

基于M型掺镱光纤的近单模2 kW光纤放大器

林贤峰 张志伦 邢颖滨 陈瑰 廖雷 彭景刚 李海清 戴能利 李进延

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

Lin Xian-Feng Zhang Zhi-Lun Xing Ying-Bin Chen Gui Liao Lei Peng Jing-Gang Li Hai-Qing Dai Neng-Li Li Jin-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 034205 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211751

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211751>

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

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>

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>

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>

有源光纤中稀土离子激光上能级寿命测量的研究

Upper-laser-level lifetime measurement of rare earth dopant in active fiber

物理学报. 2019, 68(22): 224202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190616>

基于锯齿波脉冲抑制自相位调制的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器

High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses

物理学报. 2021, 70(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210496>

窄线宽纳秒脉冲光纤拉曼放大器的理论模型和数值分析

Theoretical and numerical study on narrow-linewidth nanosecond pulsed Raman fiber amplifier

物理学报. 2018, 67(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172679>

基于 M 型掺镱光纤的近单模 2 kW 光纤放大器*

林贤峰¹⁾ 张志伦¹⁾ 邢颖滨¹⁾ 陈瑰¹⁾ 廖雷²⁾彭景刚¹⁾ 李海清¹⁾ 戴能利¹⁾ 李进延^{1)†}

1) (华中科技大学, 武汉光电国家研究中心, 武汉 430074)

2) (武汉长进激光技术有限公司, 武汉 430206)

(2021 年 9 月 20 日收到; 2021 年 10 月 10 日收到修改稿)

模式不稳定效应和非线性效应已经成为高功率光纤激光器中限制输出功率和光束质量进一步提升的主要障碍. 采用改进的化学气相沉积工艺结合溶液掺杂技术制备 25/400 μm 的 M 型掺镱双包层光纤, 纤芯和中间凹陷区域的数值孔径分别为 0.054 和 0.025. 基于该光纤搭建 976 nm 双向泵浦全光纤结构放大器. 在泵浦光功率为 3283 W 时, 获得 2285 W 中心波长为 1080 nm 的激光输出, 3 dB 线宽为 3.01 nm, 测量的光束质量因子为 1.42, 且未出现受激拉曼散射现象. 这是目前基于 M 型掺镱光纤实现的最高输出功率, 通过优化光纤结构参数实现功率进一步提升是有希望的.

关键词: M 型光纤, 模式不稳定, 光纤放大器**PACS:** 42.55.Wd, 42.81.Cn, 42.60.Da, 42.81.-i**DOI:** 10.7498/aps.71.20211751

1 引言

光纤激光器是最有前途的固态激光器之一, 具有光束质量优良、转换效率高、结构紧凑、高效散热和易维护等显著优点^[1], 已经极大地促进了工业制造、军事国防、现代医疗和科学研究等诸多领域的发展. 近二十年来, 由于双包层光纤制造工艺的不断成熟和泵浦源亮度的增强, 光纤激光器的输出功率有了显著的提升^[2-6]. 在全光纤激光放大器方面, IPG 公司在 2009 年^[4]和 2013 年^[5]分别报道了 10 和 20 kW 的全光纤激光系统. 在全光纤激光振荡器方面, 日本藤仓公司在 2020 年实现了输出功率为 8 kW 的全光纤振荡器^[6]. 但是伴随着激光功率的不断提升, 这会导致光纤纤芯的能量密度很高, 容易产生强烈的非线性效应 (nonlinear effects, NLEs)^[7], 如受激布里渊散射、受激拉曼散射 (stimu-

lated Raman scattering, SRS). 为了克服 NLEs, 最直接有效的手段就是增大纤芯尺寸以降低纤芯功率密度. 这样, 光纤自然就不可避免地支持多个模式, 引起光束质量的下降并触发模式不稳定 (mode instability, MI) 效应^[8,9]. 这两种有害效应表现出相反的趋势: 一方面, 通过增加模场直径可以减小 NLEs; 另一方面, 这通常会导致 MI 阈值降低. 因此, 在光束质量优良的前提下实现功率提升仍然是一项具有挑战性的任务, 挑战在于找到同时将 MI 和 NLEs 影响最小化的光纤设计. 为了在大模场面积 (LMA) 光纤继续保持单模运转, 研究人员们已经提出了一些特殊的横向结构设计, 例如低数值孔径 (numerical aperture, NA) 光纤^[10]、手性耦合芯光纤^[11]、光子晶体光纤^[12]、大节距光纤^[13]、部分掺杂光纤^[14]、M 型光纤^[15]等. 其中, M 型光纤因折射率剖面 (refractive index profile, RIP) 的形状类似于字母“M”而得名, 具有如下特殊性质: 增

* 国家自然科学基金 (批准号: 61735007, 61975061) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lji@mail.hust.edu.cn

强泵浦吸收效率^[16]、激发高阶模用于色散管理^[17,18]、平坦基模分布用于抑制非线性效应^[19–21]. 此外, M 型光纤可以打破 NA 和模场面积缩放之间的严格权衡^[22]. 与纤芯 NA 相同的阶跃光纤相比, M 型光纤具有更大的模场面积, 这有助于避免非线性效应. 然而, 关于 M 型光纤在大功率连续激光实验中的报道相对较少. 2018 年, 华中科技大学的 Liu 等^[23]报道了基于包层沟道辅助的中间凹陷光纤获得了 456 W 近衍射极限激光输出. 截止目前, 基于 M 型光纤的千瓦级光纤激光器尚未有报道.

