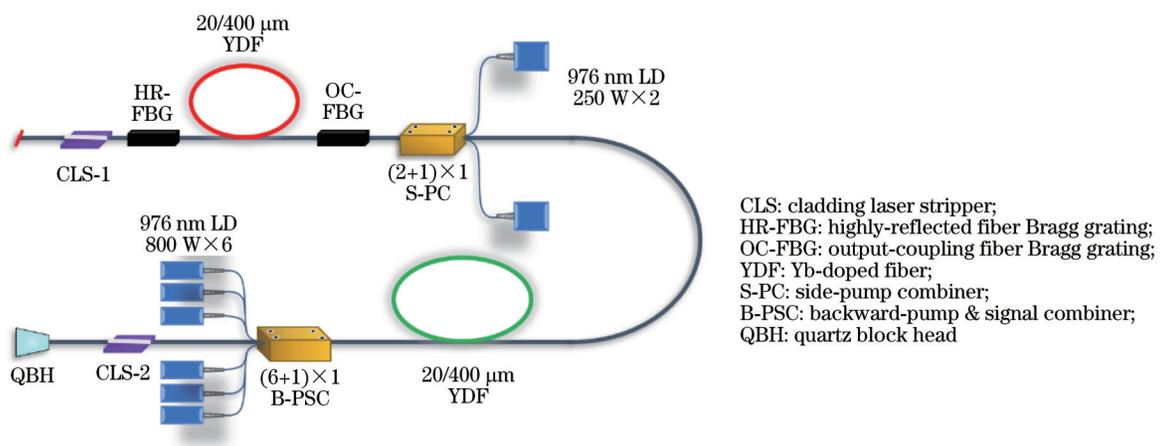


图 1 1050 nm 光纤放大器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of 1050 nm fiber amplifier

3 实验结果与讨论

3.1 优化种子激光器的 YDF 长度抑制 ASE 效应

1050 nm 的光纤放大器需要考虑 1070~1080 nm

处的 ASE, 因此需要选择较短的增益光纤长度来降低此波段的重吸收^[34]。图 2(a) 展示了长度为 9 m 和 4.8 m 的种子 YDF 输出功率曲线, 图 2(b) 展示了长度为 9 m 和 4.8 m 的种子 YDF 输出光谱。采用初始长度

为 9 m 的种子 YDF 进行放大。当种子功率为 140 W、泵浦功率 1350 W 时,输出功率达到 1334 W,从光谱中可以发现 1075 nm 处存在明显的 ASE,其强度约低于信号光强度 37 dB。如果继续进行放大,1075 nm 附近的 ASE 会继续增强,这将会限制功率的提升,甚至损坏器件。根据文献[14]及理论分析结果,缩短光纤长度可以减弱重吸收,有利于抑制 ASE,因此本实验对种子 YDF 进行截短。需要特别说明的是,本实验选择截短种子端的 YDF 长度,而非放大级的 YDF 长度,原因是放大级的 YDF 长度 9 m 已经足够短,为了保证放大级的泵浦光可以被增益光纤充分吸收,因此不再继续缩短此处长度。种子 YDF 在 976 nm 处的吸收系数为 1.2 dB/m,为了保证对泵浦光的吸收,取下约 4.2 m 长的光纤,余下约 4.8 m 继续进行实验。截短 YDF 之

后,先测试种子光谱,没有出现明显变化,表明截短增益光纤长度对种子光谱没有影响。当种子电流达到截短之前的相同水平时,种子输出功率为 133 W,较之前的输出功率 140 W 低了 7 W,说明 YDF 的截短会影响 YDF 对泵浦光的吸收。

为了对比说明,将放大级的泵浦功率增大到截短之前的功率水平(1350 W),并测试此时的光谱,结果如图 2(b)所示。可以发现,1075 nm 处的 ASE 明显降低,此时的输出功率为 1304 W。如图 2(a)所示,当泵浦功率达到 1350 W(截短 YDF 前的功率水平)时,截短 YDF 后输出功率降低了约 30 W,但是激光器整体的斜率效率没有出现太大变化,光谱中的 ASE 却明显降低,并且在实验中继续增大泵浦功率也未产生明显的 ASE 效应。

