

4.5 kW, 1050 nm 双端输出近单模全光纤激光振荡器*

李科¹⁾ 叶云^{1)2)†} 李欣然¹⁾ 丁欣怡¹⁾ 徐小勇¹⁾²⁾
栗荣涛^{1)2)‡} 王小林¹⁾²⁾ 宁禹¹⁾²⁾ 习锋杰¹⁾²⁾

1) (国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

2) (国防科技大学, 南湖之光实验室, 长沙 410073)

(2025 年 1 月 16 日收到; 2025 年 2 月 28 日收到修改稿)

随着工业应用对激光器性能要求的不断提高, 基于单一谐振腔结构实现两路激光同步输出的双端输出光纤激光器具有广阔的应用前景. 本文首先基于光纤稳态速率方程建立了 1050 nm 双端输出振荡器理论模型, 仿真分析增益光纤长度与输出功率、效率和受激拉曼散射效应强度间的关系. 实验上搭建中心波长为 1050 nm 的高功率双端输出全光纤激光振荡器, 详细研究了不同泵浦方式下 (单向泵浦、双向泵浦) 1050 nm 双端输出光纤激光器的输出特性. 在总泵浦功率为 5262 W 时, 首次实现了 A 端输出功率 1419 W, B 端输出功率 3051 W, 总输出功率为 4470 W 的 1050 nm 近单模双端激光输出, 激光器光光转换效率达到 84.9%, A 端和 B 端测得的光束质量因子 M^2 分别为 1.27 和 1.31. 进一步优化增益光纤长度, 有效抑制了放大自发辐射和受激拉曼散射效应, 最大输出功率下 A 端和 B 端的拉曼抑制比分别提升约 6.6 dB 和 8.1 dB. 实验结果为设计和实现高功率高光束质量短波长双端输出光纤激光器提供参考.

关键词: 双端输出, 光纤振荡器, 近单模, 受激拉曼散射

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.74.20250072

CSTR: 32037.14.aps.74.20250072

1 引言

高功率掺镱光纤激光器凭借其结构紧凑、时序逻辑简单、热管理方便、功率拓展性强等优势, 在工业加工、材料处理、生物医药、航空航天等领域得到了广泛应用^[1-3]. 然而随着输出功率的不断提高, 光纤中的非线性效应, 如受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS), 受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS), 以及横向模式不稳定效应 (transverse mode instabi-

lity, TMI) 等成为近衍射极限光纤激光器功率提升的主要限制因素^[4-6]. 为获得更高功率输出, 通过光谱扩展实现光谱合成是提升光纤激光器输出功率的重要方法之一^[7,8]. 对于掺镱光纤来说, 工作在 1060—1080 nm 的常规波长光纤激光器已经实现了数十千瓦近单模激光输出^[9,10], 而波长小于 1060 nm 的短波长光纤激光器由于重吸收作用受到严重的放大自发辐射效应 (amplified spontaneous emission, ASE) 限制, 功率提升相对缓慢.

近年来, 国内外多家研究机构对短波长光纤激光器开展了一定的研究. 2011 年, Schmidt 等^[11]

* 湖南省杰出青年基金 (批准号: 2023JJ10057) 和长沙市优秀青年创新人才培养计划 (批准号: kq2305038) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yeyun2015@163.com

‡ 通信作者. E-mail: surongtao@126.com

在激光波长为 1030 nm 处实现了最高输出功率为 697 W 的激光输出, 有效地抑制了放大自发辐射. 2016 年, Roman 等^[12]报道了一种基于相位调制的单频激光器, 在 1030—1070 nm 的工作波长内实现平均输出功率均超过 1.5 kW, 在 1032 nm 波段输出功率达 1.8 kW, 仅受限于泵浦功率, 而在波长 1044 nm 和 1061 nm 处输出功率仅为 1.6 kW 和 1.48 kW. 同年, 孙殷宏等^[13]基于主振荡功率放大 (master oscillator power amplifier, MOPA) 结构搭建了中心波长为 1030 nm 的光纤激光放大器, 通过对结构的优化实现了最高功率为 1.01 kW 的激光输出. 2020 年, Chu 等^[14]基于光谱操控、放大级系统参数优化和模式控制等关键技术, 搭建了 1030 nm 窄线宽光纤放大器, 最高输出功率达到 3 kW, 信噪比达到了 37 dB. 2021 年, Xu 等^[15]基于 MOPA 结构实现 2.4 kW 的 1045 nm 的近单模窄线宽光纤激光功率输出, 拉曼信噪比约 33 dB, 结构通过优化增益光纤长度来抑制 SRS 和 TMI. 2022 年, Zheng 等^[16]提出了基于泵浦共享结构的 1050 nm 窄线宽光纤激光器, 即种子和主放大级之间没有包层光滤除装置, 振荡器和放大器之间可以共用泵浦光, 利用此结构可以有效抑制 ASE, 在最大输出功率 3.1 kW 处, 信噪比达到 45.5 dB, 光束质量因子 $M^2 \sim 1.33$.