本文首先借助 COMSOL 软件计算分析折射率凹陷的深度及宽度对 M 型光纤有效模场面积和弯曲损耗的影响, 并确定设计尺寸范围. 接着采用改善的化学气相沉积 (modified chemical vapor deposition, MCVD) 工艺结合溶液掺杂技术制备出 25/400 μm M 型光纤, 并基于此光纤搭建 976 nm 双向泵浦全光纤放大器, 获得最大功率为 2285 W 的激光输出, 光束质量为 $M^2 \approx 1.42$.

2 实验结果

2.1 光纤结构模拟计算

图 1 给出了 M 型光纤的折射率剖面及横截面结构. 图中的 n_{dip} , n_{core} 和 n_{clad} 分别表示中间凹陷区域的折射率、纤芯的折射率和石英包层的折射率, 并且 $n_{\text{core}} > n_{\text{dip}} > n_{\text{clad}}$. d 和 r 分别代表中间凹陷区域的半径和纤芯的半径. Δn_1 表示中间凹陷区域与纤芯的折射率差, Δn_2 表示纤芯与包层的折射率差. 采用基于有限元法的 COMSOL 软件结合完美匹配层 (perfectly matched layer, PML) 来计算分析 M 型光纤的结构特性. 当对光纤施加弯曲时, 其扰动的折射率分布可利用保角映射方程^[24]来表示:

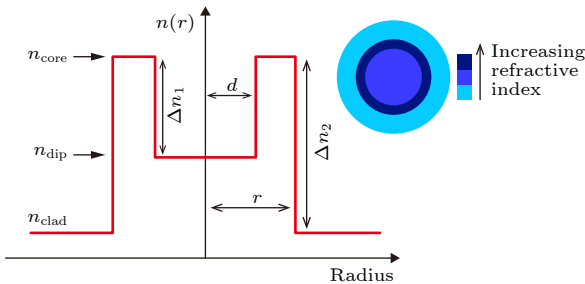


图 1 M 型光纤的折射率剖面; 插图为 M 型光纤的端面

Fig. 1. Refractive index profile of the M-type fiber. Inset is the end facet of an M-type fiber.

$$n_{\text{bent}} = n_{\text{straight}} \sqrt{1 + 2 \frac{x}{\rho R}}, \quad (1)$$

其中, n_{bent} 和 n_{straight} 分别代表弯曲光纤和直光纤的折射率分布; x 是光纤截面上相对于纤芯中心的横向位置; R 是弯曲半径; ρ 是弹光效应的校正因子, 这里取为 1.25.

有效模场面积 (effective mode area, EMA) A_{eff} 和限制损耗 (confinement loss, CL) 是光纤的两个关键参数, 可以表示为^[25]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E|^4 dx dy}, \quad (2)$$

$$CL = \frac{20}{\ln(10)} \text{Im} \beta = \frac{40\pi}{\ln(10)\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (3)$$

其中, E 是电场分布, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}$ 是传播常数, n_{eff} 是对应模式的有效折射率, λ 是工作波长.

本节固定不变的计算参数有: $\lambda = 1.08 \mu\text{m}$, $r = 12.5 \mu\text{m}$, $n_{\text{clad}} = 1.45$, $n_{\text{core}} = 1.4510$. 首先模拟了直光纤情况下中间凹陷的深度 Δn_1 与宽度 d 对基模 EMA 的影响, 结果见图 2(a). 可以直观地看出, 固定 d 不变, EMA 随着 Δn_1 的增加而增加. 固定 Δn_1 不变, 随着 d 的增加, EMA 先增大后减小. 另外, Δn_1 越大, 最大的 EMA 出现在越大的 d 值处. 在模拟过程中也发现到, 在获得 EMA 最大值的 d 值处的基模电场分布并非呈现平坦分布. 图 2(b) 给出了 $\Delta n_1 = 6 \times 10^{-4}$ 下的 $d = 10 \mu\text{m}$ (取得最大 EMA 约为 $676.79 \mu\text{m}^2$) 对应的电场分布和 $d = 8.9 \mu\text{m}$ (EMA 约为 $664.44 \mu\text{m}^2$) 的平坦电场分布.

