



国产长锥形光纤实现400 W单频单模激光输出

安毅 潘志勇 杨欢 黄良金 马鹏飞 闫志平 姜宗福 周朴

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

An Yi Pan Zhi-Yong Yang Huan Huang Liang-Jin Ma Peng-Fei Yan Zhi-Ping Jiang Zong-Fu Zhou Pu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 204204 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210682

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210682>

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

国产光纤实现同带抽运3000 W激光输出

3000 W tandem pumped all-fiber laser based on domestic fiber

物理学报. 2018, 67(2): 024205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171676>

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>

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>

高功率全光纤1.6微米类噪声方形脉冲激光器

High-power 1.6 μ m noise-like square pulse generation in an all-fiber mode-locked laser

物理学报. 2020, 69(16): 164202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200245>

高功率光纤中传输光模式与其波长相关性研究

Analysis of wavelength dependence of mode in high power fiber laser

物理学报. 2017, 66(19): 194202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.194202>

国产长锥形光纤实现 400 W 单频单模激光输出*

安毅 潘志勇 杨欢 黄良金[†] 马鹏飞[‡] 闫志平 姜宗福 周朴

(国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

(2021 年 4 月 12 日收到; 2021 年 5 月 11 日收到修改稿)

高功率单频光纤激光在引力波探测、非线性频率变换等领域有重要的应用需求, 其输出功率的提升面临横向模式不稳定和非线性效应等因素带来的技术挑战, 而长锥形增益光纤具有综合抑制横向模式不稳定效应和非线性效应的潜力. 为进一步提升全光纤结构单频光纤激光器的输出功率, 国防科技大学自主研发了一段长度为 2.2 m 的长锥形掺镱双包层光纤, 其输入端纤芯和内包层直径分别为 30.3 μm 和 245 μm , 输出端纤芯和内包层直径为 49.3 μm 和 404 μm . 基于该光纤, 采用前向泵浦的方式搭建了一个全光纤结构的单频主振荡功率放大系统. 其中种子激光的中心波长为 1064 nm, 输出功率为 30 mW. 该系统实现了中心波长为 1064 nm、功率超过 400 W 的单频激光输出, 斜率效率为 81.7%, 功率 400 W 时光束质量因子 (M^2) 为 1.29. 系统输出功率的进一步提升受限于横向模式不稳定效应. 据可查询文献, 这是目前基于国产增益光纤实现的单频单模光纤激光器最高输出功率. 该结果表明, 长锥形光纤在实现单频光纤激光器高功率、高光束质量输出方面极具潜力, 通过光纤参数和实验结构的进一步优化有望实现更高功率水平的单频单模激光输出.

关键词: 单频, 高功率光纤激光器, 长锥形光纤, 横向模式不稳定效应

PACS: 42.55.Wd, 42.81.Bm, 42.60.Da, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.70.20210682

1 引言

高功率单频光纤激光器在激光雷达、相干合成、相干光通信、非线性频率变换、引力波探测等领域具有巨大的应用需求^[1-5]. 近年来, 随着高性能增益光纤及光纤器件的发展, 高功率单频光纤激光器的输出功率得到较大提升^[6-14], 但功率的进一步提升受到了受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 效应^[15] 和横向模式不稳定 (transverse mode instability, TMI) 效应^[16-18] 的限制. 一般而言, SBS 效应在小芯径光纤中更易发生, 产生的后向斯托克斯光会导致光纤损伤; 而 TMI 效应在大芯径光纤中更易发生, 会引起光束质量的突然恶化. 受限于这两个因素, 高功率单频

光纤激光器的输出功率始终停留在数百瓦量级. 2014 年, 美国空军实验室的 Robin 等^[9] 通过对新型声场裁剪掺镱光子晶体光纤施加温度梯度, 基于空间结构实现了功率为 811 W, M^2 因子小于 1.2 的单频单模激光输出, 这是目前公开报道的单频光纤激光器的最高输出功率. 相比于空间结构, 全光纤结构单频激光器具有结构更加紧凑、性能更加稳定、维护更加方便等优势. 2013 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所的张磊等^[7] 通过对纤芯包层比为 10 μm /125 μm 的单模光纤施加应力梯度和温度梯度实现了功率 171 W, $M^2 = 1.02$ 的单频单模激光输出. 2016 年, 国防科技大学的黄龙等^[10] 采用纤芯包层比为 25 μm /250 μm 的大模场保偏高掺杂光纤, 通过施加应力梯度的方式实现了功率 414 W, $M^2 = 1.34$ 的单频单模激光输出.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61805280, 62035015, 61806217)、国防科技大学学校科研计划 (批准号: ZK19-07) 和脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金 (批准号: SKL2020ZR07) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: hlj203@nudt.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: shandapengfei@126.com

