

激光二极管直接后向泵浦的高光束质量万瓦光纤激光器*

文榆钧^{1) #} 王鹏^{1)2)3) #} 奚小明¹⁾²⁾³⁾ 张汉伟¹⁾²⁾³⁾ 黄良金¹⁾²⁾³⁾
 杨欢¹⁾²⁾³⁾ 闫志平¹⁾²⁾³⁾ 杨保来¹⁾²⁾³⁾ 史尘¹⁾²⁾³⁾ 潘志勇¹⁾²⁾³⁾
 王小林^{1)2)3) †} 王泽锋^{1)2)3) ‡} 许晓军¹⁾²⁾³⁾

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)

3) (脉冲功率激光技术国家重点实验室, 长沙 410073)

(2022年7月18日收到; 2022年9月13日收到修改稿)

高功率高光束质量光纤激光器在工业生产中得到了广泛应用, 但其受到光纤中非线性效应等现象的制约, 进一步功率提升严重受阻. 本文基于大模场低数值孔径增益光纤搭建了激光二极管直接泵浦的全光纤激光放大器. 通过改变增益光纤的弯曲直径, 有效地提升了动态模式不稳定阈值, 实现了最大功率 10.53 kW, 光光转换效率 74.04%, 光束质量因子 $M^2 \sim 2.88$ 的激光输出. 研究表明, 在少模光纤激光放大器中, 提升输出功率与改善光束质量的方法相互制约. 不考虑光束质量时激光器可以较为简单的获得万瓦乃至更高功率输出; 但是在提升功率的同时保持光束质量不退化是一件充满挑战且难度极大的工作.

关键词: 掺镱光纤激光器, 模式不稳定效应, 弯曲直径

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.71.20221433

1 引言

光纤激光器具有光束质量好、转换效率高、结构紧凑、热管理方便以及可柔性操作等优点, 近年来被广泛用于工业加工、医疗卫生以及基础研究各个领域^[1-4].

近年来, 随着高亮度泵浦源、高功率光纤器件以及光纤拉制工艺等相关技术的进步, 光纤激光器的输出功率得到了大幅的提升. 2004年, 连续光纤激光器实现 1.01 kW 输出^[5], 宣告单根光纤输出的光纤激光器进入千瓦时代. 2009年, IPG公司采用

级联泵浦的方式实现了万瓦量级的单模光纤激光输出^[6], 随后在 2012年实现了 20 kW 单模输出^[7]. 但是, 受制于光纤中的非线性效应和模式不稳定 (transverse mode instability, TMI) 等因素的影响^[8], 鲜有单模 ($M^2 < 1.5$) 万瓦量级的光纤激光器相关报道. 近年来公开报道的基于激光二极管 (laser diode, LD) 泵浦的单模光纤激光器是最大输出功率 6 kW、光束质量因子 $M^2 \sim 1.25$ 的全光纤激光放大器^[9].

在高功率大模场光纤激光器中, TMI 是限制功率提升最重要的因素之一. 抑制 TMI 的方法种类繁多^[10-13], 其中最简单实用的方法之一就是改

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 62005315) 和长沙市杰出创新青年培养计划 (批准号: kq2106008) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: chinaphotonics@163.com

‡ 通信作者. E-mail: zefengwang_nudt@163.com

变光纤的弯曲直径. 通常认为 TMI 阈值与光纤的弯曲直径呈负相关. 然而, 在多模光纤中, 受到模式耦合^[14]、畸变^[15]和损耗等过程共同的作用, TMI 阈值与光纤的弯曲直径之间存在着正相关关系^[16].

近年来, 国内外陆续报道了输出功率达到万瓦量级的高光束质量光纤激光器. 2018 年, 林傲祥等^[17]基于单位自研的 (8+1) 型泵浦增益一体化复合功能激光光纤, 通过级联泵浦的方式实现了最高 11.23 kW 激光输出. 同年, 林宏免等^[18]基于 30/900 μm 光纤设计出 976 nm LD 直接单端泵浦单纤激光系统, 获得了 10.6 kW 激光输出, 光束质量优于 $2\beta_{\text{FL}}$ (β_{FL} 为光束质量因子). 2019 年, 陈晓龙等^[19]基于自研的双包层光纤及器件搭建了最高输出功率 10.14 kW 的全光纤激光放大器, 最大功率输出时光光效率达到 87.8%. 2021 年, 李峰云等^[20]采用级联泵浦的方式, 通过 47/400 μm 光纤实现了 20.88 kW 激光输出, β_{FL} 为 2.96. 2022 年, Du 等^[21]通过级联泵浦的方式, 以随机光纤激光器作为种子利用 48/400 μm 光纤搭建了万瓦级光纤激光系统, 实现了最大功率 10.14 kW 的激光输出. Shi 等^[22]在 2022 年采用自制的 50/800 μm 光纤, 利用 915 nm LD 直接泵浦实现了 12.2 kW 最大功率输出, 光光效率 78.4%.