众所周知, 单模运转是获得高光束质量输出的必要条件. 对于弯曲状态下的限制损耗被视为弯曲损耗. 根据文献^[26, 27], 可以实现单模运转的条件是基模的弯曲损耗小于 0.1 dB/m, 而高阶模的弯曲损耗大于 1 dB/m. 因为其他高阶模的弯曲损耗一般都比 LP_{11} 的高, 所以高阶模考虑的是最小弯曲损耗的 LP_{11} . 在模型中添加弯曲并保持 30 cm 弯曲直径, 计算了不同的 Δn_1 和 d 下 LP_{01} 和 LP_{11} 的弯曲损耗, 结果如图 2(c) 和图 2(d) 所示. 在一定 d 下, LP_{01} 和 LP_{11} 的弯曲损耗随着 Δn_1 的增加而增加, 但增幅比例逐渐变小. 在一定 Δn_1 下, 随着 d 的增加, LP_{01} 和 LP_{11} 的弯曲损耗刚开始是很缓慢增加, 然后迅速成倍增加; 并且在越大的 Δn_1 下, 这种迅速上升的斜率越大. 在该弯曲条件下符合单模运转条件的结构参数仅有: $\Delta n_1 = 4 \times 10^{-4}$,

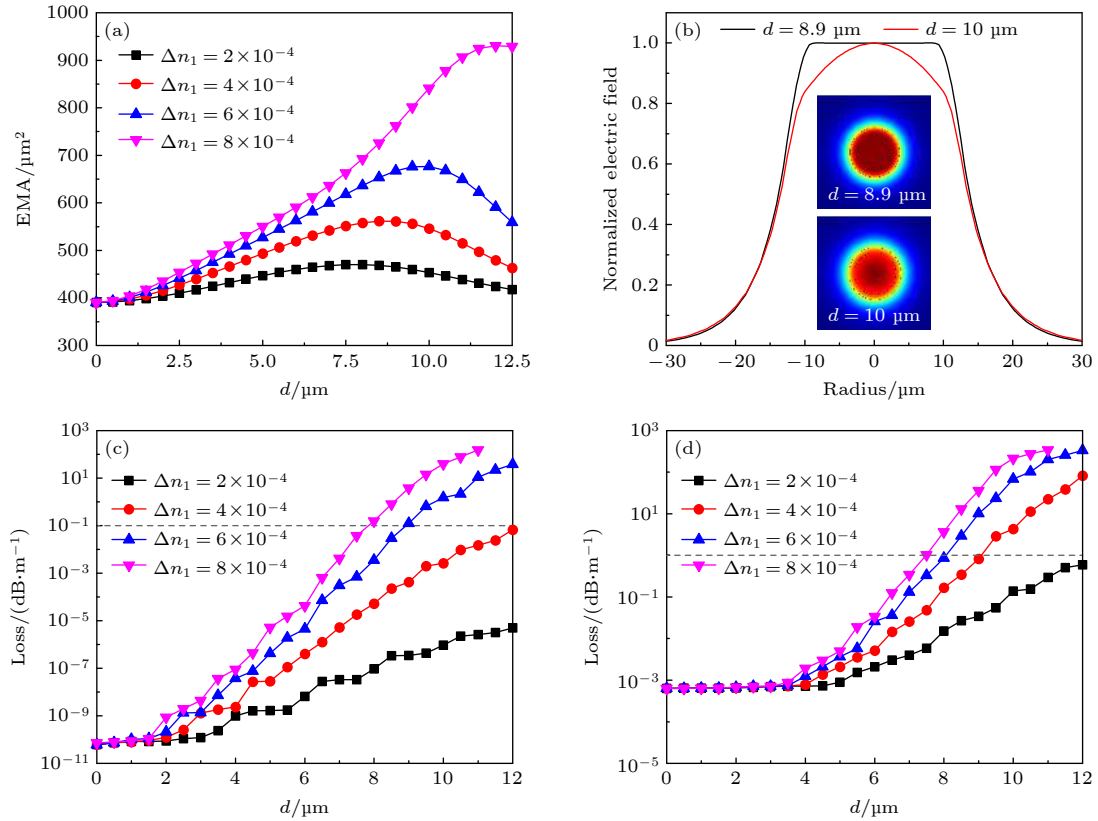


图 2 (a) 不同纤芯中间凹陷的深度 (Δn_1) 及宽度 (d) 下基模的有效模场面积; (b) 当 $\Delta n_1 = 6 \times 10^{-4}$ 时, $d = 8.9$ 和 10 μm 的基模归一化电场 (插图为相应的电场横向分量表面轮廓); 在弯曲直径 30 cm 下, 不同的 Δn_1 及 d 下 (c) LP_{01} 和 (d) LP_{11} 的弯曲损耗

Fig. 2. (a) EMA of FM for different depth (Δn_1) and width (d) of central dip in core; (b) when $\Delta n_1 = 6 \times 10^{-4}$, normalized electric field of FM for $d = 8.9$ and 10 μm (Insets are the corresponding surface profiles of the transverse component of the electric fields); the bending losses of (c) LP_{01} and (d) LP_{11} for different Δn_1 and d under a bending diameter of 30 cm.