长锥形光纤^[19–21]为单频光纤激光器功率的进一步提升提供了新的解决思路. 相比于常规均匀直径光纤, 长锥形光纤纤芯直径随长度的增加而逐渐增加. 其小芯径端支持的模式较少, 可有效地保证激光的单模特性并能够提高 TMI 阈值, 而大芯径端模场面积大, 能够提高 SBS 阈值. 因此, 长锥形光纤有望在小芯径和大芯径之间“扬长避短”, 在一定程度上兼顾 TMI 和 SBS 的抑制. 2020 年, 国防科技大学的来文昌等^[12]基于一段长度为 1.3 m 的长锥形大模场保偏增益光纤 (其输入端纤芯包层比为 36.1 $\mu\text{m}/249.3 \mu\text{m}$, 输出端纤芯包层比为 57.8 $\mu\text{m}/397.3 \mu\text{m}$), 将全光纤结构单频光纤激光器的输出功率提升至 550 W, 测得的 M^2 因子为 1.47. 这是已报道的全光纤结构单频激光器的最高功率记录, 功率的进一步提升有赖于增益光纤参数的进一步优化设计.

近年来, 国产大模场掺镱光纤的制备工艺和高功率应用不断取得新突破^[22–32], 其中上海光学精密机械研究所基于自研 25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 光纤实现了 2.2 kW 的窄线宽单模激光输出^[27], 国防科技大学基于自研双锥形光纤实现了 4 kW 的宽谱单模激光输出^[31], 中国工程物理研究院基于自研的泵浦增益一体化光纤实现了 11.23 kW 的宽谱高功率输出^[32]. 尽管国产光纤在宽谱和窄线宽领域的应用已经较为广泛, 但在单频激光领域的应用较少. 2007 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所的张芳沛等^[33]基于一段长度为 5.3 m 的 39 $\mu\text{m}/600 \mu\text{m}$ 国产光纤实现了中心波长 1064 nm、功率为 7.3 W、斜率效率为 39% 的单频激光输出. 2011 年, 国防科技大学的董小林等^[34]基于一段长度为 5 m 的 30 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 国产光纤实现了中心波长 1063.8 nm、功率为 122 W、斜率效率为 72% 的单频激光输出. 此后未见基于国产光纤实现的该波段更高功率的公开报道.

结合国产光纤和单频光纤激光器的发展现状, 基于国产增益光纤实现高功率单频光纤激光输出具有重要意义. 最近, 国防科技大学基于自主研发的长锥形掺镱双包层非保偏光纤搭建了全光纤结构的单频主振荡功率放大 (master oscillator power-amplifier, MOPA) 系统, 实现了输出功率超过 400 W、斜率效率 81.7%, M^2 因子为 1.29 (400 W 时测得) 的单频单模激光输出. 据可查询资料, 这是基于国产光纤实现的单频单模激光的最高输出功率.

2 实验设置

自研的长锥形掺镱双包层光纤的纤芯和内包层直径的比值固定为 0.12, 测量得到的小端纤芯包层比为 30.3 $\mu\text{m}/245 \mu\text{m}$, 大端纤芯包层比为 49.3 $\mu\text{m}/404 \mu\text{m}$. 光纤总长度为 2.2 m, 其中锥区约为 2 m, 两端的小芯径和大芯径均匀区分别为 0.1 m. 光纤的纤芯数值孔径 (NA) 为 0.06, 小芯径均匀区的吸收谱如图 1 所示.

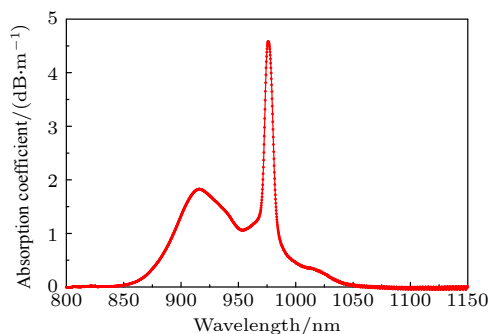


图 1 长锥形光纤小芯径均匀区的吸收谱

Fig. 1. Absorption spectrum of the small-core region of the long tapered fiber.