上述报道的短波长光纤激光器都是采用单端输出形式, 由于短波长光纤激光器具有较宽的吸收截面, 更容易受到 ASE 和 SRS 效应影响^[17,18], 一定程度上限制了短波长光纤激光器的发展. 而双端输出光纤激光器功率分布更均衡, 减小了腔内的功率密度, 有利于提升非线性阈值. 同时, 双端输出的光纤激光器仅需一个谐振腔就能实现两路激光输出, 与单端输出的光纤激光器相比, 减少了器件数量, 简化了冷却装置和控制系统, 在降低系统成本的同时压缩了系统体积和重量. 根据其输出特性可以广泛应用于工业加工与制造, 材料处理和 3D 打印等领域, 可实现高功率并行加工, 提高效率. 在对光束质量要求不高时, 采用双端输出光纤激光器通过功率合束等技术, 能够实现更高的功率输出^[9], 具有更加广阔的工业应用前景. 2004 年, Liu 等^[19]基于纤芯为 20 μm 的双包层掺镱光纤 (YDF), 实现了最高输出功率为 810 W 的空间结构光纤激光振荡器, 掺镱光纤的两端切平角, 分别提供

3.5% 的非涅尔反射, 形成振荡腔, 由于没有高反和低反之分, 实现了掺镱光纤两端激光输出. 2018 年, 王小林等^[20]提出了一种双端输出的线性腔全光纤激光振荡器结构, 该结构利用低反射率光栅代替高反射率光栅, 从而实现全光纤激光器的双端功率输出. 2022 年, Zhong 等^[21]基于该线性腔双端输出光纤激光振荡器结构, 首次实现中心波长为 1080 nm 的 2×2 kW 双端激光输出. 2023 年, Liu 等^[22]基于纤芯/包层直径为 30/400 μm 的双包层掺镱光纤实现了中心波长为 1070 nm 的 2×4 kW 双端激光输出, 最高输出功率时两端输出激光的光束质量 M^2 分别约为 2.13 和 2.36, 没有观察到 SRS 和 TMI 现象. 然而当前已有研究中, 双端输出光纤激光器都是集中在常规波段, 短波长双端输出相关研究尚未开展, 双端输出体制下的短波长光纤激光器输出特性和非线性效应演化仍然值得探索.

本文对中心波长为 1050 nm 的双端输出光纤激光振荡器输出特性进行研究, 首先基于光纤速率方程构建了 1050 nm 双端输出光纤激光器理论模型, 理论分析了 1050 nm 双端输出光纤振荡器中增益光纤长度与输出特性和非线性效应之间的影响规律. 然后, 基于纤芯/内包层直径为 20/400 μm 的双包层掺镱光纤搭建了 1050 nm 双端输出光纤激光振荡器实验装置, 研究了不同泵浦方式下 1050 nm 双端输出光纤激光器的输出特性. 实验上首次实现了总输出功率约为 4470 W 的双端 1050 nm 近单模激光输出, 两端光束质量因子 M^2 约为 1.27 和 1.31. 最后优化谐振腔增益光纤长度, 进一步抑制了激光器的 ASE 和 SRS 效应, 在最大输出功率 4.5 kW 时, A 端和 B 端的 SRS 抑制比分别提升约 6.6 dB 和 8.1 dB.

2 理论与仿真

2.1 理论模型

为研究 1050 nm 双端输出光纤激光振荡器的输出特性, 基于稳态速率方程构建双端输出光纤激光振荡器的仿真模型, 连续输出的光纤激光器在稳态条件时, 考虑放大自发辐射和受激拉曼散射的影响, 在增益光纤中, 上能级粒子数、泵浦光和信号光功率的速率方程可以表示如下, 方程中主要参数的物理含义在表 1 列出.

$$\begin{aligned} \frac{N_2}{N_0} = & \left\{ \frac{\Gamma_p}{hcA_{\text{eff}}} \sum_{m=1}^M \lambda_m^p \sigma_m^{\text{ap}}(\lambda_m^p) [P_m^{\text{p}+}(\lambda_m^p, z) + P_m^{\text{p}-}(\lambda_m^p, z)] + \frac{\Gamma_s}{hcA_{\text{eff}}} \sum_{n=1}^N \lambda_n^s \sigma_n^{\text{as}}(\lambda_n^s) [P_n^{\text{s}+}(\lambda_n^s, z) + P_n^{\text{s}-}(\lambda_n^s, z)] \right\} \\ & \times \left\{ \frac{\Gamma_p}{hcA_{\text{eff}}} \sum_{m=1}^M \lambda_m^p [\sigma_m^{\text{ap}}(\lambda_m^p) + \sigma_m^{\text{ep}}(\lambda_m^p)] [P_m^{\text{p}+}(\lambda_m^p, z) + P_m^{\text{p}-}(\lambda_m^p, z)] \right. \\ & \left. + \frac{\Gamma_s}{hcA_{\text{eff}}} \sum_{n=1}^N \lambda_n^s [\sigma_n^{\text{as}}(\lambda_n^s) + \sigma_n^{\text{es}}(\lambda_n^s)] [P_n^{\text{s}+}(\lambda_n^s, z) + P_n^{\text{s}-}(\lambda_n^s, z)] + \frac{1}{\tau} \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $N_0 = N_1 + N_2$,

$$\pm \frac{dP_m^{\text{p}\pm}(\lambda_m^p, z)}{dz} = \Gamma_p [\sigma_m^{\text{ep}}(\lambda_m^p) N_2(z) - \sigma_m^{\text{ap}}(\lambda_m^p) N_1(z)] P_m^{\text{p}\pm}(\lambda_m^p, z) - \alpha_m^p(\lambda_m^p) P_m^{\text{p}\pm}(\lambda_m^p, z), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_n^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, z)}{dz} = & \Gamma_s [\sigma_n^{\text{es}}(\lambda_n^s) N_2(z) - \sigma_n^{\text{as}}(\lambda_n^s) N_1(z)] P_n^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, z) - \alpha_n^s(\lambda_n^s) P_n^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, z) + 2\sigma_n^{\text{es}}(\lambda_n^s) N_2(z) \frac{hc^2}{(\lambda_n^s)^3} \Delta\lambda \\ & + \Gamma_n^s(\lambda_n^s) P_n^{\text{s}\pm}(\lambda_n^s, z) \sum_{i=1}^N \frac{1}{A_{\text{eff}}^{i,n}} g_{\text{R}}(\omega_i - \omega_n) [P_i^{\text{s}+}(\lambda_i^s, z) + P_i^{\text{s}-}(\lambda_i^s, z)]. \end{aligned} \quad (3)$$

表 1 速率方程主要参数

Table 1. Main parameters of the rate equation.