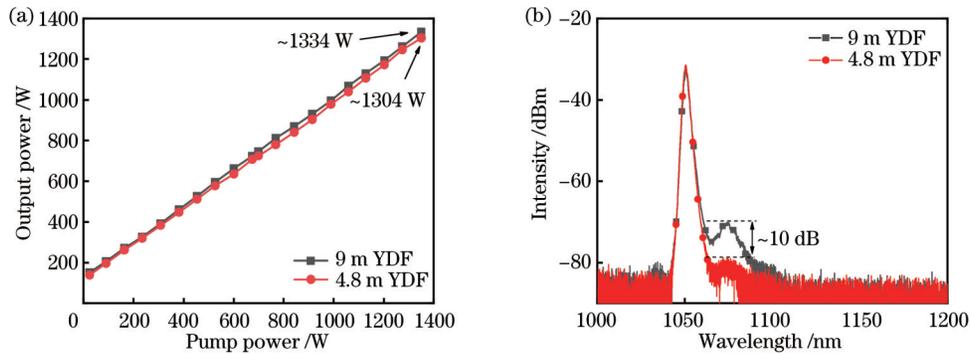


图 2 不同光纤长度的输出特性。(a) 9 m YDF 和 4.8 m YDF 的输出功率曲线;(b) 9 m YDF 和 4.8 m YDF 的输出光谱
Fig. 2 Output performances of fiber with different lengths. (a) Output power curves of 9 m YDF and 4.8 m YDF; (b) output spectra of 9 m YDF and 4.8 m YDF

通过比较不同 YDF 长度的输出特性可知,在此结构的 1050 nm 光纤放大器中,较短的 YDF 有利于减弱 1070~1080 nm 附近的 ASE 效应,提高短波长放大器的 ASE 抑制比。种子 YDF 在 976 nm 处的吸收系数约为 1.2 dB/m,通过理论计算可知,5 m 左右的光纤长度可以保证完全吸收。光纤长度由 9 m 缩短到 4.8 m 后,激光器的斜率效率[图 2(a)]没有出现明显变化。如果继续减小光纤长度,光纤对泵浦光的吸收将会降低,进而导致激光器的效率下降。4.8 m 的 YDF 长度对 ASE 的抑制也达到了预期效果。因此在后续的实验研究中,考虑到光纤对泵浦光的吸收及激光器的效率,将种子 YDF 长度定为 4.8 m,放大级 YDF 长度定为 9 m,未继续缩短种子 YDF 的长度。

3.2 优化种子时序稳定性实现高功率放大

对于单纤的光纤激光器,输出功率的提升主要受限于 SRS 和 TMI 效应。其中,文献[13]和[14]的短波长光纤激光器的功率主要受限于 SRS,主要原因是窄线宽的谐振腔种子存在时序不稳定现象,这种时序不稳定现象降低了放大器的 SRS 阈值,限制了激光器功率的提升^[33, 35]。为了从器件选择上提升种子的时序稳定性,本实验在搭建种子激光器时选用带宽分别为

4 nm 和 2.05 nm 的 HR-FBG 和 OC-FBG。宽带光纤光栅有利于提升种子的时域稳定性,进而提升 SRS 的阈值^[28, 36-37]。在此项工作中,放大级的泵浦方式选用后向泵浦^[36, 38],主要有两个方面的考虑:其一,对于此结构的光纤放大器,后向泵浦的 SRS 阈值显著高于前向泵浦和双端泵浦;其二,由于增益饱和效应,后向泵浦的 TMI 阈值也高于前向泵浦。关于泵浦波长的选择,976 nm LD 泵浦比 915 nm LD 泵浦有更低的量子亏损产热以及更高的效率^[10, 30]。综合考虑,此 1050 nm 光纤放大器的放大级采用 976 nm 后向泵浦。

由于本实验所搭建的光纤放大器采用普通的振荡器作为种子,SRS 阈值与种子的时序稳定性有关,而种子的时序稳定性受种子功率影响。本实验重点研究了种子激光器工作在不同功率水平时激光器的放大特性,尤其是 SRS 的阈值特性。为了对比说明,保持之前的实验条件不变,测试了在相同输出功率水平下种子功率为 133、183、232 W 时放大器的输出特性。输出功率为 2 kW 水平的光谱对比如图 3(a)所示,输出功率为 3 kW 水平的光谱对比如图 3(b)所示。从 2 kW 输出功率水平的光谱可以看到,种子功率为 133、183、232 W 时,对应的 SRS 抑制比分别为 31.78 dB、