基于该光纤的全光纤结构的单频光纤激光器系统如图 2 所示. 单频种子激光 (seed) 中心波长为 1064 nm、线宽约为 20 kHz、输出功率为 30 mW. 种子激光经过隔离器 (ISO) 和两级预放大器 (two-stage pre-amplifiers) 后功率约为 5 W, 然后通过耦合器 (tapper) 和合束器 (combiner) 注入到主放大器, 其中耦合器后向的输出臂用于监测主放大器中产生的后向回光 (backward monitor), 以判断主放大器中 SBS 效应是否达到阈值. 主放大器采用前向泵浦的方式进行激光放大, 泵浦源为 6 个最大输出功率为 95 W、中心波长为 976 nm 的激光二极管 (LD). 所用 (6+1)×1 合束器的信号输入臂和输出臂的纤芯/内包层直径分别为 15 $\mu\text{m}/130 \mu\text{m}$ 和 30 $\mu\text{m}/250 \mu\text{m}$. 长锥形光纤的大部分区域盘绕在水冷盘上, 弯曲半径约为 10–15 cm, 尾纤脱离水冷盘, 固定于精密调节架上. 为避免端面反馈对系统的不利影响, 尾纤末端切割成 8° 斜角. 放大后的激光经斜角输出至自由空间, 并经空间准直器准直. 此时的输出光束中含有未被光纤吸收的剩余泵浦光. 利用二色镜滤除剩余泵浦光后, 进行输出功率、光谱、时域、光束质量等参数的测量. 其中测量光束质量时需要调整光路, 加入足够的衰减器件以确保进入到光束质量测量仪中的光功率在仪器的承受范围.

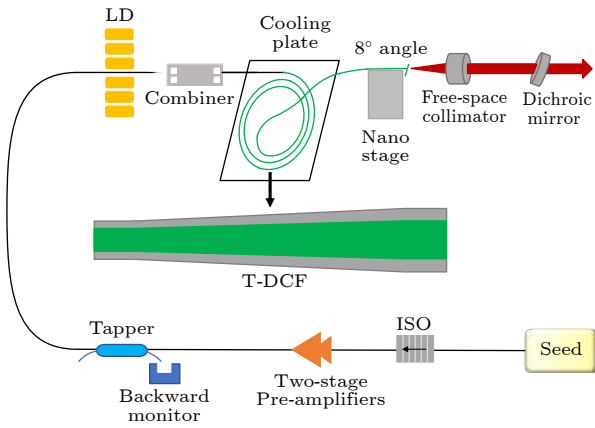


图 2 基于长锥形双包层光纤搭建的单频光纤放大器的实验装置图

Fig. 2. Experimental setup of single frequency fiber amplifier based on tapered double clad fiber.

3 结果与分析

实验中利用光电探测器监测功率计靶面的散射光, 以判断是否有 TMI 效应出现. 当输出光功率至 400, 418 和 434 W 时, 系统时域结果如图 3(a)、图 3(c) 和图 3(e) 所示, 频域结果如图 3(b)、图 3(d) 和图 3(f) 所示. 图 3(a) 和图 3(b) 中的时频域结果表明在输出功率为 400 W 时, 光电探测器接收到的散射光的强度无明显波动, 表明此时系统并未出现 TMI 效应. 根据图 3(c)—(f) 结果可知, 当输出功率增加至 418 W 时域信号开始在 ms 量级的尺度上出现轻微的波动, 对应的频域曲线上开始出现明显的高频分量; 当输出功率进一步增加至 434 W