物理量	物理意义	物理量	物理意义
R	反射率	N_2	激发态粒子数
Z	增益光纤纵向坐标	N_1	基态粒子数
m	泵浦光波长序数	N_0	掺杂离子浓度
n	信号光波长序数	g_{R}	拉曼增益系数
A_{eff}	纤芯有效面积	σ_n^{es}	第 n 个信号光吸收截面
Γ_s	信号光填充因子	σ_n^{as}	第 n 个信号光发射截面
Γ_p	泵浦光填充因子	$\alpha_n^p(\lambda_n^p)$	信号光损耗系数

图 1 为双端输出光纤振荡器的简化结构图, 该结构的谐振腔取一段长度为 L 的增益光纤, 定义最左端 $z = 0$, 最右端 $z = L$, 从左向右传输的泵浦和信号光为正向传输, 从右向左传输的泵浦和信号光为反向传输. 在谐振腔内传输正向信号光 $P_n^{\text{s}+}(\lambda_n^s, 0)$ 和反向信号光 $P_n^{\text{s}-}(\lambda_n^s, L)$ 满足速率方程

(3). 其中光纤光栅 (FBG) 反射率 $R_a(\lambda_n^s)$ 和 $R_b(\lambda_n^s)$ 是需要设置的参数, 如将两光栅的反射率均设为小于 1 的值, 则谐振腔两端都有激光透射, 此时可实现双端激光输出, 结合边界条件 (4) 式—(7) 式选择合适的数值仿真算法可进行求解.

$$P_n^{\text{s}+}(\lambda_n^s, 0) = P_n^{\text{s}-}(\lambda_n^s, 0) R_a(\lambda_n^s), \quad (4)$$

$$P_n^{\text{s}-}(\lambda_n^s, 0) = P_n^{\text{s}-}(\lambda_n^s, 0) [1 - R_a(\lambda_n^s)], \quad (5)$$

$$P_n^{\text{s}-}(\lambda_n^s, L) = P_n^{\text{s}+}(\lambda_n^s, L) R_b(\lambda_n^s), \quad (6)$$

$$P_n^{\text{s}+}(\lambda_n^s, L) = P_n^{\text{s}+}(\lambda_n^s, L) [1 - R_b(\lambda_n^s)]. \quad (7)$$

2.2 仿真分析

本节主要研究了 1050 nm 双端输出光纤激光振荡器中增益光纤长度对输出功率、效率和 SRS 强度的影响. 表 2 列出了数值仿真中使用的各器件参数.

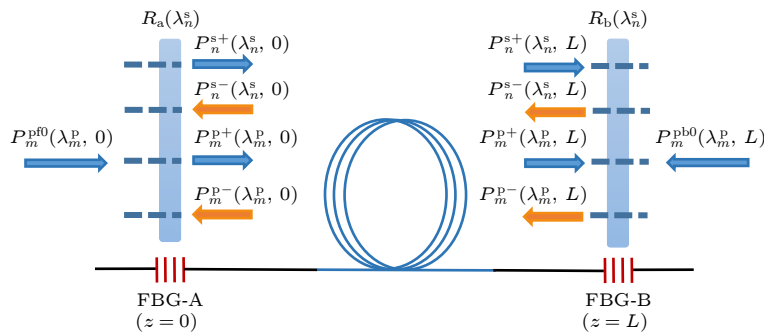


图 1 双端输出光纤振荡器仿真简化结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the simulation simplified structure of bidirectional output fiber oscillator.

表 2 仿真主要参数
Table 2. Simulation parameter.

主要参数	值
信号光中心波长/nm	1050
泵浦光中心波长/nm	976
总泵浦功率/W	6000
纤芯/内包层/ μm	20/400
泵浦吸收系数	0.44 dB/m@915 nm
增益光纤长度/m	16.6/14.6/12.6/10.6/8.6
FBG-A的反射率/%	10
FBG-B的反射率/%	10
FBG-A的半高全宽/nm	2
FBG-B的半高全宽/nm	2

仿真结果如图 2 所示, 在两端泵浦功率均为 3000 W, 最高总泵浦功率为 6000 W 时, 不同增益光纤长度对输出功率及效率的影响如图 2(a) 所示, 由于增益光纤长度越短, 泵浦吸收越少, 两端输出功率、总输出功率以及光光转换效率均随光纤长度减小而降低. 整体来说, 两端输出功率差异较小, 光光转换效率均在 85% 以上. 由图 2(a) 可知, 增益光纤长度为 14.6 m 和 16.6 m 时激光器输出功率和效率相近, 考虑非线性效应等影响, 光纤长度选定为 14.6 m 进行研究. 在增益光纤长度为 14.6 m 时采用双向泵浦方式下 A, B 两端输出光谱如图 2(b) 所示, 两光谱几乎重合. 不同增益光纤长度对受激拉曼散射强度的影响如图 2(c) 所示, 受激拉曼散射强度随增益光纤长度减小而降低, 在截短增益光纤 2 m, 4 m 和 6 m 的情况下拉曼抑制比分别提升了约 6.3 dB, 12.5 dB 和 18.9 dB. 在相同条件下, 通过截短增益光纤长度对 SRS 有一定抑制效果.