44.66 dB 和 49.36 dB。种子功率越大, SRS 的强度越低。当种子功率为 133 W 时, 光谱中的 SRS 强度已经接近 30 dB, 若继续增大泵浦功率, SRS 将成为输出功率的主要限制因素。因此, 当输出功率为 3 kW 时, 仅对比了种子功率为 183 W 和 232 W 时的光谱, 其对应的 SRS 抑制比分别为 29.76 dB 和 34.10 dB。从 3 kW 输出功率的光谱也可以得出种子功率越大、SRS 强度越低的结论。图 3(c) 所示为不同种子功率时的光学转换效率曲线, 可以看到, 随着种子功率的增加, 激光器的效率变化不大。图 3(d) 所示为种子功率及不同种子功率对应的 3 dB 带宽(FWHM)随泵浦电流的变化曲线, 在此图中重点关注 3 dB 带宽随种子功率增大的变化情况。

从图 3 所示的结果可以得到以下结论: 种子功率对于激光器光学转换效率的影响不大, 但对 SRS 强度的影响有所不同; 无论是在 2 kW 输出功率水平还是在 3 kW 水平, SRS 的阈值均随种子功率的增加而增大。

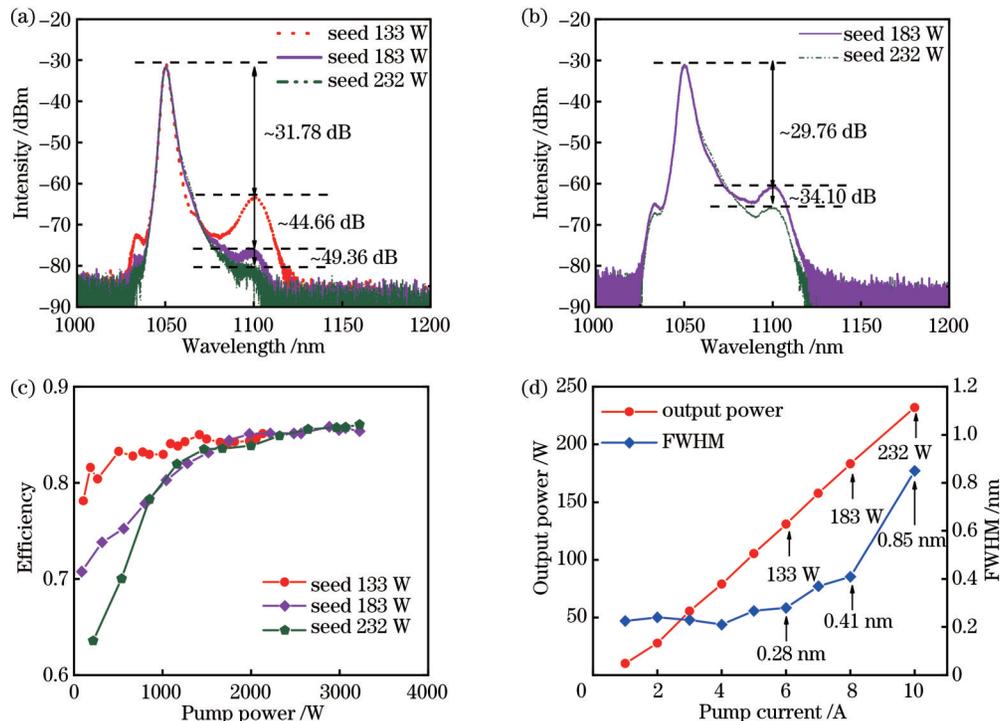


图 3 不同种子功率的输出特性对比。(a) 2 kW 输出功率水平的光谱; (b) 3 kW 输出功率水平的光谱; (c) 光光转换效率; (d) 种子功率及其 FWHM 随泵浦电流的变化曲线