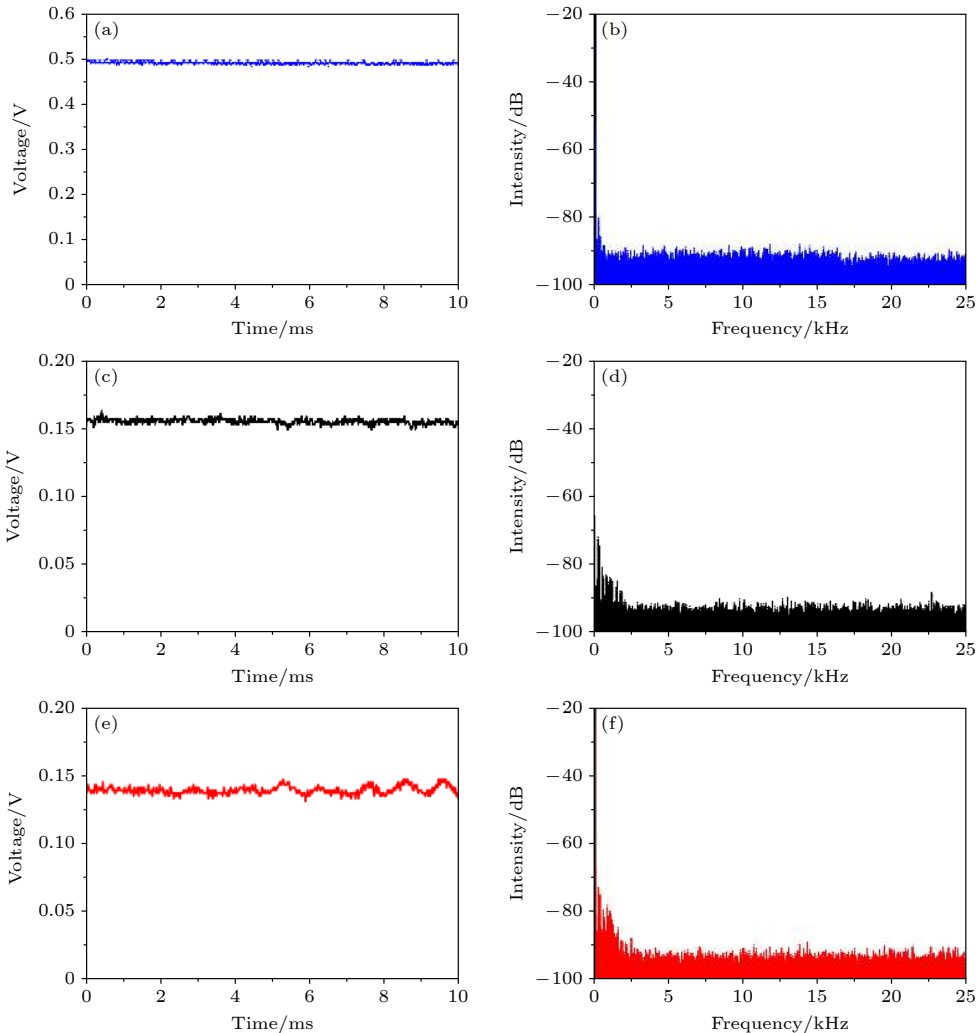


图 3 不同输出功率下, 光电探测器接收光信号的时频域 (a) 输出功率为 400 W 时的时域; (b) 输出功率为 400 W 时的频域; (c) 输出功率为 418 W 时的时域; (d) 输出功率为 418 W 时的频域; (e) 输出功率为 434 W 时的时域; (f) 输出功率为 434 W 时的频域

Fig. 3. The detected scattering light signals under different output power levels: (a) Time domain when output power reaches 400 W; (b) frequency domain when output power reaches 400 W; (c) time domain when output power reaches 418 W; (d) frequency domain when output power reaches 418 W; (e) time domain when output power reaches 434 W; (f) frequency domain when output power reaches 434 W.

时, 时域信号的波动更加明显. 因此, 这些现象预示着输出功率在 400 W 时, TMI 效应尚未出现, 当输出功率进一步增加, TMI 效应出现.

测得输出功率和回光功率随泵浦光功率的变化情况如图 4 所示. 从图 4 中可以看出, 随着泵浦功率增大, 输出功率近似呈线性增长, 整个过程没有观察到功率下降现象. 当泵浦功率为 0 W 时, 输出激光功率为 4.5 W; 当泵浦功率为 502 W 时, 输出激光功率为 400 W, 对应的斜率效率约为 81.7%. 该输出功率下对应的后向回光仅为 8.4 mW, 约为前向输出功率的 0.021%. 在整个放大过程中, 回光没有出现非线性增长的迹象, 这表明 SBS 效应得到了良好的抑制.

注入主放大器前的种子光和经过主放大器后不同输出功率下的光谱如图 5 所示. 其中, 图 5(a) 是经过预放大器后、注入主放大器前的种子光的光谱, 光谱的信噪比约为 24 dB; 图 5(b)—(d) 分别是输出功率为 109, 255, 和 400 W 时的光谱. 从图 5(b)—(d) 可以看到, 在不同输出功率下光谱中无泵浦光成分, 说明剩余泵浦光已经被二色镜充分滤除. 同时, 光谱中无放大自发辐射 (ASE) 成分. 伴随着输

输出功率的增加, 光谱的信噪比也逐渐增加, 400 W 输出功率下的信噪比约为 32 dB.