尽管已实现了万瓦级光纤激光输出, 但相关报道并没有测量最高输出时的光束质量, 或者测量到的光束质量较差. 要实现在高功率输出的同时保持较好的光束质量仍然充满挑战. 此外, 受限于 LD 输出亮度以及热效应等问题^[23], LD 直接泵浦的高功率光纤激光器实现难度更大; 目前报道的万瓦级激光器大多采用级联泵浦方式实现. 然而, 从工程应用的角度出发, 采用级联泵浦技术的激光器体积更大, 集成更加复杂. 体积较小、热管理更方便的

LD 直接泵浦激光器仍然是更加适合当前工业加工等领域的选择. 因此 LD 直接泵浦的高效率高光束质量万瓦级光纤激光器亟需更加深入的研究.

本文利用单位自研的低吸收低数值孔径 (numeric aperture, NA) 增益光纤, 搭建了一台全光纤结构光纤激光放大器. 放大器采用 976 nm LD 后向直接泵浦的方式实现了最大功率 10.53 kW 的激光输出, 最大功率输出时 $M^2 \sim 2.88$, 光光转换效率 74.04%. 整个过程中没有观察到明显的受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS) 和 TMI 等现象. 但是, 受限于有限的泵浦功率以及光束质量的退化, 输出功率没有继续提升. 实验结果表明, 对于万瓦级及更高功率的光纤激光器而言, 如何平衡输出功率与光束质量仍然是需要进一步解决的问题.

2 实验结构与结果

2.1 实验结构

本文采用的实验结构见图 1. 搭建的光纤激光放大器采用后向泵浦结构. 种子激光器 (SEED) 为 1080 nm 波长单模光纤激光器, 光束质量 $M^2 \sim 1.2$, 在实验中它可以提供约 80 W 信号光输出. 掺镱光纤 (ytterbium-doped fiber, YDF) 采用的是本单位自研的低 NA 双包层掺镱光纤, 其模场面积约 $450 \mu\text{m}^2$, NA 为 0.051; 它被放置于光纤水冷板上呈跑道状盘绕. 泵浦源采用 14 组 976 nm 非稳波长 LD, 每组 LD 的输出功率约 1000 W, 14 组 LD 合计可以提供泵浦功率 14100 W. 14 组 LD 通过后向合束器 (BPSC) 泵浦臂注入 YDF. 信号光经过放大后经过包层光滤除器 (CLS) 连接商用输出端帽 (QBH) 输出.

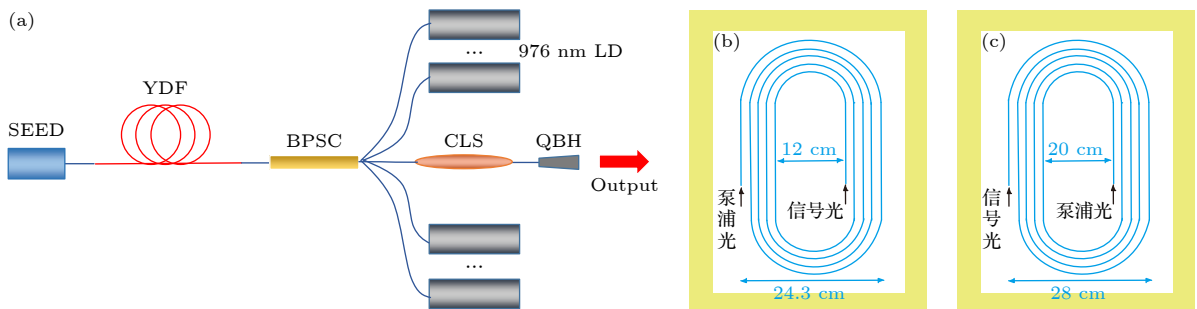


图 1 放大器实验结构图 (a) 放大器实验结构; (b) 高模式损耗实验 YDF 弯曲设置; (c) 低模式损耗实验 YDF 弯曲设置

Fig. 1. Schematic diagram of fiber laser amplifier: (a) Structure of fiber laser amplifier; (b) bending setup of high model loss experiment; (c) bending setup of low model loss experiment.

光纤的弯曲损耗对光纤激光器输出特性有着重要的影响. 根据 Marcuse 提出的理论^[24], 光纤中的线偏模的弯曲损耗可以表示为

$$2\alpha_{\text{coil}} = \frac{\sqrt{\pi} U^2 \exp[-2W^3 R_{\text{eff}} / (3a^3 \beta^2)]}{e_m W^{3/2} \sqrt{a R_{\text{eff}} V^2 K_{m-1}(W) K_{m+1}(W)}}, \quad (1)$$

其中 $V = kaNA$ 为归一化频率; $U = \sqrt{k^2 n_{\text{core}}^2 - \beta^2} a$; $W = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_{\text{clad}}^2} a$; n_{clad} 和 n_{core} 分别为包层和纤芯的折射率; $R_{\text{eff}} = 1.28 R_{\text{coil}}$, R_{coil} 为弯曲半径; a 为纤芯半径; β 为线偏模对应的传播常数; m 表示线偏模阶数; k 为真空中波数; e_m 为常数, 当 $m = 0$ 时 $e_m = 2$, 当 $m \neq 0$ 时 $e_m = 1$; $K(W)$ 为第二类修正贝塞尔函数.