Fig. 3 Comparison of output characteristics of different seed power. (a) Spectra at 2 kW level; (b) spectra at 3 kW level; (c) optical-to-optical conversion efficiency; (d) variation curve of seed power and FWHM with pump current

综上, 最终选择 4.8 m 种子 YDF 长度、9 m 放大器长度、232 W 种子功率进行高功率放大实验, 在此条件下测试激光输出特性。图 4(a) 所示为输出功率和效率曲线, 在 3520 W 最高输出功率下, 光光转换效率为 86.3%。图 4(b) 所示为最高功率时的光谱, 光谱中没有出现 ASE 现象, 输出激光的中心波长为 1050 nm。SRS 的中心波长为 1100 nm, 抑制比约为 27.6 dB, 功

这一结论与 Wang 等^[26]得到的结论“SRS 的阈值功率与注入的种子功率成反比”恰好相反。一方面, 种子的时域稳定性对 SRS 阈值有直接影响^[38], 当种子的时域稳定性较好且不随功率显著变化时, 种子功率越高, SRS 阈值越低; 另一方面, 在本实验中, 种子采用较短的 YDF, 谐振腔的腔长较短。在不同的功率水平下, 谐振腔内起振的纵模数量明显不同, 这在种子输出激光光谱的 3 dB 带宽上也有所体现。如图 3(d) 所示, 种子功率为 133、183、232 W 时, 所对应的 3 dB 带宽分别为 0.28、0.41、0.85 nm。在种子功率增大的过程中, 种子输出光谱的 3 dB 带宽逐渐展宽。种子输出光谱的逐渐展宽, 表示谐振腔内纵模的数量逐渐增加, 纵模间的相位耦合效应也逐渐增强, 种子的时域稳定性随之提高^[27, 35, 39]。其本质机理则是种子的时域稳定性逐渐变好, 功率变化所产生的影响逐渐被抵消。从实验对比结果来看, SRS 的阈值随着种子功率的增加而增大。

率提升受限于 SRS 强度。在最高输出功率下, 光谱的 3 dB 带宽为 4.07 nm。图 4(c) 所示为不同输出功率下的时域信号标准差(STD), 可以通过 STD 数值的变化幅度来判定是否产生 TMI 效应^[40-42]。随着输出功率的增大, STD 始终保持在 0.003 左右的水平, 表明时域信号稳定。在 3520 W 最大输出功率下拷机 5 min, 时域信号依然稳定, 且输出功率和效率没有下降, 说明此时