测得不同输出功率下的 M^2 因子变化情况, 如图 6 所示. 从图 6 中可以看到, 在不同输出功率下 M_x^2 和 M_y^2 的测量值均保持在 1.4 以下, 这也表明 400 W 时系统未出现 TMI 效应. 在输出功率为 400 W 时, M_x^2 和 M_y^2 的测量值分别为 1.254 和 1.325, 等效 M^2 为 1.29. 图 6 还给出了输出功率为 400 W 时束腰光斑的形态. M^2 的测量值和光斑形态表明了单频光纤放大器的单模输出特性.

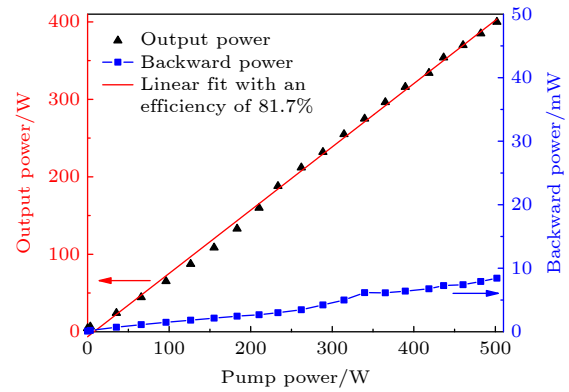


图 4 输出功率、回光功率随泵浦光功率的变化
Fig. 4. Output power and backward power versus pump power.

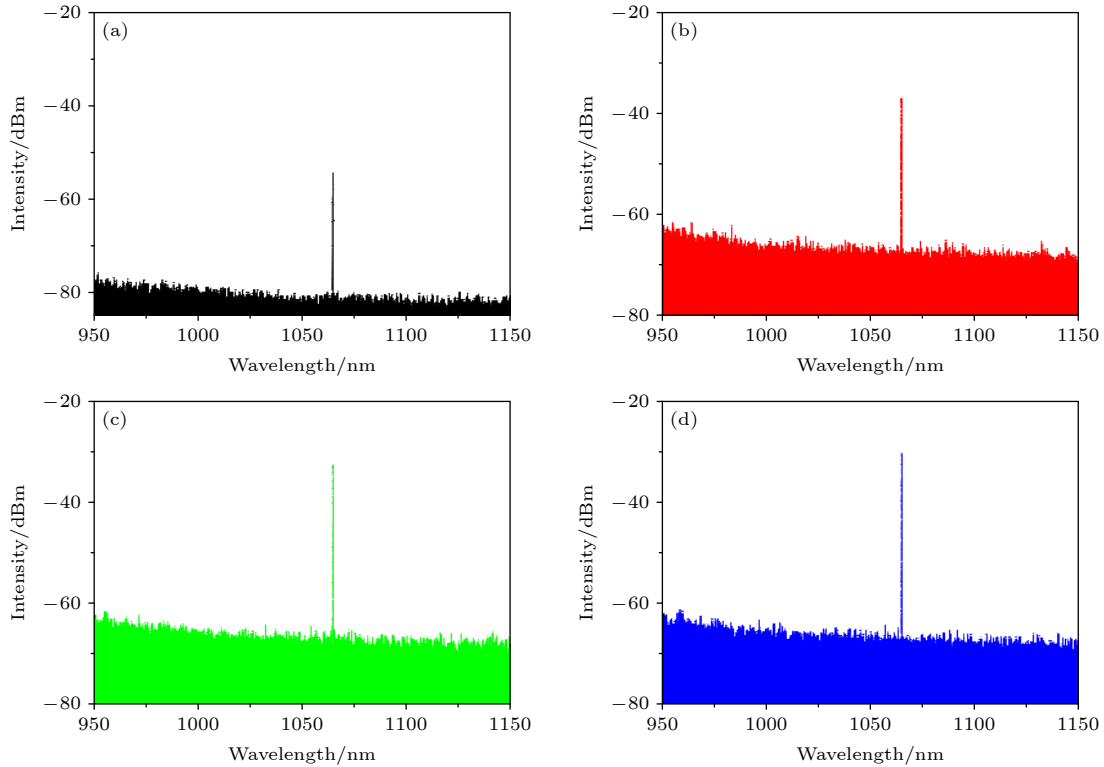


图 5 种子光及经过主放大器后不同输出功率下的光谱 (a) 种子光; (b) 输出功率 109 W; (c) 输出功率 255 W; (d) 输出功率 400 W
Fig. 5. Spectra of the seed light and the output laser with different power level: (a) Seed light; (b) output power of 109 W; (c) output power of 255 W; (d) output power of 400 W.