本实验所用光纤传播常数 $V = 4.45$, 可以支持 4 个模式在纤芯中稳定传输. 根据 (1) 式, 计算得到不同弯曲直径下的 YDF 中各个模式的弯曲损耗分布如图 2 所示. 从图 2 可知, 当弯曲直径增大时, 光纤中各个模式的损耗迅速减小. 在光纤弯曲直径较小时, 高阶模在光纤中传输时损耗较大. 高阶模在 YDF 中提取增益的同时泄漏进入光纤包层, 并被 CLS 滤除, 这可以使激光器实现高光束质量输出, 但同时会造成光光转换效率的下降. 当弯曲直径较大时, 高阶模在光纤中的传输损耗较小. 注入 YDF 的高阶模传输过程中损耗减小, 提取增益增大. 这使得激光器有更高的光光转换效率和 TMI 阈值, 可以实现更高的功率的输出, 但是高阶模成分的增加会不可避免地造成输出信号光光束质量的退化.

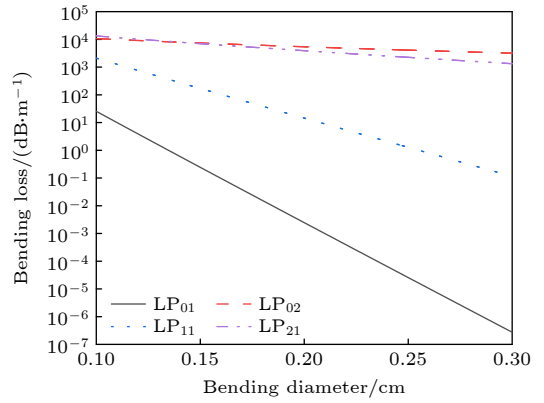


图 2 弯曲损耗随弯曲直径的分布
Fig. 2. Bending loss distribution versus bending diameters.

2.2 增加模式损耗实现高光束质量输出实验

通过提高模式损耗优化光束质量是一种简便有效的方法. 通过 2.1 节中的理论分析, 结合实验实际条件, 将 YDF 盘绕呈跑道状弯曲, 如图 1(b) 所示. 其中, 直道部分长 0.16 m, 信号光及泵浦光分别从最内圈和最外圈注入 YDF, 最内圈及最外圈弯曲直径分别为 12 cm 和 24.3 cm.

激光器输出特性如图 3 所示. 输出功率随泵浦功率增大逐渐升高; 当泵浦功率为 3391 W 时, 最高输出功率为 2543 W, 光光转换效率 72.64%. 利用光谱仪测得最高功率输出时光谱如图 3(b) 所示, 没有观察到残余泵浦光以及 SRS 等非线性效应. 种子通过放大器系统时输出的光束质量为 $M_x^2 = 1.66$, $M_y^2 = 1.77$, 随着泵浦功率增大, 光束质量没有明显退化; 在输出功率 1584 W 时光束质量 $M_x^2 = 1.72$, $M_y^2 = 1.72$. 当输出功率继续提升时功率提升

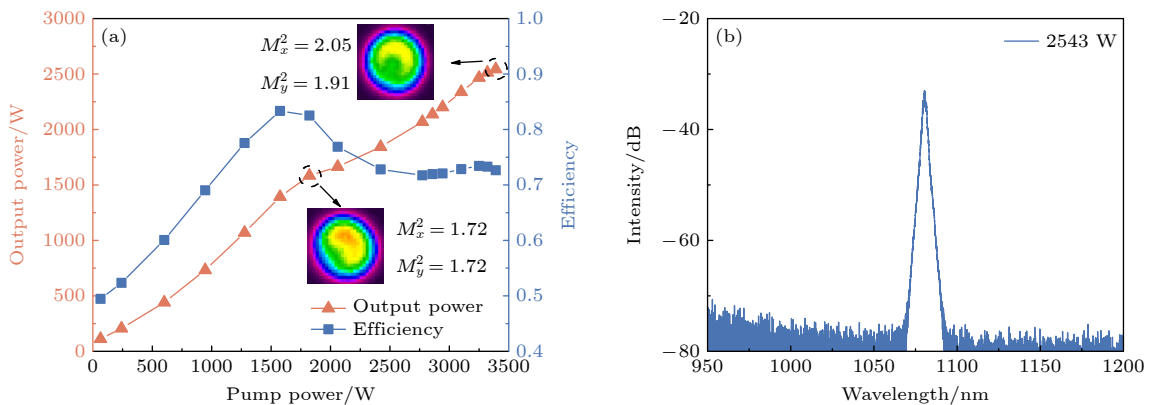


图 3 小弯曲直径时光纤激光放大器输出特性 (a) 输出功率与光光转换效率随泵浦功率的变化以及最高输出时光斑形态 (插图); (b) 2543 W 时输出光谱

Fig. 3. Output characteristics of fiber laser amplifier at small bending diameter: (a) Output power and optical-to-optical efficiency versus pump power; the inset is beam profile at the highest output; (b) output spectrum at 2543 W.