的功率还未达到 TMI 的阈值功率。图 4(d) 所示为光束质量变化曲线, X 方向和 Y 方向的光束质量因子分

别约为 1.33 和 1.25, 远场光斑形态及光束质量良好。此时 YDF 温度和熔点温度均未超过 40 °C。

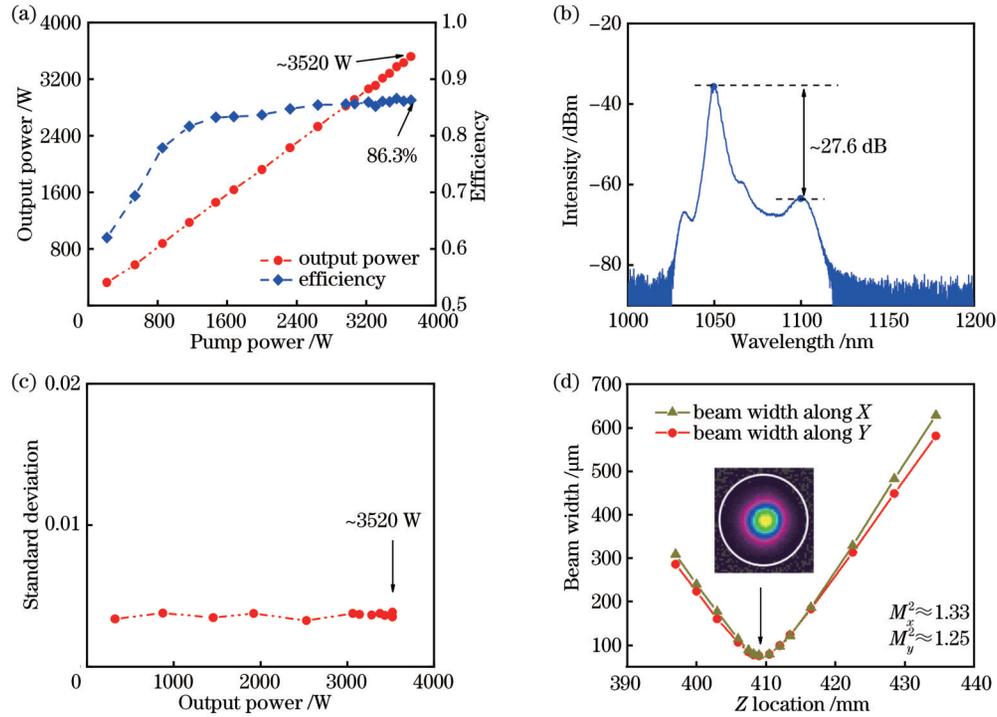


图 4 光纤放大器的输出特性。(a) 输出功率及光光转换效率曲线; (b) 3.52 kW 时的输出光谱; (c) 不同输出功率的时域信号标准差; (d) 3.52 kW 时的光束质量及光斑形态

Fig. 4 Output characteristics of fiber amplifier. (a) Curves of output power and corresponding optical-to-optical conversion efficiency; (b) output spectra at 3.52 kW; (c) STD of normalized PD-signal at different output powers; (d) beam quality and profile at 3.52 kW

首先,在种子 YDF 长度为 9 m、放大级 YDF 长度为 9 m 的情况下进行实验。当输出功率增大到 1 kW 左右时,光谱中出现了明显的 ASE 现象,从而限制了功率提升,因此决定截短光纤来抑制 ASE 效应。参考已报道的研究结果,根据实验的实际情况,确定种子 YDF 的长度为 4.8 m,并进行下一步实验。其次,采用优化种子功率、提升种子时域稳定性的办法,选取 232 W 信号进行放大,在 1050 nm 的光纤激光放大器中实现了 3.52 kW 的宽谱输出。由于采用 976 nm 的 LD 进行后向泵浦,放大级的增益光纤中产生的 SRS 在一定程度上得到抑制。选用 20/400 μm 的光纤并通过弯曲光纤抑制高阶模的产生,实验中不仅未出现模式不稳定现象,还实现了近单模激光输出。

功率的进一步提升受限于泵浦功率准备不足以及 SRS 效应。在 3.52 kW 最高输出功率下,光谱中还存在明显的 SRS 现象,这是因为:一方面,所选取的 20/400 μm 的 YDF 有效模场面积较小;另一方面,实验中使用长度约为 3.5 m 的传能光纤,较长的光纤提高了拉曼增益。对于所搭建的短波长(如 1050 nm)光纤放大器,可以适当缩短传能光纤的长度来抑制 ASE 效应。另外,也可采用更大模场的光纤或新型的特种光纤来提升 SRS 阈值,并同时考虑 TMI 效应的抑制效果,得到更高功率的 1050 nm 波段的激光输出。

4 结 论

短波长高功率光纤放大器在光谱合成等领域有着重要应用,受限于 ASE 和非线性效应,短波长的光纤放大器难以实现更高的功率。采用后向泵浦的方式搭建了 1050 nm 光纤放大器,基于 20/400 μm 的大模场掺镱光纤,通过优化增益光纤长度和种子的时序稳定性,实现了对 ASE、SRS 的抑制。选择合适吸收系数和尺寸的增益光纤,以及对光纤进行弯曲,可有效抑制 TMI 效应。当输出功率达到最大值 3.5 kW 时,光光转换效率为 86.3%,输出激光光谱的 3 dB 带宽为 4.07 nm, X 方向和 Y 方向的光束质量因子分别约为 1.33 和 1.25,拉曼斯托克斯光的强度比信号光强度约低 27.6 dB,此时增益光纤温度和熔点温度均未超过 40 °C。在整个实验过程中,时域信号稳定,未出现模式不稳定现象。总的来说,所搭建的 3.5 kW 1050 nm 宽谱输出光纤放大器可满足光谱合成等领域的需求,在高功率激光器领域有很大的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Taylor L R, Feng Y, Calia D B. 50 W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 8540-8555.