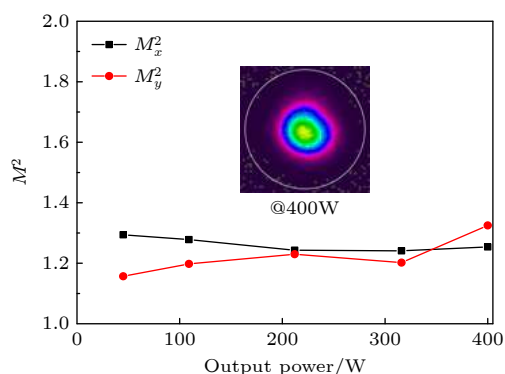


图 6 光束质量因子随输出功率的变化

Fig. 6. Beam quality factor versus output power.

实验过程中未观察到 SBS 效应, 功率的进一步提升主要受限于 TMI 效应, 下面对后续的优化设计方案进行讨论. 根据文献 [11] 的分析, 减小长锥形光纤的纤芯直径将有效提高 TMI 阈值, 本文自研长锥形光纤的纤芯直径从 $30.3 \mu\text{m}$ 变化到 $49.3 \mu\text{m}$, 后续可以尝试将长锥形光纤小端的纤芯直径减小至 25 或 $20 \mu\text{m}$. 同时, 实验中长锥形光纤尾部由于未进行有效冷却, 过量的热积累降低了 TMI 的阈值, 使用合适长度的匹配被动光纤将能实现对整段掺杂光纤的有效冷却, 从而一定程度提高 TMI 阈值. 另外, 实验中还发现扰动长锥形光纤的尾纤会导致输出光斑形态的变化和光束质量的退化. 其可能原因是光纤的 NA 较小, 且尾部的光纤芯径较大, 光纤的模式耦合更严重. 此外, 目前实验系统为非保偏系统, 后续将构建保偏实验系统, 实现单偏振激光输出. 由于保偏输出和非保偏输出的实验结构较为相似, 实现单偏振输出的主要难点在于保偏长锥形光纤的制备. 综合以上分析, 下一步将优化光纤制备工艺, 研制纤芯直径较小、热分布均匀的非保偏和保偏长锥形掺镱双包层光纤以及匹配的被动光纤, 并改进实验结构, 以期基于国产光纤实现更高功率的单频激光输出.

4 结论

长锥形光纤是实现单频光纤激光器高功率和高光束质量输出的有效途径. 本文基于自研的一段长度为 2.2 m 的长锥形掺镱双包层光纤, 搭建了单频 MOPA 系统, 在泵浦光功率约为 502 W 时, 获得功率 400 W, M^2 因子 1.29、信噪比 32 dB 的单频单模激光输出. 激光系统的斜率效率为 81.7%,

在输出功率为 418 W 时出现 TMI 效应. 这是目前基于国产增益光纤实现的最高功率全光纤结构单频单模光纤激光器. 进一步优化光纤参数、改进实验结构将有望基于国产光纤实现更高功率的单频单模激光输出.

感谢何加威、肖亮、喻湘荣、陈潇、范晨晨、李浩博等在实验过程中的支持和帮助.