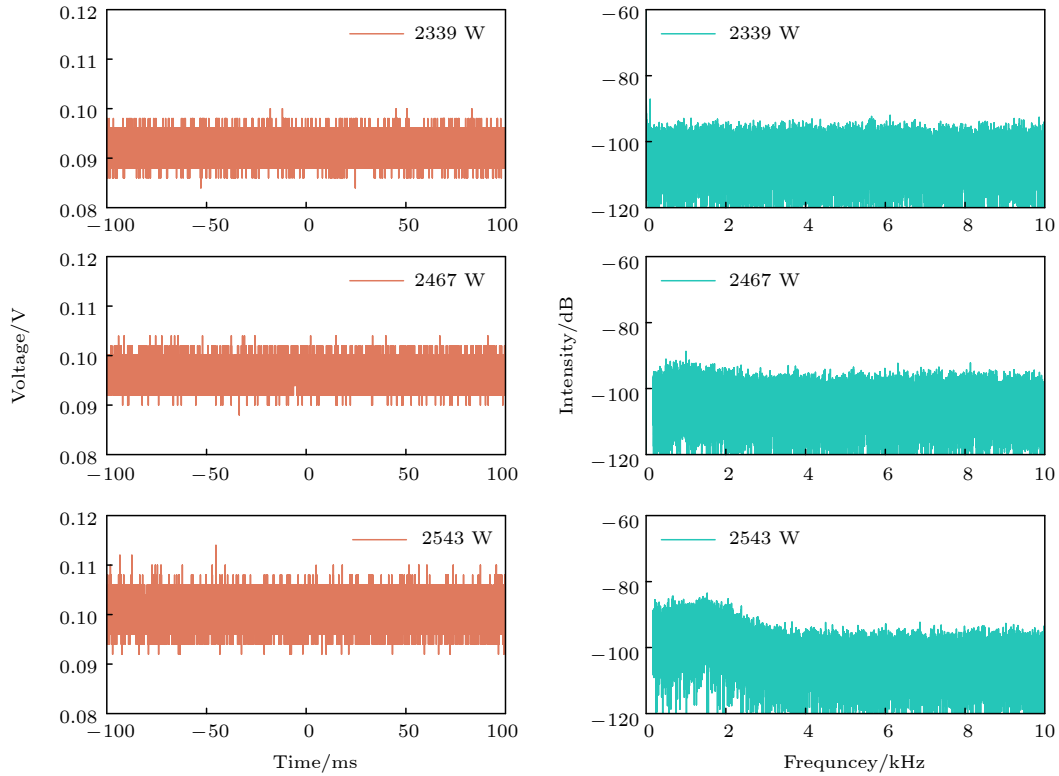


图 4 不同功率下时域信号与对应频谱

Fig. 4. Time domain signal and corresponding spectrum under different output power.

变缓, TMI 出现. 图 4 展示了不同输出功率时光电探测器探测散射光得到的时域信号和与之对应的频谱. 在输出功率为 2467 W 时, 对比上一个数据点 (2339 W), 时域信号对应频谱在 2 kHz 以下出现特征峰, 这是 TMI 出现的实验现象表征. 当输出功率达到 2543 W 时, 可以在时域信号对应频谱中看到出现了明显特征峰并发生展宽, 特征峰主要分布于 3 kHz 以下. 此时通过光束质量测试系统测得对应的光束质量因子 $M_x^2 = 2.05$, $M_y^2 = 1.91$; 光束质量较 TMI 发生前有明显退化. 综合上述实验现象可知, 当信号光以最小 12 cm 弯曲直径进入放大级时, 在输出功率 2467 W 时出现 TMI 现象, 造成功率提升受限以及光束质量恶化. 在增大模式损耗保持光束质量的条件下, 由于 TMI 的出现, 激光器的功率提升能力受到限制.

2.3 减小高阶模损耗提高输出功率实验

在增益光纤中, 部分高阶模可以稳定的传输, 减小高阶模模式损耗, 可以让更多的高阶模从纤芯中输出而不是泄漏进入包层被滤除. 基于此, 在接受光束质量退化的前提下, 可以获得更高的输出功率. 此外, 根据之前的工作, 在少模光纤中弯曲直

径越大, TMI 阈值越高, 增大弯曲直径有利于抑制 TMI 的发生获得更高功率输出 [16]. 因此改变了 YDF 的弯曲直径, YDF 弯曲设置如图 1(c) 所示, 使信号光从最外圈注入 YDF, 弯曲直径 28 cm, 泵浦光从最内圈注入 YDF, 弯曲直径 20 cm.

激光器输出特性如图 5 所示, 随着泵浦光功率增大, 输出功率呈近似线性增长, 在泵浦功率为 14100 W 时达到最大输出功率 10530 W, 光光转换效率 74.04%. 当泵浦功率超过万瓦时, 光光转换效率下降, 功率提升变缓. 通过光谱仪测得最高输出功率时的输出光谱如图 5(b) 所示, 从图 5(b) 可以看到, 没有出现残余泵浦光和明显的拉曼特征峰, 但是输出功率较高使得光纤中非线性效应较强, 造成光谱展宽. 最高输出功率时测得的时域信号与频谱如图 5(c) 所示, 在频谱中没有出现 TMI 特征峰, 时域也没有观察到明显的波动. 在实验过程中, 光束质量随输出功率的提高逐渐退化, 在最大输出功率时光束质量因子 $M_x^2 = 2.83$, $M_y^2 = 2.93$. 受限于泵浦功率, 无法继续提升输出功率, 但是在不追求光束质量的前提下, 采用信号光以 28 cm 弯曲直径进入 YDF, 20 cm 弯曲直径输出的后向泵浦结构仍然还有功率提升的空间.