- [2] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 567-577.
- [3] Liu A, Mead R, Vatter T, et al. Spectral beam combining of high-power fiber lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5335: 81-88.
- [4] 姜曼, 马鹏飞, 粟荣涛, 等. 激光光谱合成技术研究进展与展望[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(12): 20201053.
Jiang M, Ma P F, Su R T, et al. Research progress and prospect of spectral beam combining[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201053.
- [5] 何旭宝, 奚小明, 张汉伟, 等. 基于双色镜的光纤激光光谱合成研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0900004.
He X B, Xi X M, Zhang H W, et al. Research progress of fiber laser spectral combining based on dichromatic mirror[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0900004.
- [6] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, et al. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 546-551.
- [7] 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.
- [8] Tao R M, Ma P F, Wang X L, et al. Study of wavelength dependence of mode instability based on a semi-analytical model[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2015, 51(8): 1600106.
- [9] Silva A, Boller K J, Lindsay I D. Wavelength-swept Yb-fiber master-oscillator-power-amplifier with 70 nm rapid tuning range[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10511-10517.
- [10] 罗亿, 王小林, 张汉伟, 等. 光纤放大器放大自发辐射特性与高温易损点位置[J]. *物理学报*, 2017, 66(23): 234206.
Luo Y, Wang X L, Zhang H W, et al. Amplified spontaneous emission characteristics and locations of high temperature vulnerable point in fiber amplifiers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(23): 234206.
- [11] Naderi N A, Dajani I, Flores A. High-efficiency, kilowatt 1034 nm all-fiber amplifier operating at 11 pm linewidth[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 1018-1021.
- [12] Chu Q H, Shu Q, Liu Y, et al. 3 kW high OSNR 1030 nm single-mode monolithic fiber amplifier with a 180 pm linewidth[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(23): 6502-6505.
- [13] Xu Y, Sheng Q, Wang P, et al. 2.4 kW 1045 nm narrow-spectral-width monolithic single-mode CW fiber laser by using an FBG-based MOPA configuration[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(13): 3740-3746.
- [14] Zheng Y H, Han Z G, Li Y L, et al. 3.1 kW 1050 nm narrow linewidth pumping-sharing oscillator-amplifier with an optical signal-to-noise ratio of 45.5 dB[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 12670-12683.
- [15] 张春, 谢亮华, 楚秋慧, 等. 高功率光纤激光受激拉曼散射效应研究新进展[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(2): 126-137.
Zhang C, Xie L H, Chu Q H, et al. Research progress of stimulated Raman scattering effect in high power fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(2): 126-137.
- [16] Ballato J, Cavillon M, Dragic P. A unified materials approach to mitigating optical nonlinearities in optical fiber. I. Thermodynamics of optical scattering[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2018, 9(2): 263-277.
- [17] 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*, 2020, 10(1): 36-45.
- [18] 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.
- [19] Zeng L F, Yang H, Xi X M, et al. Optimization and demonstration of 6 kW oscillating-amplifying integrated fiber laser employing spindle-shaped fiber to suppress SRS and TMI[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 159: 108903.
- [20] Bobkov K K, Andrianov A V, Koptev M Y, et al. Sub-MW peak power diffraction-limited chirped-pulse monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 26958-26972.
- [21] 张志伦, 张芳芳, 林贤峰, 等. 国产部分掺杂光纤实现 3 kW 全光纤激光振荡输出[J]. *物理学报*, 2020, 69(23): 234205.
Zhang Z L, Zhang F F, Lin X F, et al. Home-made confined-doped fiber with 3-kW all-fiber laser oscillating output[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(23): 234205.
- [22] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, et al. 8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 1126022.
- [23] 胡琪浩, 赵晓帆, 田鑫, 等. 基于长周期光纤光栅的受激拉曼散射滤波器[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1806003.
Hu Q H, Zhao X F, Tian X, et al. Stimulated Raman scattering filters based on long period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1806003.
- [24] Zhao X F, Tian X, Hu Q H, et al. Raman suppression in a high-power single-mode fiber oscillator using a chirped and tilted fiber Bragg grating[J]. *Laser Physics Letters*, 2021, 18(3): 035103.
- [25] Chen H, Cao J, Huang Z H, et al. Experimental investigations on multi-kilowatt all-fiber distributed side-pumped oscillators[J]. *Laser Physics*, 2019, 29(7): 075103.
- [26] Wang J M, Yan D P, Xiong S S, et al. High power all-fiber amplifier with different seed power injection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14463-14469.
- [27] Wang Y S, Peng W J, Ke W W, et al. Influence of seed instability on the stimulated Raman scattering of high power narrow linewidth fiber amplifier[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(4): 193.
- [28] Liu W, Ma P F, Lü H B, et al. General analysis of SRS-limited high-power fiber lasers and design strategy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26715-26721.
- [29] Liu W, Ma P F, Lü H B, et al. Investigation of stimulated Raman scattering effect in high-power fiber amplifiers seeded by narrow-band filtered superfluorescent source[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8708-8717.
- [30] 王小林, 张汉伟, 杨保来, 等. 高功率掺镱光纤振荡器: 研究现状与发展趋势[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401004.
Wang X L, Zhang H W, Yang B L, et al. High-power ytterbium-doped fiber laser oscillator: current situation and future developments[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401004.
- [31] Zhang F F, Xu H Z, Xing Y B, et al. Bending diameter dependence of mode instabilities in multimode fiber amplifier[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(3): 035104.
- [32] Tao R M, Su R T, Ma P F, et al. Suppressing mode instabilities by optimizing the fiber coiling methods[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 14(2): 025101.
- [33] Lin H, Tao R, Li C, et al. 3.7 kW monolithic narrow linewidth single mode fiber laser through simultaneously suppressing nonlinear effects and mode instability[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9716-9724.
- [34] Huang Y, Edgcombe J, Holten R, et al. Performance of kW class fiber amplifiers spanning a broad range of wavelengths: 1028 similar to 1100 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8961: 89612K.
- [35] Bock V, Liem A, Schreiber T, et al. Explanation of stimulated Raman scattering in high power fiber systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10512: 10512F.
- [36] Ye Y, Yang B L, Wang X L, et al. Experimental study of SRS threshold dependence on the bandwidths of fiber Bragg gratings