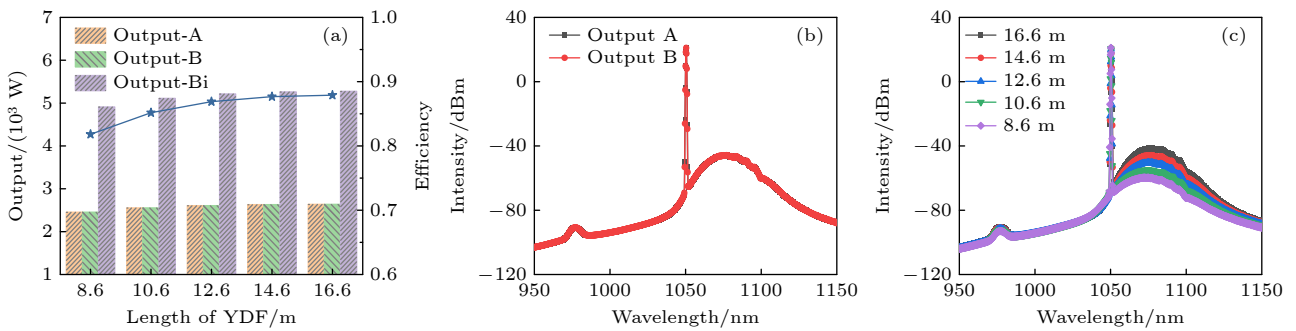


图 2 (a) 输出功率及效率随 YDF 长度变化情况; (b) 双向泵浦下两端输出光谱; (c) 不同增益光纤长度下光谱对比

Fig. 2. (a) Output power and optical efficiency versus with the length of the YDF; (b) output spectrum under bidirectional pump; (c) spectral comparison at different gain fiber lengths.

3 实验与分析

3.1 实验装置

图 3 为双向泵浦的 1050 nm 双端输出光纤激光振荡器实验结构示意图, 该结构由一对光纤布拉格光栅和一段增益光纤组成谐振腔. 实验中采用的增益光纤为 20/400 μm 的双包层掺镱光纤, 光纤长度约为 14.6 m, 该光纤的泵浦吸收系数为 0.44 dB/m@915 nm, 数值孔径约为 0.061, 为了实现有效的模式控制, 将增益光纤弯曲盘绕在跑道型水冷板上, 光纤盘绕的最小弯曲直径约为 10.8 cm, 最大弯曲直径约为 13 cm. 泵浦源采用中心波长为 976 nm 的稳波长半导体激光器 (LD), 每组 LD 可提供最大泵浦功率约为 600 W. 泵浦光通过前向和后向 (6+1) $\times$ 1 泵浦信号合束器 (PSC) 耦合进谐振腔, 合束器的泵浦注入纤和信号输出纤的纤芯/包层直径分别为 220/242 μm 和 20/250 μm , 信号注入纤的纤芯/包层直径为 20/400 μm . 前/后向合束器的 5 根泵浦尾纤分别与 LD 连接, 剩余 1 根泵浦纤切平角由 600 W 功率计监测回光功率. 谐振腔腔体由一对低反光纤光栅构成, 低反光纤光栅分别与增益光纤的两端连接, 光纤光栅的纤芯/包层直径为 20/400 μm , 其中心波长约为 1050 nm, 反射率约为 10%, 3 dB 带宽约为 2 nm. 谐振腔内产生的激光经过两端低反射率光栅的透射后输出, 经过一段自制的长度约为 15 cm 的包层光滤除器 (CLS) 滤除残余泵浦光后, 由纤芯/包层直径为 25/400 μm 的光纤端帽 (QBH) 进行激光输出. 经 QBH 输出的激光扩束后进入测试系统, 测量其输出功率, 输出光谱, 光束质量和时频特性等. 实验测试系统由

功率计、光谱仪、示波器和光束质量因子测试仪组成,实验过程中水冷温度均设置为 20 °C.

3.2 实验结果与分析

在 1050 nm 双端输出光纤振荡器实验中,首先采用单向泵浦方式对激光器的输出特性进行研究,在 A 端泵浦方式下,当注入的泵浦功率为 2396 W 时,两端总输出功率达到 1943 W,其中 A 端输出功率为 515 W, B 端输出功率为 1428 W,此时光光转换效率为 81.1%,如图 4(a) 所示. 实验中单向泵浦注入方式下,两端输出功率差异主要与器件差异和熔接损耗相关,其中两个低反光栅的反射率虽然相近,但 B 端低反光栅测得的反射谱较窄,使谐振腔内更多的信号激光从 B 端透射出去,从而导致 B 端的输出功率更高,两端的熔接损耗也是造成功率差异的原因. 当输出功率接近 1.94 kW 时,随着进一步增大 A 端的泵浦功率, A, B 两端输出功率出现明显的滞涨,对应的光光转换效率出现下降. 在此功率水平下,测得 A 端的时域信号和对应的傅里叶变化频谱如图 4(b) 所示,可以看出,此时时域信号出现轻微波动,同时傅里叶频

谱图上在 0.785 kHz 出现了频率尖峰. 结合输出功率的滞涨和傅里叶频域信号的特征峰,可以判断此时该激光器出现了 TMI 效应,且 TMI 阈值约为 1.94 kW.