$9.5 \mu\text{m} \leq d \leq 12.5 \mu\text{m}$; $\Delta n_1 = 6 \times 10^{-4}$, $d = 8.5 \mu\text{m}$;
 $\Delta n_1 = 8 \times 10^{-4}$, $d = 7.5 \mu\text{m}$.

2.2 光纤制备

采用成熟的 MCVD 工艺结合溶液掺杂技术制备出光纤预制棒, 使用光纤预制棒分析仪 P104 (Photon Kinetics) 测得折射率剖面见图 3(a). 预制棒 Z 方向上 100, 200 和 300 mm 作为 3 个测量点, 它们对应的折射率剖面基本一致, 这反映出预制棒的纵向均匀性比较不错. n_1 与 n_3 的折射率差是 0.0010, n_2 和 n_3 的折射率差是 0.00022, 相应地, n_1 与 n_3 对应的 NA 是 0.054, n_2 和 n_3 对应的 NA 是 0.025. 将预制棒打磨成八边形, 然后经过高温拉丝获得尺寸为 $25/400$ μm 的双包层光纤. 按光纤与预制棒之间的尺寸比例, 从预制棒折射率剖面数据换算得到光纤的折射率剖面 (如图 3(b) 所示), 可以看出折射率凹陷区域宽度大约是 8 μm , 仅偏离理想尺寸 0.5 μm . 光纤内元素浓度分布通过电子探针显微分析仪 (electron probe microanalysis,

EPMA) 测量, 结果如图 3(c) 所示. Yb^{3+} 和 Al^{3+} 离子沿径向分布保持基本一致, Ce^{3+} 离子中间相比两侧低, F^- 离子呈相反分布. 利用有限元分析方法对该光纤对应的折射率剖面进行模拟, 结果如图 3(d) 所示. LP_{01} 和 LP_{11} 弯曲损耗随弯曲直径减小而增大, 弯曲直径在 26—30 cm 可以满足单模运转标准. 相应地, EMA 保持在 505 — 525 μm^2 范围内.

2.3 光纤激光性能测试

采用主振荡功率放大 (master oscillator power amplifier, MOPA) 全光纤激光系统测试该光纤, 系统结构如图 4 所示, 振荡器部分包括普通 20/400 μm 掺镱双包层光纤和一对光纤布拉格光栅, 高反射率光纤布拉格光栅 (high reflectivity fiber Bragg grating, HR-FBG) 和输出耦合光纤布拉格光栅 (output coupler fiber Bragg grating, OC-FBG) 在 1080 nm 工作波长处分别提供 99.9% 和 11% 的反射率. 在本实验中, 振荡器提供 100 W 种子激光. 为了提高种子光的光束质量, 在种子光注入放大级