- in co-pumped and counter-pumped fiber laser oscillator[J]. *Journal of Optics*, 2018, 21(2): 025801.
- [37] Xu H Y, Jiang M, Shi C, et al. Spectral shaping for suppressing stimulated-Raman-scattering in a fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3538-3542.
- [38] 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.
- [39] Liem A, Freier E, Matzdorf C, et al. Experimental analysis of the influence of the spectral width of out-coupling fiber Bragg gratings to the amount of stimulated Raman scattering in a cw kW fiber oscillator[C]//Advanced Solid State Lasers 2013, October 27- November 1, 2013, Paris, France. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2013: JTh2A.32.
- [40] Beier F, Möller F, Sattler B, et al. Experimental investigations on the TMI thresholds of low-NA Yb-doped single-mode fibers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1291-1294.
- [41] Johansen M M, Laurila M, Maack M D, et al. Frequency resolved transverse mode instability in rod fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 21847-21856.
- [42] Otto H J, Stutzki F, Jansen F, et al. Temporal dynamics of mode instabilities in high-power fiber lasers and amplifiers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15710-15722.

All-Fiber Laser Amplifier of 3.5 kW and 1050 nm with Near-Single-Mode

Meng Xiangming¹, Yang Baolai^{1,2,3*}, Xi Xiaoming^{1,2,3}, Wang Peng^{1,2,3}, Shi Chen^{1,2,3},
Zhang Hanwei^{1,2,3}, Wang Xiaolin^{1,2,3**}

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;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract

Objective Fiber lasers by laser diode (LD) pumping directly have power scaling due to stimulated Raman scattering (SRS) and transverse mode instability (TMI). Beam combining is an effective way to increase the output power of fiber lasers. Spectral combining is one of the structurally simple and proven effective means. Dichromatic mirror spectral combining technologies employing broad-spectrum laser sources can achieve high efficiency, high beam quality, and high reliability for medium output power. This technology can maintain the beam quality based on flexible structures and low costs. Spectral combining employing dichromatic mirrors requires expanding the central wavelength range. Currently, the output power in short-wavelength fiber lasers cannot meet the requirements of spectral combining. Ytterbium-doped fibers (YDFs) can provide continuous-wave (CW) high-power output mainly focusing on 1030–1100 nm. Short-wavelength fiber amplifiers are susceptible to the amplified spontaneous emission (ASE) effect. ASE and SRS impose serious constraints on the power scaling of short-wavelength fiber lasers. In this paper, a fiber amplifier of 3.5 kW with near-single-mode emitting at 1050 nm is demonstrated. The SRS and ASE suppression methods in short-wavelength fiber lasers are proposed.

Methods The fiber laser amplifier of 1050 nm is constructed by using large-mode-area (LMA) double-cladding YDF in the counter-pump scheme. The core and cladding diameters of the YDF are 20 μm and 400 μm , respectively. The length of gain fiber is optimized to mitigate ASE in short-wavelength fiber amplifiers. The threshold of SRS is raised by optimizing the temporal stability of the seed. The wavelength-stabilized LDs of 976 nm are utilized as the pump source. In order to ensure beam quality, YDF is coiled on a water-cooled plate with a bending diameter of about 8 cm. Employing LDs of 976 nm in the counter-pump and choosing appropriate diameters of YDF can aid TMI mitigation.

Results and Discussions Compared with output characteristics of different YDF lengths (Fig. 2), short YDF is beneficial to mitigate ASE. The 4.8 m-long-YDF of seed can suppress ASE and guarantee the absorption of pump power. The SRS threshold of the fiber amplifier adopting the main oscillator is related to temporal stability. The temporal signal stability of the seed is affected by the seed power. The output spectra of the fiber amplifier are recorded at different seed power (Fig. 3). From the spectra at an output power of 2 kW [Fig. 3(a)], the signal-to-Raman noise ratios (SRNRs) corresponding to the seed power of 133, 183, and 232 W are 31.78 dB, 44.66 dB, and 49.36 dB, respectively. As the seed power gets higher, the intensity of SRS gets lower. The spectra at the output power of 3 kW are compared with the seed power of 183 W and 232 W [Fig. 3(b)]. The corresponding SRNRs are 29.76 dB and 34.10 dB, respectively. From the comparison results, the SRS threshold is positively proportional to the seed power. During the increase in seed power,

the bandwidth of 3 dB gradually broadens. The broadening of seed spectra indicates that the number of longitudinal modes gradually increases, which leads to an increase in temporal stability. Figure 4(a) shows output power and conversion efficiency corresponding to different pump power. The optical-to-optical conversion efficiency is 86.3% at the maximum output power of 3520 W. The spectrum at the maximum output power is shown in Fig. 4(b). The center wavelength is 1050 nm with an SRNR of 27.6 dB. Figure 4(c) shows the time-domain signal standard deviation (STD) at different output power. With the increase in the output power, the STD always remains at the level of about 0.003 without any features of TMI. Figure 4(d) shows the beam quality of the laser at the highest output power. The beam quality factors in X and Y directions are about 1.33 and 1.25, respectively.

Conclusions Short-wavelength high-power fiber amplifiers have important applications in fields such as spectral combining. Limited by ASE and SRS, it is difficult to achieve higher power. In this manuscript, a monolithic fiber amplifier of 1050 nm is demonstrated in a counter-pump based on an LMA gain fiber of 20/400 μm . The suppression of ASE in 1070–1080 nm is achieved by shortening the gain fiber length. The temporal stability of the seed is optimized to mitigate the SRS effect. At the maximum output power of 3.5 kW, the optical-to-optical conversion efficiency is 86.3%, and the bandwidth of the output laser spectrum of 3 dB is 4.07 nm. The beam quality factors M^2 in the X and Y directions are about 1.33 and 1.25, respectively. The intensity of Raman Stokes light is about 27.6 dB lower than the signal light intensity. The fiber amplifier of 3.5 kW and 1050 nm meets the needs of spectral combining and has great potential for application in the field of high-power lasers.

Key words lasers; fiber amplifier; amplified spontaneous emission; stimulated Raman scattering; high power; nearly single mode