考虑在双端输出光纤振荡器中,相同泵浦波长下双向泵浦方式与单向泵浦相比可以显著提升 TMI 阈值^[23],因此采用双向泵浦方式来进行进一步提升输出功率,双向泵浦实验结果如图 5 所示. 此时两端输出功率和总输出功率随着泵浦功率的增加呈线性增长,且 B 端输出功率仍然高于 A 端,这与单向泵浦时候的情况一致. 随着泵浦功率增大,激光器光光效率整体保持在 80%—85% 之间. 在双端最高总泵浦功率为 5262 W, A 端的输出功率为 1419 W, B 端的输出功率为 3051 W,此时双端输出总功率为 4470 W,如图 5(a) 所示,光光转换效率为 84.9%. 在最高输出功率测得的输出激光时域信号和对应的傅里叶频域如图 5(b) 所示,可以看到 A, B 两端的时域信号保持稳定,对应的傅里叶频谱没有观察到特征尖峰,表明此时该激光器没有发生 TMI 效应. 在最高输出功率下,采集 A, B 两端输出光谱图如图 5(c) 所示,可以看到信号激光中心波长在

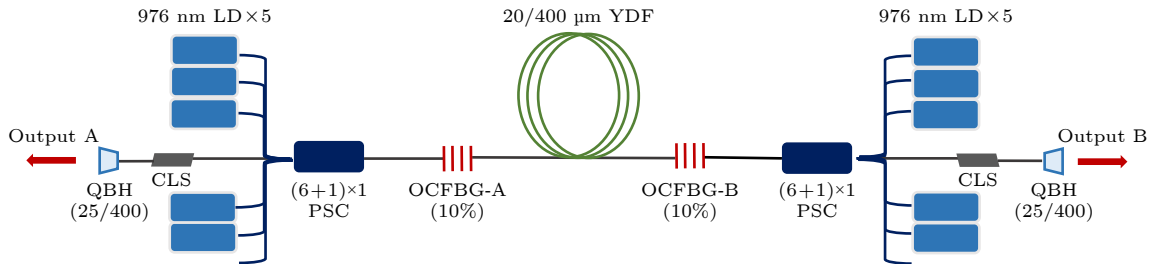


图 3 1050 nm 双端输出光纤激光振荡器实验结构

Fig. 3. Experimental setup of 1050 nm bidirectional output fiber laser oscillator.

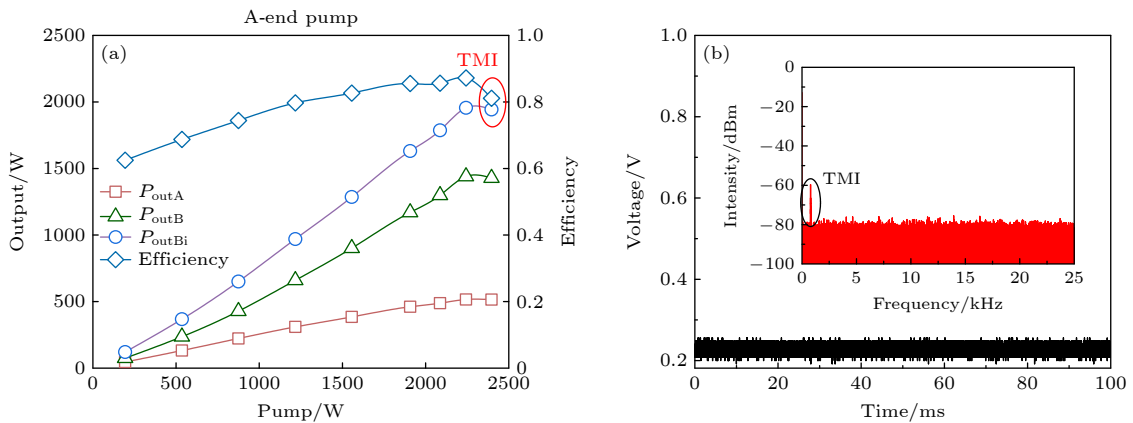


图 4 A 端泵浦方式下的实验结果 (a) 输出功率及效率; (b) 时域信号, 插图为傅里叶频谱图

Fig. 4. Experimental results under A-end pump: (a) Output power and efficiency; (b) temporal signal (inset: Fourier spectrum).