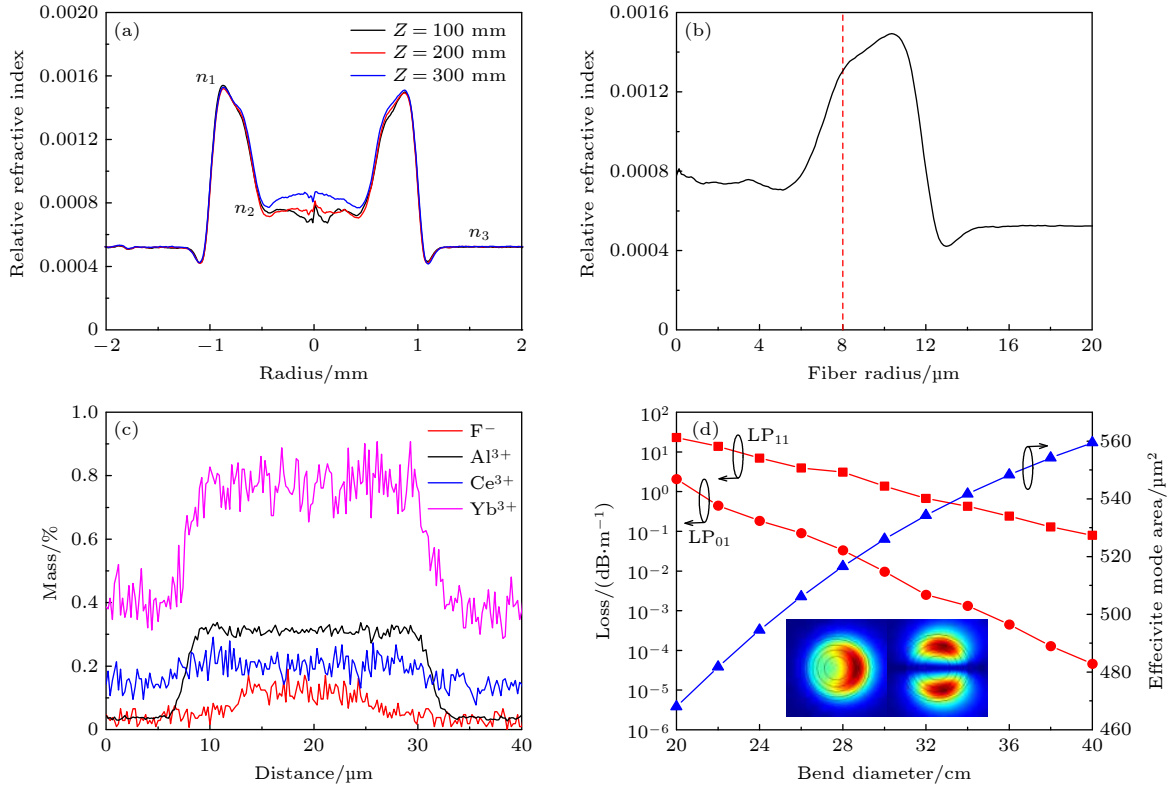


图 3 (a) 光纤预制棒折射率剖面; (b) 光纤折射率剖面; (c) 纤芯区域元素分布; (d) LP_{01} 和 LP_{11} 模式的弯曲损耗及 LP_{01} 模式的有效模场面积随弯曲直径变化关系 (插图分别为 LP_{01} 和 LP_{11} 模式在弯曲下的模场分布)

Fig. 3. (a) Refractive index profile of the fiber preform; (b) refractive index profile of the fiber; (c) elemental distribution in fiber core region; (d) the bending loss of LP_{01} and LP_{11} modes and the EMA of LP_{01} mode as a function of the bending diameter (Insets are mode field distributions of LP_{01} and LP_{11} modes under bending).

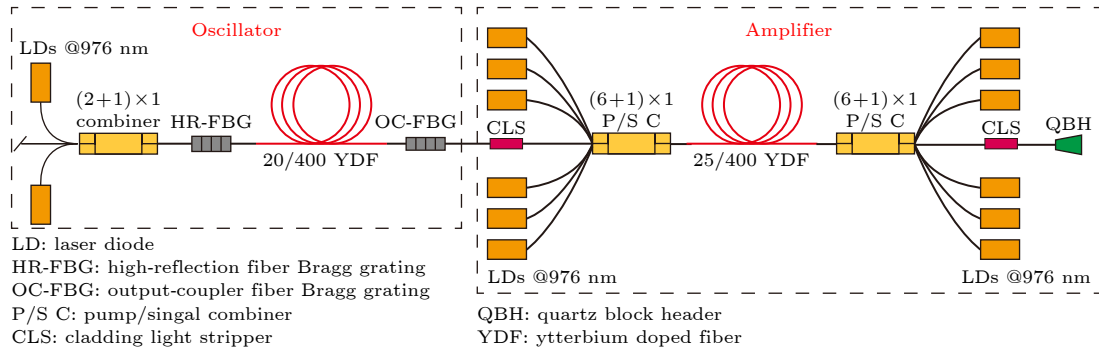


图 4 全光纤放大器的实验装置

Fig. 4. Experimental setup of the all-fiber amplifier.

前, 采用包层光剥离器 (cladding light stripper, CLS) 去除多余的泵浦光和包层激光。功率放大级采用双向泵浦结构, 12 个中心波长为 976 nm 的半导体激光器 (laser diode, LD) 熔接到前向及后向 $(6+1) \times 1$ 个合束器的泵浦臂上。前向泵浦合束器和后向泵浦合束器的信号输入光纤的尺寸为 $25/250 \mu\text{m}$, 输出光纤的尺寸为 $25/400 \mu\text{m}$ 。增益光纤采用上述制备获得的 $25/400 \mu\text{m}$ M 型光纤, 该

光纤在 976 nm 处的吸收系数测量为 1.3 dB/m, 为保证足够的泵浦吸收采用 19 m 长光纤, 总吸收达到 24.7 dB。增益光纤采取“小圈注入、大圈输出”跑道型盘绕方式, 弯曲直径从 26 cm 到 28.3 cm。最后经 CLS 和石英块输出头 (quartz block header, QBH) 输出。在整个实验过程中, 分别采用功率计 (power meter, PM)、光谱分析仪 (optics spectrum analyzer, OSA)、光电探测器 (photoelectric dete-

ector, PD) 和激光质量监测仪 (laser quality monitor, LQM) 记录功率、光谱、时域和光束质量。

首先进行前向泵浦方案实验, 输出功率-泵浦功率曲线如图 5(a) 所示。从红色实线可以看出, 输出激光功率基本处于线性增长。当注入的泵浦功率为 2283 W, 输出功率达到 1547 W, 对应的光光效率为 63.6%, 此时的输出光谱 (如图 5(a) 的插图所示) 的 3 dB 线宽为 2.14 nm。测得的光光效率偏低的原因主要是有源光纤与后向合束器的模场不匹配, 导致纤芯中激光泄漏到包层中产生热量, 在实验中观察到后向合束器的壳体承受着高温的现象证实了该原因。图 5(b) 给出了 PD 采集到的时域信号及经傅里叶变换的频域信号, 当输出功率从 1493 W 增加到 1530 W 时, 时域上发生清晰的抖动, 并且频域上也出现 0—5 kHz 范围的特征峰,