参考文献

- [1] Fu S J, Shi W, Feng Y, Zhang L, Yang Z M, Xu S H, Zhu X S, Norwood R A, Peyghambarian N 2017 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **34** A49
- [2] Yang C S, Cen X, Xu S H, Yang Z M 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 0114002 (in Chinese) [杨昌盛, 岑旭, 徐善辉, 杨中民 2021 *光学学报* **41** 0114002]
- [3] Lai W C, Ma P F, Xiao H, Liu W, Li C, Jiang M, Xu J M, Su R T, Leng J Y, Ma Y X, Zhou P 2020 *High Power Las. Part. Beam.* **32** 121001 (in Chinese) [来文昌, 马鹏飞, 肖虎, 刘伟, 李灿, 姜曼, 许将明, 粟荣涛, 冷进勇, 马阎星, 周朴 2020 *强激光与粒子束* **32** 121001]
- [4] Chang H X, Chang Q, Xi J C, Hou T Y, Su R T, Ma P F, Wu J, Li C, Jiang M, Ma Y X, Zhou P 2020 *Photonics Res.* **8** 1943
- [5] Dong J Y, Zeng X, Cui S Z, Zhou J Q, Feng Y 2019 *Opt. Express* **27** 35362
- [6] Trikshev A I, Kurkov A S, Tsvetkov V B, Filatova S A, Kerttula J, Filippov V, Chamorovskiy Y K, Okhotnikov O G 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 1
- [7] Zhang L, Cui S Z, Liu C, Zhou J, Feng Y 2013 *Opt. Express* **21** 5456
- [8] Ma P F, Zhou P, Ma Y X, Su R T, Xu X J, Liu Z J 2013 *Appl. Opt.* **52** 4854
- [9] Robin C, Dajani I, Pulford B 2014 *Opt. Lett.* **39** 666
- [10] Huang L, Wu H S, Li R X, Li L, Ma P F, Wang X L, Leng J Y, Zhou P 2016 *Opt. Lett.* **42** 1
- [11] Huang L, Lai W C, Ma P F, Wang J, Su R T, Ma Y X, Li C, Zhi D, Zhou P 2020 *Opt. Lett.* **45** 4001
- [12] Lai W C, Ma P F, Liu W, Huang L, Li C, Ma Y X, Zhou P 2020 *Opt. Express* **28** 20908
- [13] Wellmann F, Steinke M, Meylahn F, Bode N, Willke B, Overmeyer L, Neumann J, Kracht D 2019 *Opt. Express* **27** 28523
- [14] Dixneuf C, Guiraud G, Bardin Y V, Rosa Q, Santarelli G 2020 *Opt. Express* **28** 10960
- [15] Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D 2009 *Adv. Opt. Photonics* **2** 1
- [16] Jauregui C, Limpert J, Tümmernann A 2013 *Nat. Photonics* **7** 861
- [17] Tao R M, Wang X L, Zhou P 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.* **24** 1
- [18] Tao R M, Ma P F, Wang X L, Zhou P, Liu Z J 2015 *Photonics Res.* **3** 86
- [19] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, Golant K, Pessa M, Okhotnikov O 2008 *Opt. Express* **16** 1929
- [20] Trikshev A, Kurkov A, Tsvetkov V, Filatova S, Kerttula J, Filippov V, Chamorovskiy Y K, Okhotnikov O 2013 *Laser*

- Phys. Lett.* **10** 065101
- [21] Roy V, Pare C, Labranche B, Laperle P, Desbiens L, Boivin M, Taillon Y 2017 *Fiber Lasers XIV: Technology and Systems* San Francisco, CA, January 30-February 2, 2017, p1008314
- [22] Xiao H, Dong X L, Zhou P, Xu X J, Chen J B 2011 *High Power Las. Part. Beam.* **23** 1437 (in Chinese) [肖虎, 董小林, 周朴, 许晓军, 陈金宝 2011 *强激光与粒子束* **23** 1437]
- [23] Wang X J, Xiao Q R, Yan P, Chen X, Li D, Du C, Mo Q, Yi Y Q, Pan R, Gong M L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164204 (in Chinese) [王雪娇, 肖起榕, 闫平, 陈霄, 李丹, 杜城, 莫琦, 衣永青, 潘蓉, 巩马理 2015 *物理学报* **64** 164204]
- [24] Wang Z H, Xiao Q R, Wang X J, Yi Y Q, Pang L, Pan R, Huang Y S, Tian J D, Li D, Yan P, Gong M L 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 024205 (in Chinese) [王泽晖, 肖起榕, 王雪娇, 衣永青, 庞璐, 潘蓉, 黄昱升, 田佳丁, 李丹, 闫平, 巩马理 2018 *物理学报* **67** 024205]
- [25] Lin H H, Tang X, Li C Y, Guo C, Liu Y, Zhao P F, Wang B P, Wang J J, Jing F 2018 *Chin. J. Las.* **45** 0315001 (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** 0315001]
- [26] 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 Optic. Sin.* **39** 0336001 (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** 0336001]
- [27] Li X W, Yu C L, Hu L L, Shen H, Quan Z, Li Q R, Lou F G, Wang M, Zhang L, Qi Y F, He B, Zhou J 2019 *Acta Optic. Sin.* **39** 0636001 (in Chinese) [李学文, 于春雷, 胡丽丽, 沈辉, 全昭, 李秋瑞, 楼风光, 王孟, 张磊, 漆云凤, 何兵, 周军 2019 *光学学报* **39** 0636001]
- [28] Liu Y Z, Xing Y B, Liao L, Wang Y B, Peng J G, Li H Q, Dai N L, Li J Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 184209 (in Chinese) [刘茵紫, 邢颖滨, 廖雷, 王一礴, 彭景刚, 李海清, 戴能利, 李进延 2020 *物理学报* **69** 184209]
- [29] Zhang Z L, Zhang F F, Lin X F, Wang S J, Cao C, Xing Y B, Liao L, Li J Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 234205 (in Chinese) [张志伦, 张芳芳, 林贤峰, 王世杰, 曹驰, 邢颖滨, 廖雷, 李进延 2020 *物理学报* **69** 234205]
- [30] She S F, Liu B, Chang C, Xu Y T, Xiao X S, Cui X X, Li Z, Zheng J K, Gao S, Zhang Y, Li Y Z, Zhou Z Y, Mei L, Hou C Q, Guo H T 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 6924
- [31] An Y, Yang H, Xiao H, Chen X, Huang L J, Pan Z Y, Wang X L, Xi X M, Ma P F, Wang Z F, Zhou P, Xu X J, Jiang Z F, Chen J B 2021 *Chin. J. Las.* **48** 0115002 (in Chinese) [安毅, 杨欢, 肖虎, 陈潇, 黄良金, 潘志勇, 王小林, 奚小明, 马鹏飞, 王泽锋, 周朴, 许晓军, 姜宗福, 陈金宝 2021 *中国激光* **48** 0115002]
- [32] 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, Jing F 2018 *High Power Las. Part. Beam.* **30** 060101 (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** 060101]
- [33] Zhang F P, Lou Q H, Zhou J, Zhao H M, Dong J X, Wei Y R, He B, Li J Y, Chen W B, Zhu J Q, Wang Z J 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 060322
- [34] Dong X L, Xiao H, Xu S H, Pan Z Y, Ma Y X, Wang X L, Zhou P, Yang Z M 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 111404