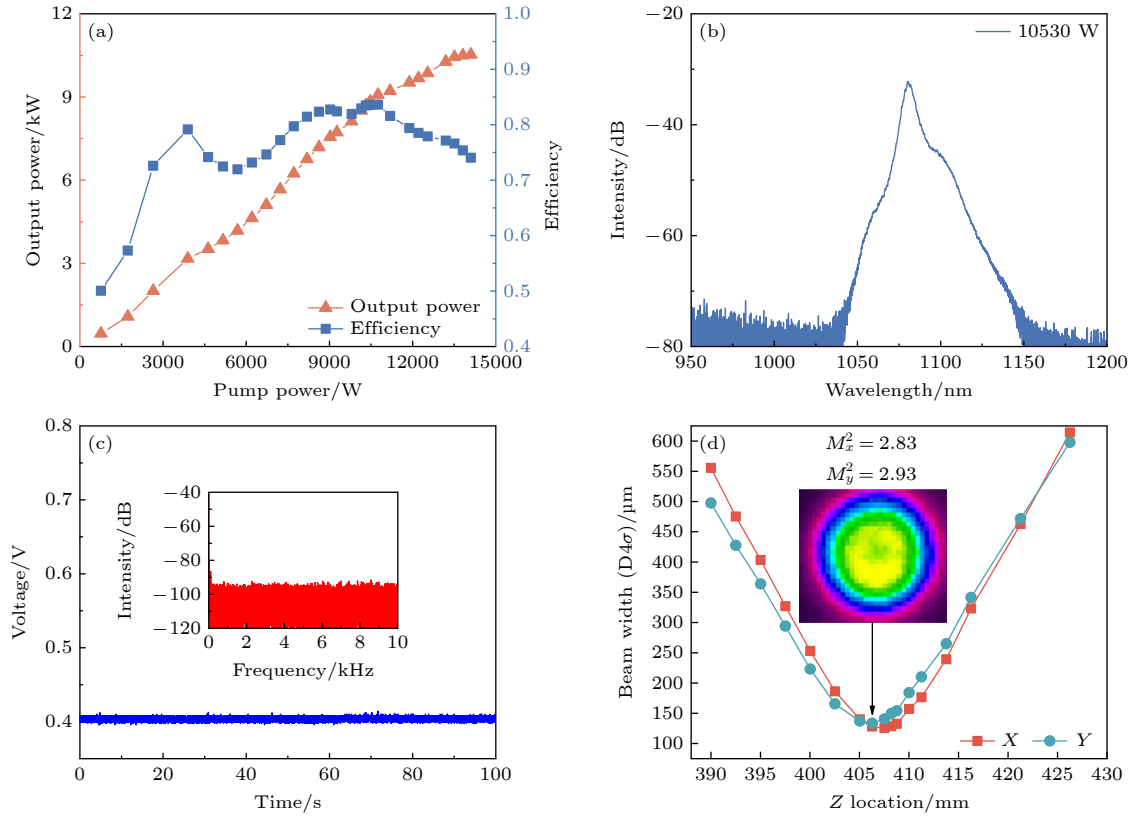


图 5 大弯曲直径时光纤激光放大器输出特性 (a) 输出功率与光光转换效率随泵浦功率的变化; (b) 10530 W 时输出光谱; (c) 10530 W 时域信号与对应频谱; (d) 10530 W 时的光束质量 ($D4\sigma$ 表示光束强度轮廓横向能量分布的四倍标准差)

Fig. 5. Output characteristics of fiber laser amplifier at big bending diameter: (a) Output power and optical-to-optical efficiency versus pump power; (b) output spectrum at 10530 W; (c) time domain signal and corresponding spectrum at 10530 W; (d) beam quality at 10530 W.

3 输出功率与光束质量的关系

上文展示了两个除弯曲直径外光路结构完全相同的实验, 然而实验结果却完全不同. 当信号光从弯曲直径 12 cm 一端进入放大级后从弯曲直径 24.3 cm 的另一端输出时, 激光器保持了相对较好的光束质量, 但是在输出功率 2467 W 时出现了 TMI 现象. 受制于 TMI, 输出功率无法继续有效提升. 当信号光从弯曲直径 28 cm 一端进入放大级, 从弯曲直径 20 cm 的另一端输出时, 激光器实现了万瓦激光输出并且还有继续提升输出功率的能力, 但是光束质量较差.

SRS 和 TMI 是当前限制高功率光纤激光器功率继续提升的两大主要限制因素. 在本文实验中, 由于采用了大模场光纤, 在实验中没有观察到明显的 SRS 现象. 因此, 抑制 TMI 是实验中获得高功率输出的核心问题. 通常, 实验中抑制 TMI 直接有效的方法有改变泵浦波长^[12]、改变光纤弯曲直

径^[13] 以及改变泵浦方式^[25] 等; 在这些方法中改变弯曲直径毫无疑问是最简单最便捷的手段.