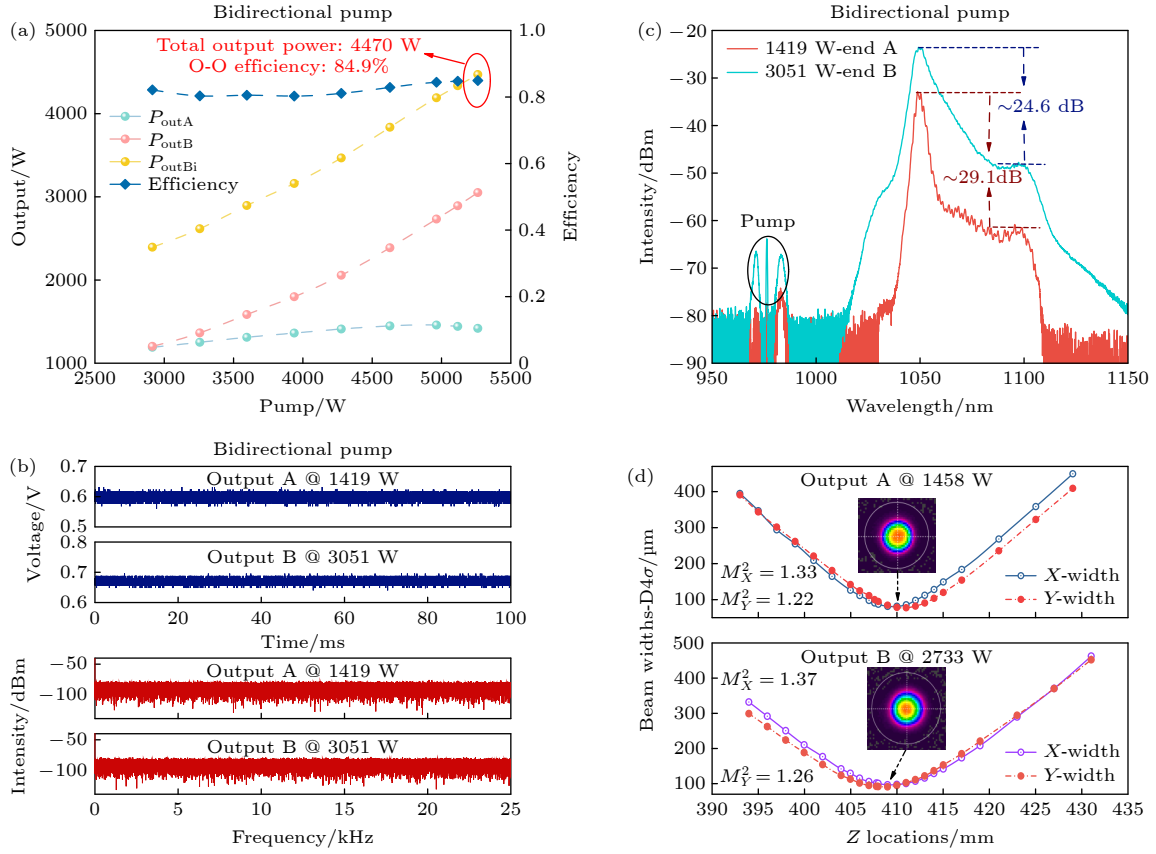


图 5 双向泵浦方式下的实验结果 (a) 输出功率及效率; (b) 时域信号和频谱图; (c) 两端输出光谱; (d) 两端光束质量

Fig. 5. Experimental results under bidirectional pump: (a) Output power and efficiency; (b) temporal signal and Fourier spectrum; (c) output spectra of two ends; (d) beam quality of two ends.

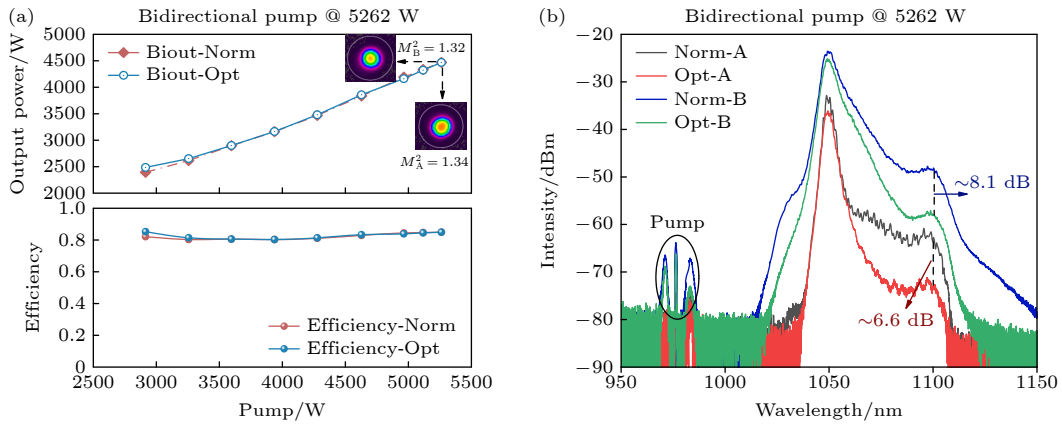


图 6 (a) 双向泵浦下结构优化前后输出功率及效率对比; (b) 双向泵浦方式下两端输出光谱

Fig. 6. (a) Comparison of output power and efficiency before and after structure optimization under bidirectional pump; (b) output spectrum of both ends under bidirectional pump.

1050 nm, 由于镱离子对 1050 nm 短波长激光有一定的重吸收作用, 在光谱上出现了较强的 ASE 效应, 且光谱存在严重展宽. 另外从输出光谱图上可以看到在 1100 nm 附近出现明显的 SRS 效应, 在最大输出功率时, A 端输出光谱的拉曼抑制比约为 29.1 dB, B 端拉曼抑制比约为 24.6 dB. 在输出

功率为 1458 W 和 2733 W 时测得的光束质量和光斑轮廓如图 5(d) 所示, 光束质量 M^2 因子 M_A^2 约为 1.27, M_B^2 约为 1.31, 束腰处的光斑轮廓近似高斯形态, 表明该激光器具有良好的光束质量, 光束质量差异主要由两端熔接差异引起.