表明此时激光器出现了 MI 现象。

接下来进行后向泵浦方案实验, 实验结果如图 6 所示。当泵浦功率为 2218 W, 最高输出功率达到 1602 W, 对应的光光效率为 67.7%, 输出光谱的 3 dB 线宽为 1.56 nm。此外, 当输出功率达到 1481 W, 时域和频域上已经出现了明显的 MI 特征。回顾前向泵浦方案的结果, 意外发现到该光纤在后向泵浦下的 MI 阈值比前向的低。其中可能的原因正如文献 [28] 所描述: 一是有源光纤在后向泵浦方案中产生更大的温度梯度。此外, 该实验中后向合束器的严重发热进一步拉大前、后向泵浦方案之间的温度梯度差距。二是因为“小圈注入、大圈输出”跑道型盘绕方式导致靠近信号注入端的光纤部分能更好地抑制高阶模, 这也意味着前向泵浦方案 TMI 阈值可能会偏高。

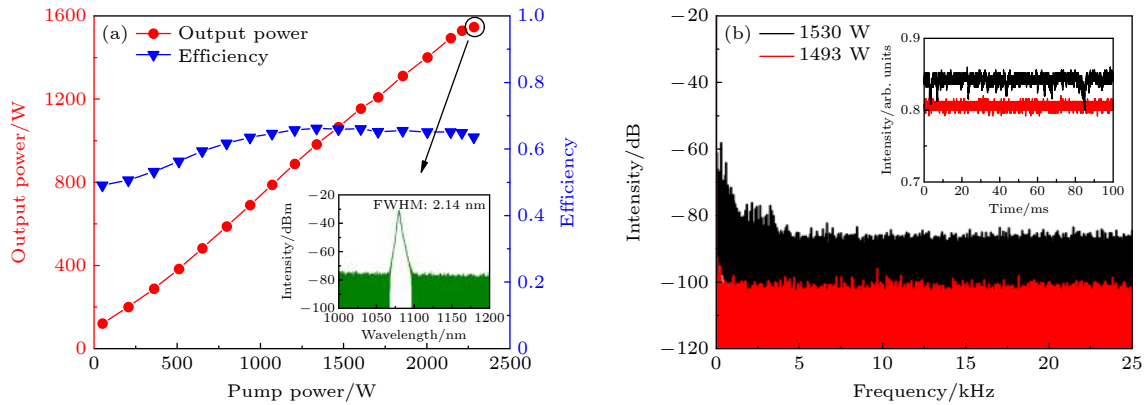


图 5 前向泵浦的实验结果 (a) 不同泵浦功率下的输出功率和效率 (插图为最高输出功率下的光谱); (b) 不同输出功率下的时域信号 (插图) 及对应的频域信号

Fig. 5. Experimental results of forward-pumping: (a) Output power and efficiency at different pump powers (Inset is spectrum at the highest power); (b) time domain signal (inset) and corresponding frequency domain signal at different output powers.

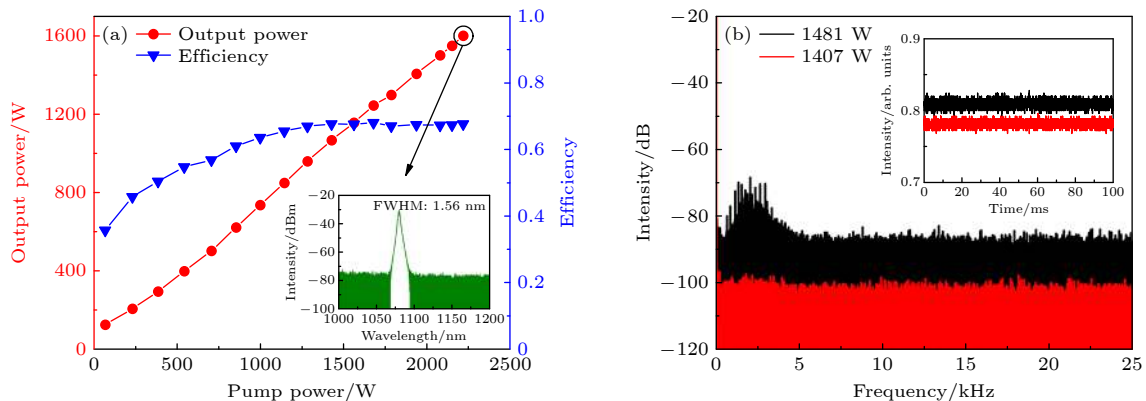


图 6 后向泵浦的实验结果 (a) 不同泵浦功率下的输出功率和效率 (插图是最高输出功率下的光谱); (b) 不同输出功率下的时域信号 (插图) 及对应的频域信号

Fig. 6. Experimental results of backward-pumping: (a) Output power and efficiency at different pump powers (Inset is spectrum at the highest power); (b) time domain signal (inset) and corresponding frequency domain signal at different output powers.