在前期关于近单模光纤中 TMI 的研究中, 一般认为减小弯曲半径可以增大高阶模在传输过程中的损耗, 进而提升信号光中基模所占的比例并抑制 TMI 的发生. 因此, 弯曲直径越小 TMI 阈值越高. 然而, 在可以支持多个模式传输的大模场光纤激光器中, 这个趋势是相反的, 即弯曲直径越大 TMI 阈值越高^[16]. 当光纤中稳定传输的模式增多后, 光纤弯曲对 TMI 阈值的影响不再局限于模式损耗; 弯曲引起的模场交叠^[14]、畸变^[15] 以及模式损耗都是对 TMI 阈值产生影响的重要因素. 当弯曲直径变大, 高阶模损耗减小, 纤芯中稳定传输的高阶模功率增大, 模场畸变减弱, 同时各个模式模场交叠减弱, 模式耦合发生的难度增加; 这些因素共同造成了 TMI 阈值的提升以及光束质量的退化.

在高模式损耗实验时, 信号光进入放大级时弯曲直径为 12 cm, 当信号光被放大后, 高阶模抽取增益后泄漏进入包层并被 CLS 滤除, 造成效率下

降. 同时, 由于光纤支持多个模式传播, 弯曲直径小使纤芯中的模式堆叠, 进而促进模式耦合^[22]更容易诱发 TMI. 因此, 在输出功率 2467 W 时出现 TMI, 但是得益于较高的弯曲损耗, 激光器保持了高光束质量. 当弯曲直径增大, 信号光进入放大级时弯曲损耗较小, 可以在纤芯中稳定传输的高阶模与基模一起被放大, 得益于更小的弯曲损耗, 大量高阶模成分在信号光中输出而非泄漏进入包层, 这使得输出功率得到提升, 但同时也不可避免地造成了光束质量的下降. 在弯曲直径较大时模式之间在纤芯的交叠更少, 发生模式耦合触发 TMI 的难度更大. 这也有效提高了激光器 TMI 阈值. 因此直到输出超过万瓦也没有观察到 TMI 的发生, 但是与之对应的是输出光束质量退化, 最高输出功率时光束质量因子 $M^2 \sim 2.88$.

综上所述, 在少模光纤中追求更高功率输出和更优光束质量的需求存在冲突. 追求高功率输出需要增大弯曲直径提升 TMI 阈值, 但是会造成高阶模成分增多, 光束质量下降. 优化光束质量需要减小弯曲直径增大高阶模损耗, 但会造成 TMI 阈值降低, 光光转换效率下降导致功率提升困难. 在不考虑光束质量的条件下, 以现有的光纤制造工艺、高功率光纤器件性能以及泵浦源亮度等条件下, 实现万瓦甚至更高功率的输出不是一件难事. 但是在追求高功率的同时保持良好的光束质量还十分困难. 如何在更高功率下有效地控制光束质量并同时抑制 SRS 和 TMI 等现象的发生仍需更加深入细致的研究.

4 结 论

本文基于单位自研的低吸收低 NA 双包层掺镜光纤搭建了全光纤结构光纤激光放大器, 通过改变光纤弯曲直径实现了万瓦输出. 当采用最小弯曲直径 12 cm 盘绕光纤时, 激光器输出光束质量保持在 $M^2 \sim 1.72$, 但在 2467 W 时出现 TMI 并伴随光束质量快速退化, 限制了功率进一步提升. 通过增大光纤弯曲直径, 激光器实现最高 10.53 kW 输出, 但是光束质量较差, 光束质量因子 $M^2 \sim 2.88$. 由于低 NA 光纤对弯曲的响应十分敏感, 增大弯曲直径可以降低高阶模传输损耗, 使更多的高阶模留在纤芯中输出, 增大了输出功率的同时造成光束质量退化. 此外, 增大弯曲直径可以减少弯曲导致的

模场交叠, 增加了触发 TMI 发生的难度, 提高了激光器的 TMI 阈值. 最后, 本文分析了少模光纤激光器中输出功率与光束质量的制约关系. 在不追求光束质量的前提下, 现有的光纤工业水平可以较容易实现单纤万瓦激光输出. 但是在实现万瓦输出的同时保持较好的光束质量仍然是一件充满挑战的工作. 下一步, 通过适当减小光纤弯曲直径, 并结合改变泵浦波长等抑制 TMI 的方法, 将尝试在高功率输出的条件下进一步提高光束质量. 本文的研究结果可以为万瓦高能激光系统的设计提供一定的参考价值.