为了进一步抑制非线性效应, 根据仿真结果综

合考虑增益光纤长度对输出功率、效率和 SRS 效应的影响, 对实验结构进行优化. 由于输出功率及效率随光纤长度减小而降低, 为实现更高功率输出并达到良好的非线性效应抑制效果, 选择将 YDF 截短 2 m, 光纤长度由 14.6 m 变为 12.6 m, 其余实验条件保持不变. 在同样采用双向泵浦方式, 总泵浦功率为 5262 W 时, 双端总输出功率为 4468 W, 与结构优化前相比两端输出功率及整体光光转换效率差异较小, 如图 6(a) 所示, 两端光束质量 M^2 因子分别为 1.34 和 1.32, 远场光斑与光束质量良好. 结构优化前后两端光谱对比如图 6(b) 所示, 由两端光谱可以看出, 与优化增益光纤长度前相比, 激光器 SRS 得到显著抑制, 由 ASE 引起的光谱展宽现象也有一定的改善, 在最高输出功率处 A 端拉曼抑制比提升约 6.6 dB, B 端拉曼抑制比提升约 8.1 dB. 由此可得结论, 缩短增益光纤长度可以有效抑制双端输出短波长光纤振荡器中的拉曼效应. 虽然 SRS 得到一定抑制, 但由于选取的 20/400 μm 掺镱光纤有效模场面积较小, 在双端输出最高功率时光谱中仍存在明显的 SRS 现象, 限制了功率的进一步提升.

4 结 论

基于 1050 nm 双端输出光纤激光振荡器结构, 在总泵浦功率为 5262 W 时, 实现了双端总功率为 4470 W 的近单模输出, 两端功率分别为 1419 W 和 3051 W, 光光转换效率为 84.9%. 在输出功率为 1458 W 和 2733 W 时两端光束质量因子 M^2 分别为 1.27 和 1.31. 在 A 端泵浦功率为 2386 W 时出现 TMI 现象, 在相同泵浦功率下采用双向泵浦方式时域频域稳定, 未产生 TMI 效应. 优化增益光纤长度后实现了 ASE 和 SRS 的有效抑制, 在总泵浦功率为 5262 W 时, A 端和 B 端拉曼抑制比分别提升约 6.6 dB 和 8.1 dB. 双端输出功率主要受限泵浦功率和 SRS 效应, 后续通过增加泵浦和优化激光器结构有望实现更高的功率输出.

参考文献

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** B63
- [2] Zervas, Michalis N 2014 *Int. J. Mod. Phys. B* **28** 1442009
- [3] Wang X L, Zhang H W, Yang B L, Xi X M, Wang P, Shi C, Wang Z F, Zhou P, Xu X J, Chen J B 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 0401004 (in Chinese) [王小林, 张汉伟, 杨保来, 奚小明, 王鹏, 史尘, 王泽锋, 周朴, 许晓军, 陈金宝 2021 *中国激光* **48** 0401004]
- [4] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, Xu X J, Liu Z J 2011 *Opt. Express* **19** 18645
- [5] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2013 *Nat. Photonics* **7** 861
- [6] Zervas M N 2019 *Opt. Express* **27** 19019
- [7] Augst S J, Ranka J K, Fan T Y, Sanchez A 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1707
- [8] Xin G F, Pi H Y, Shen L, Ju R H, Cai H W, Fang Z J, Chen G T 2010 *Laser Optoelectron. Prog.* **47** 17 (in Chinese) [辛国锋, 皮浩洋, 沈力, 瞿荣辉, 蔡海文, 方祖捷, 陈高庭 2010 *激光与光电子学进展* **47** 17]
- [9] Wang X L, Zeng L F, Ye Y, Liu J Q, Wu H S, Wang P, Yang B L, Xi X M, Zhang H W, Shi C, Xi F J, Wang Z F, Zhou P, Xu X J, Chen J B 2024 *Chin. J. Laser* **51** 223 (in Chinese) [王小林, 曾令筏, 叶云, 刘佳琪, 吴函烁, 王鹏, 杨保来, 奚小明, 张汉伟, 史尘, 刁锋杰, 王泽锋, 周朴, 许晓军, 陈金宝 2024 *中国激光* **51** 223]
- [10] Zeng L F, Ding X Y, Liu J Q, Wang X L, Ye Y, Wu H S, Wang P, Xi X M, Zhang H W, Shi C, Xi F J, Xu X J 2024 *Micromachines-Basel* **15** 153
- [11] Schmidt O, Wirth C, Rhein S, Rekas M, Kliner A, Schreiber T, Tünnermann R E, Andreas 2011 *The European Conference on Lasers and Electro-Optics* Munich, Germany, May 22–26, 2011 p1
- [12] Roman Y, Nikolai P, Alexander Y, Valentin P G 2016 *Proc. SPIE* San Francisco, March 9, 2016 p972807
- [13] Sun Y H, Ke W W, Feng Y J, Wang Y S, Peng W J, Ma Y, Li T L, Wang X J, Tang C, Zhang K 2016 *Chin. J. Laser* **43** 0601003 (in Chinese) [孙殷宏, 柯伟伟, 冯昱骏, 王岩山, 彭万敬, 马毅, 李腾龙, 王小军, 唐淳, 张凯 2016 *中国激光* **43** 0601003]
- [14] Chu Q H, Shu Q, Liu Y 2020 *Opt. Lett.* **45** 6502
- [15] Xu Y, Sheng Q, Wang P 2021 *Appl. Opt.* **60** 3740
- [16] Zheng Y H, Han Z G, Li Y L 2022 *Opt. Express* **30** 12670
- [17] Liu Z J, Ma P F, Tao R M, Wang X L, Zhou P 2015 *Ieee J. Quantum Elect.* **51** 1
- [18] Silva A, Boller K, Lindsay I D 2011 *Opt. Express* **19** 10511
- [19] Liu C H, Galvanauskas A, Ehlers B, Doerfel F, Heinemann S, Carter A, Tankala K, Farroni J 2004 *Advanced Solid-State Photonics* Santa Fe, New Mexico, February 1–4, 2004 p17
- [20] Wang X L, Ye Y, Xi X M, Shi C, Zhang H W, Han K, Wang Z F, Xu X J, Zhou P, Si L, Chen J B 2018 CN Patent 201821644646.3 (in Chinese) [王小林, 叶云, 奚小明, 史尘, 张汉伟, 韩凯, 王泽锋, 许晓军, 周朴, 司磊, 陈金宝 2018 中国专利 201821644646.3]
- [21] Zhong P L, Wang L, Yang B L 2022 *Opt. Lett.* **47** 2806
- [22] Liu J Q, Zeng L F, Wang X L, Shi C, Wu H S, Wang P, Xi X M, Zhang H W, Ning Y, Xi F J 2024 *Opt. Laser Technol.* **169** 110031
- [23] Li F C, Ding X Y, Wang P, Yang B L, Xi X M, Zhang H W, Wang X L, Chen J B 2023 *Photonics-Basel* **10** 912