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

An Yi Pan Zhi-Yong Yang Huan Huang Liang-Jin[†] Ma Peng-Fei[‡]
Yan Zhi-Ping Jiang Zong-Fu Zhou Pu

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

(Received 12 April 2021; revised manuscript received 11 May 2021)

Abstract

In recent years, the high-power single-frequency fiber lasers have developed rapidly, and they have been used in nonlinear frequency conversion and gravitational wave detection. The main factors limiting the output power of single-frequency fiber lasers are the nonlinear effect and transverse mode instability (TMI) effect. In general, large-core fibers can mitigate nonlinear effects while small-core fibers help to suppress the TMI effect. Owing to the core diameter varying in the longitudinal direction, tapered double clad fiber (T-DCF) is a promising solution to simultaneously suppress the nonlinearity and TMI effects. In the present study, we have fabricated a piece of 2.2-m-long Ytterbium-doped T-DCF. The core diameter and the cladding diameter of this fiber vary gradually from 30.3 μm to 49.3 μm and from 245 μm to 404 μm , respectively. Using this homemade fiber, we construct an all-fiberized single-frequency master oscillator power amplifier system, which is pumped by laser diodes with a central wavelength of 976 nm. The seed of the system has a central wavelength of 1064 nm, and output power of 30 mW. The T-DCF is coiled on a piece of cooling plate, whose output end is cleaved at a 8° angle. The laser is output to free space and collimated by a free-space collimator. After the collimator, dichroic mirror is utilized to strip out the residual pump power for measuring power, spectrum, time-domain signal and beam quality. The output power increases linearly with the pumping power increasing. When the pumping power is 502 W, the output power reaches 400 W. And there is no stimulated Brillouin scattering (SBS) nor TMI under the power level. The corresponding slope efficiency is 81.7% while the M^2 is measured to be 1.29, exhibiting the single-mode output characteristic of the system. When the output power is further increased to 418 W, the TMI effect is observed, which limits further the power scaling of the single-mode output. To the best of our knowledge, this is the highest output power of single-frequency fiber laser based on home-made gain fibers. The results indicate that T-DCFs can simultaneously suppress the nonlinearity and TMI, thus providing a useful reference for further power scaling of single-frequency fiber lasers. Higher output power is expected by optimizing the parameters of T-DCF and the structure of system.

Keywords: single-frequency, high power fiber lasers, long tapered fiber, transverse mode instability

PACS: 42.55.Wd, 42.81.Bm, 42.60.Da, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.70.20210682

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61805280, 62035015, 61806217), the Science Research Plan of National University of Defense Technology, China (Grant No. ZK19-07), and the Open Research Fund of State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, China (Grant No. SKL2020ZR07).

[†] Corresponding author. E-mail: hlj203@nudt.edu.cn

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