参考文献

- [1] Gu B 2020 *Mach. Metal Forming* **10** 37 (in Chinese) [顾波 2020 *金属加工(热加工)* **10** 37]
- [2] Zervas M N, Codemard C A 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20** 219
- [3] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A 2010 *J. Opt. Soc. Amer. B* **27** B63
- [4] Zervas M N 2014 *Int. J. Mod. Phys. B* **28** 1442009
- [5] Jeong Y, Sahu J, Payne D, Nilsson J 2004 *Opt. Express* **12** 6088
- [6] O'Connor M, Gapontsev V, Fomin V, Abramov M, Ferin A 2009 *Conference on Lasers and Electro-Optics* Baltimore, USA, May 31–June 5, 2009 pCThA3
- [7] Shiner B 2013 *CLEO: Science and Innovations* San Jose, USA, June 9–13, 2013 pAF2J.1
- [8] Zhang C, Xie L H, Chu Q H, Liu Y, Huang S, Song H Q, Wu W J, Feng X, Li M, Shen B J, Li H K, Tao R M, Xu L X, Wang J J 2022 *High Power Laser and Part. Beams* **34** 126 (in Chinese) [张春, 谢亮华, 楚秋慧, 刘珂, 黄珊, 宋华青, 吴文杰, 冯曦, 李敏, 沈本剑, 李昊坤, 陶汝茂, 许立新, 王建军 2022 *强激光与粒子束* **34** 126]
- [9] Yang B L, Wang P, Zhang H W, Xi X M, Shi C, Wang X L, Xu X J 2021 *Opt. Express* **29** 26366
- [10] Stihler C, Jauregui C, Tunnermann A, Limpert J 2019 *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)* Munich, Germany, June 23–27, 2019 pp1-1
- [11] Haarlammert N, Sattler B, Liem A, Strecker M, Nold J, Schreiber T, Eberhardt R, Tünnermann A, Ludewigt K, Jung M 2015 *Opt. Lett.* **40** 2317
- [12] Wan Y C, Yang B L, Wang P, Xi X M, Zhang H W, Wang X L 2021 *J. Mod. Optic.* **68** 967
- [13] Tao R M, Su R T, Ma P F, Wang X L, Zhou P 2016 *Laser Phys. Lett.* **14** 25101
- [14] Palmieri L, Galtarossa A 2014 *IEEE Photon. J.* **6** 1
- [15] Chu Q H, Tao R M, Lin H H, Wang J J, Jin F 2020 *Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications* Beijing, China, December 3–5, 2019 p1145545
- [16] Wen Y J, Wang P, Shi C, Yang B L, Xi X M, Zhang H W, Wang X L 2022 *IEEE Photon. J.* **14** 1
- [17] Lin A X, Zhan H, Peng K, Wang X L, Ni L, Wang Y Y, Li Y W, Liu S, Sun S H, Jiang J L, Tang X, Liu Y, Jiang L, Yu J, Wang J J, Jin F 2018 *High Power Laser Part. Beams* **30** 7 (in

- Chinese) [林傲祥, 湛欢, 彭昆, 王小龙, 倪力, 王瑜英, 李雨薇, 刘爽, 孙仕豪, 姜佳丽, 唐选, 刘珂, 姜蕾, 俞娟, 王建军, 景峰 2018 *强激光与粒子束* **30** 7]
- [18] Lin H H, Tang X, Li C Y, Guo C, Liu Y, Zhao P F, Wang B P, Wang J J, Jin F 2018 *Chin. J. Lasers* **45** 335 (in Chinese) [林宏奂, 唐选, 李成钰, 郭超, 刘珂, 赵鹏飞, 王波鹏, 王建军, 景峰 2018 *中国激光* **45** 335]
- [19] Chen X L, Lou F G, He Y, Wang M, Xu Z W, Guo X C, Ye R, Zhang L, Yu C L, Hu L L, He B, Zhou J 2019 *Acta Optica Sin.* **39** 423 (in Chinese) [陈晓龙, 楼风光, 何宇, 王孟, 徐中巍, 郭晓晨, 叶韧, 张磊, 于春雷, 胡丽丽, 何兵, 周军 2019 *光学学报* **39** 423]
- [20] Li F Y, Li Y, Song H Q, Yi Y Q, Chu Q H, Zhang H Y, Huang S, Guo C, Shu Q, Yan D L, Tao R M, Huang Z M, Pang L, Shen Y Z, Shi Y, Gao C, Liu N, He H L, Li Y W, Liu Y, Wu W J, Wang Q H, Wen J, Wang Z, Lin H H, Wang J J, Jin F 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 192 (in Chinese) [李峰云, 黎玥, 宋华青, 衣永青, 楚秋慧, 张吴宇, 黄珊, 郭超, 舒强, 颜冬林, 陶汝茂, 黄智蒙, 庞璐, 沈一泽, 史仪, 高聪, 刘念, 贺红磊, 李雨薇, 刘珂, 吴文杰, 王旗华, 温静, 汪卓, 林宏奂, 王建军, 景峰 2021 *中国激光* **48** 192]
- [21] Du S S, Qi T C, Li D, Yan P, Gong M L, Xiao Q R 2022 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 1
- [22] Shi J H, Wu J, Hu H W, Du T Y, Yan D P 2022 *Eighth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications* Kunming, China, November 9–11, 2021, p121695J
- [23] Yi Y Q, Liu J, Shen Y Z, Li F Y, Han Z H, Yang P, Pang L, Lin H H, Wang J J 2022 *Chin. J. Lasers* **49** 97 (in Chinese) [衣永青, 刘君, 沈一泽, 李峰云, 韩志辉, 杨鹏, 庞璐, 林宏奂, 王建军 2022 *中国激光* **49** 97]
- [24] Marcuse D 1976 *J. Opt. Soc. Am.* **66** 216
- [25] Shi C, Su R T, Zhang H W, Yang B L, Wang X L, Zhou P, Xu X J, Lu Q S 2017 *IEEE Photon. J.* **9** 1