4.5 kW, 1050 nm bidirectional output near-single-mode all-fiber laser oscillator^{*}

LI Ke¹⁾ YE Yun^{1)2)†} LI Xinran¹⁾ DING Xinyi¹⁾ XU Xiaoyong¹⁾²⁾
 SU Rongtao^{1)2)‡} WANG Xiaolin¹⁾²⁾ NING Yu¹⁾²⁾ XI Fengjie¹⁾²⁾

1) (*College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

2) (*Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 16 January 2025; revised manuscript received 28 February 2025)

Abstract

High-power fiber laser oscillators have been widely used in industrial processing, material processing, biomedical and other fields due to their compact structure, simple logic and strong power scalability. With the increasing demand for laser performance in industrial applications, bidirectional output fiber laser based on a single resonator structure has a broad application prospect. In this work, we first establish a theoretical model for a 1050-nm bidirectional output fiber laser oscillator based on the steady-state rate equation, and simulate the relationship between the length of the gain fiber and output power, efficiency, and the intensity of stimulated Raman scattering (SRS). A high-power bidirectional output fiber laser with a central wavelength of 1050 nm is built using an ytterbium-doped fiber with a core/cladding diameter of 20/400 μm . The output characteristics of the 1050-nm bidirectional output fiber laser oscillator under different pump methods (unidirectional pump, bidirectional pump) are experimentally studied in detail. With a total pump power of 5262 W, A-end output power reaches 1419 W and B-end output power reaches 3051 W. Therefore, a total output power of 4470 W with an optical-to-optical conversion efficiency of 84.9% is achieved. The corresponding beam qualities (M^2 factor) of both ends are 1.27 and 1.31 when the output powers reach 1458 W and 2733 W, respectively. By further optimizing the length of the gain fiber, the amplified spontaneous emission (ASE) and SRS are effectively suppressed. With a total pump power of 5262 W, the Raman suppression ratios at A-end and B-end are enhanced by ~ 6.6 dB and ~ 8.1 dB, respectively. It is expected that higher output power can be achieved by increasing the pump power and optimizing the laser structure in the future.

Keywords: bidirectional output, fiber laser oscillator, near-single-mode, stimulated Raman scattering

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.74.20250072

CSTR: 32037.14.aps.74.20250072

^{*} Project supported by the Fund for Distinguished Young Scholars of Hunan Province, China (Grant No. 2023JJ10057) and the Training Program for Excellent Young Innovations of Changsha, China (Grant No. kq2305038).

[†] Corresponding author. E-mail: yeyun2015@163.com

[‡] Corresponding author. E-mail: surongtao@126.com

4.5 kW, 1050 nm双端输出近单模全光纤激光振荡器

李科 叶云 李欣然 丁欣怡 徐小勇 粟荣涛 王小林 宁禹 习锋杰

4.5 kW, 1050 nm bidirectional output near-single-mode all-fiber laser oscillator

LI Ke YE Yun LI Xinran DING Xinyi XU Xiaoyong SU Rongtao WANG Xiaolin NING Yu XI Fengjie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 104203 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250072

CSTR: 32037.14.aps.74.20250072

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250072>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双端输出近单模准连续全光纤激光器

Double-ended output near-single-mode quasi-continuous wave monolithic fiber laser

物理学报. 2023, 72(15): 154205 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230616>

基于M型掺镱光纤的近单模2 kW光纤放大器

Near-single-mode 2-kW fiber amplifier based on M-type ytterbium-doped fiber

物理学报. 2022, 71(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211751>

国产长锥形光纤实现400 W单频单模激光输出

400-W single-mode single-frequency laser output from homemade tapered fiber

物理学报. 2021, 70(20): 204204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210682>

强度调制宽带激光对受激拉曼散射动力学爆发的抑制

Suppression of stimulated Raman scattering kinetic bursts by intensity-modulated broadband laser

物理学报. 2024, 73(5): 055202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231679>

宽带激光辐照平面薄膜靶的近前向散射

Near forward scattering light of planar film target driven by broadband laser

物理学报. 2024, 73(12): 125202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231613>

辅助光对高功率掺镱光纤激光放大器受激拉曼散射效应的抑制作用

Suppression effect of auxiliary laser on stimulated Raman scattering effect of high-power Yb-doped fiber laser amplifier

物理学报. 2024, 73(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240895>