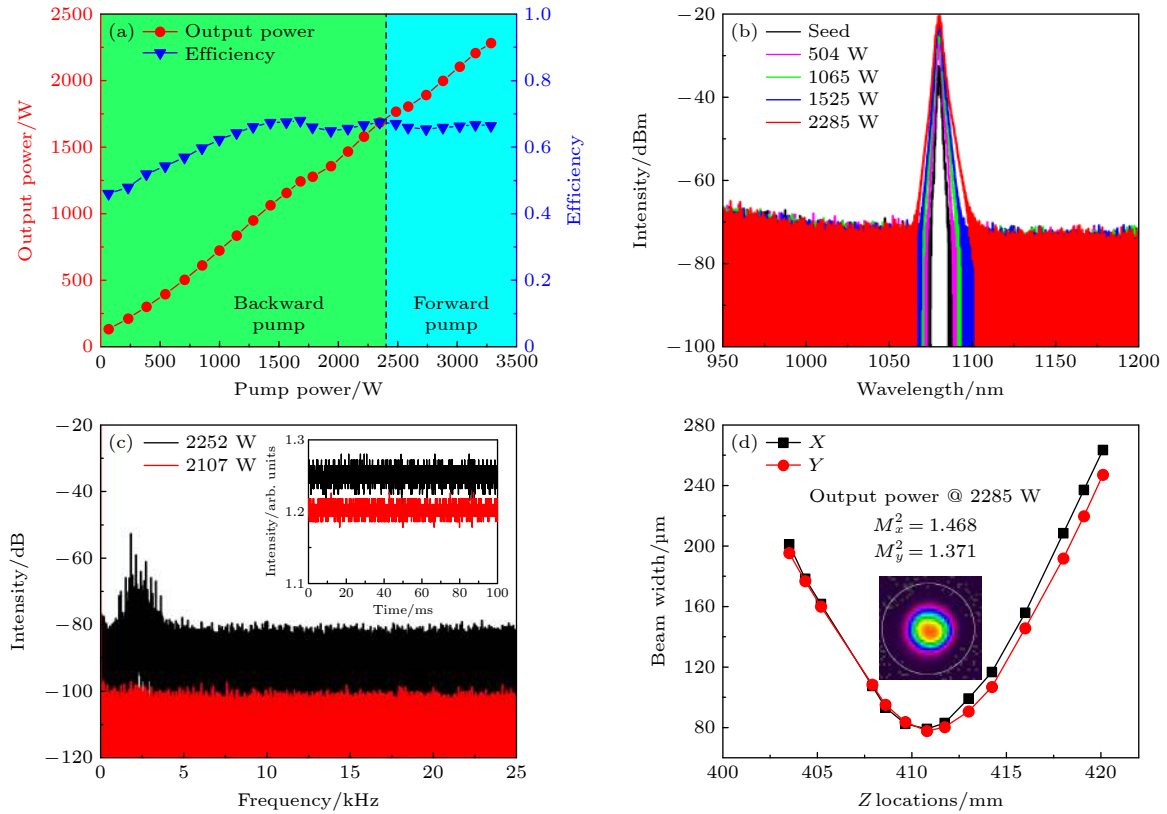


图 7 双向泵浦的实验结果 (a) 不同泵浦功率下的输出功率和效率; (b) 不同输出功率下测量的光谱; (c) 不同输出功率下的时域信号(插图)及对应的频域信号; (d) 最高输出功率时的激光光束质量

Fig. 7. Experimental results of bidirectional pumping: (a) Output power and efficiency at different pump powers; (b) measured spectra at different output powers; (c) time domain signal (inset) and corresponding frequency domain signal at different output powers; (d) the laser beam quality at the maximum output power.