Laser diode directly backward pumped high-beam-quality 10-kW fiber laser*

Wen Yu-Jun^{1) #} Wang Peng^{1)2)3) #} Xi Xiao-Ming¹⁾²⁾³⁾ Zhang Han-Wei¹⁾²⁾³⁾
 Huang Liang-Jin¹⁾²⁾³⁾ Yang Huan¹⁾²⁾³⁾ Yan Zhi-Ping¹⁾²⁾³⁾ Yang Bao-Lai¹⁾²⁾³⁾
 Shi Chen¹⁾²⁾³⁾ Pan Zhi-Yong¹⁾²⁾³⁾ Wang Xiao-Lin^{1)2)3) †}
 Wang Ze-Feng^{1)2)3) ‡} Xu Xiao-Jun¹⁾²⁾³⁾

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*)

3) (*State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 18 July 2022; revised manuscript received 13 September 2022)

Abstract

Fiber lasers have been widely used in the industrial and scientific fields due to their advantages of high conversion efficiency, simple thermal management, and consistent stability. High brightness and high-power fiber lasers are affected by stimulated Raman scattering and transverse mode instability, which limits the power scaling of fiber lasers. Therefore, there are only a few researches achieving a 10 kW-level fiber laser system by laser diode direct pumping or tandem pumping. In this work, we demonstrate an all-fiber laser amplifier based on home-made low numerical aperture (NA) fiber pumped by 976 nm laser diodes. When the signal light is input to the gain fiber with a minimum bending diameter of 12 cm, the beam quality factor M^2 is about 1.72. The onset of transverse mode instability (TMI) is observed at 2467 W output power, accompanied by beam quality degradation. In order to suppress the onset of TMI, the minimum bending diameter of the gain fiber is changed from 12 cm to 20 cm. And the signal light is input into the gain fiber with a bending diameter of 28 cm. Benefiting from this operation, the fiber laser amplifier achieves maximum output power of 10.53 kW with an optical-to-optical efficiency of 74.04%, and there is no TMI onset observed. However, increasing bending diameter inevitably leads the beam quality to degrade. At the maximum output power, the beam quality factor M^2 is 2.88. To the best of our knowledge, this is the highest optical-to-optical efficiency and the best beam quality in 10 kW-level laser diodes pumping fiber lasers. Generally, it is believed that reducing bending diameter can suppress TMI by increasing high-order mode loss. However, this rule is not applicable to few-mode fiber lasers. A larger bending diameter leads more high-order modes to be contained in the signal light instead of leaking into the cladding area. Thus, a higher output and poor beam quality are obtained. Also, it is believed that tightly coiled fiber can make mode coupling easier and trigger off TMI, which results in a positive correlation between the TMI threshold and bending diameter. Low NA fibers are very sensitive to bending, and reducing the bend diameter to control the beam quality will result in lower efficiency and a lower TMI threshold. Therefore, although producing a 10 kW-level fiber laser is simple, maintaining good beam quality in the power scaling process is still a challenge. The results of this study will be a valuable reference for high power fiber laser design.

Keywords: ytterbium-doped fiber laser, transverse mode instability, bending diameter

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.71.20221433

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62005315) and the Training Program for Excellent Young Innovations of Changsha, China (Grant No. kq2106008).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: chinaphotonics@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: zefengwang_nudt@163.com



激光二极管直接后向泵浦的高光束质量千瓦光纤激光器

文榆钧 王鹏 奚小明 张汉伟 黄良金 杨欢 闫志平 杨保来 史尘 潘志勇 王小林 王泽锋 许晓军

Laser diode directly backward pumped high-beam-quality 10-kW fiber laser

Wen Yu-Jun Wang Peng Xi Xiao-Ming Zhang Han-Wei Huang Liang-Jin Yang Huan Yan Zhi-Ping
Yang Bao-Lai Shi Chen Pan Zhi-Yong Wang Xiao-Lin Wang Ze-Feng Xu Xiao-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 244202 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221433

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221433>

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

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>

数值孔径对掺镱光纤振荡器模式不稳定阈值影响的实验研究

Experimental study on influence of fiber numerical aperture on mode instability threshold of ytterbium fiber oscillator

物理学报. 2019, 68(11): 114206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182257>

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>

二极管叠阵侧面折返泵浦多边形薄片激光器

Laser-diode-array side-zigzag-pumped polygon thin-disk laser

物理学报. 2021, 70(16): 164202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210287>

少模光纤放大器中的准静态模式不稳定实验研究

Quasi-static mode instability in few-mode fiber amplifier

物理学报. 2018, 67(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180140>

国产部分掺杂光纤实现3 kW全光纤激光振荡输出

Home-made confined-doped fiber with 3-kW all-fiber laser oscillating output

物理学报. 2020, 69(23): 234205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200620>