最后进行双向泵浦方案实验, 测量的输出激光功率和光光效率随泵浦光功率的变化如图 7(a) 所示. 当泵浦功率达到 3283 W (前向/后向泵浦占比为 0.4), 获得了 2285 W 的最大功率输出, 对应的光光效率为 66.5%. 图 7(b) 为不同功率下的输出激光光谱, 无 SRS 信号显示, 最高输出功率对应光谱的 3 dB 线宽从 100 W 种子光的 1.30 nm 展宽到 3.01 nm. 图 7(c) 给出在输出功率为 2107 和 2252 W 运行下输出激光的时域信号及相应的频域信号. 在输出功率为 2107 W 运行下, 时域信号相当稳定, 在相应的频域没有明显的频率分量. 当输出功率上升到 2252 W, 观察到时域信号的周期波动, 并且频域上存在一些特征耦合频率分量, 由此可以判断出此时已经出现 MI 现象. 最高输出功率下测量的 M^2 因子和束腰的光束轮廓如图 7(d) 所示, M^2 因子为 1.42 ($M_x^2 = 1.468$, $M_y^2 = 1.371$).

首次在千瓦功率级激光器系统验证 M 型光纤, 虽然功率提升受到 MI 的限制, 但是进一步优化光纤有望实现更高的输出功率. 例如, M 型光纤的尺

寸减小到 20/400 μm , 并且其模场需要与后向合束器的输出信号纤 (25/400 μm 或 30/400 μm) 的模场匹配, 这样既保证了正常光光效率, 也提升了 MI 阈值; 另外, 可以结合限制掺杂技术抑制高阶模的增益, 纤芯的凹陷区域中掺入增益离子, 而高折射率环中不掺入增益离子.

3 结 论

基于 MCVD 工艺结合溶液掺杂技术制备了 M 型掺铽双包层光纤, 纤芯/包层尺寸为 25/400 μm . 搭建 976 nm 双向泵浦 MOPA 系统测试 M 型光纤, 获得 2285 W 中心波长为 1080 nm 激光输出, 对应的光光效率为 66.5%, 输出激光光谱的 3 dB 带宽为 3.01 nm, 测得的光束质量为 $M^2 \approx 1.42$. 据我们所知, 该结果是目前基于 M 型光纤达到的最高输出功率. 未来的工作将优化 M 型光纤结构参数以实现更高效率、更高功率的稳定激光输出.

感谢国防科技大学王小林老师、奚小明老师、叶云博士在相关测试方面的帮助.

参考文献

- [1] Jauregui C, Limpert J, Tünnemann A 2013 *Nat. Photonics* **7** 861
- [2] Wang Z H, Xiao Q R, Wang X J, Yi Y Q, Pang L 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 024205 (in Chinese) [王泽晖, 肖起榕, 王雪娇, 衣永青, 庞璐 2018 物理学报 **67** 024205]
- [3] Xi X M, Wang P, Yang B L, Wang X L, Zhang H W, Ning Y, Han K, Wang Z F, Zhou P, Xu X J, Chen J B 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 0116001 (in Chinese) [奚小明, 王鹏, 杨保来, 王小林, 张汉伟, 宁禹, 韩凯, 王泽锋, 周朴, 许晓军, 陈金宝 2021 中国激光 **48** 0116001]
- [4] O'Connor M, Gapontsev V, Fomin V, Abramov M, Ferin A 2009 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* Baltimore, Maryland, USA, May 31–June 5, 2009 pCThA3
- [5] Shiner B 2013 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* San Jose, California, USA, June 9–14, 2013 pAF2J.1
- [6] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, Shirakura Y, Kurihara T, Nakanishi Y, Yamamoto T, Nakayama M, Ikoma S, Shima K 2020 *Fiber Lasers XVII: Technology and Systems* San Francisco, California, USA, February 2–21, 2020 p1126022
- [7] Zervas M N, Codemard C A 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20** 219
- [8] Tao R M, Zhou P, Wang X L, Si L, Liu Z J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085202 (in Chinese) [陶汝茂, 周朴, 王小林, 司磊, 刘泽金 2014 物理学报 **63** 085202]
- [9] Zervas M N 2019 *Opt. Express* **27** 19019
- [10] Jain D, Jung Y, Barua P, Alam S, Sahu J K 2015 *Opt. Express* **23** 7407
- [11] Ma X, Zhu C, Hu I N, Kaplan A, Galvanauskas A 2014 *Opt. Express* **22** 9206
- [12] Wang M, Wang F, Feng S, Yu C, Wang S, Zhou Q, Zhang L, Lou F, Chen D, Hu L 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 71401
- [13] Stutzki F, Jansen F, Otto H J, Jauregui C, Limpert J, Tünnemann A 2014 *Optica* **1** 233
- [14] 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]
- [15] Jain D, George M A, Harris B, Fleming S 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 4478
- [16] Glas P, Naumann M, Schirrmacher A, Unger S, Pertsch T 1998 *Appl. Opt.* **37** 8434
- [17] Aleshkina S S, Likhachev M E, Senatorov A K, Bubnov M M, Salaganskii M Y, Guryanov A N 2013 *Opt. Express* **21** 23838
- [18] Aleshkina S S, Yatsenko Y P, Salganskii M Y, Lipatov D S, Senatorov A K, Tausenev A V, Shepelev D V, Bubnov M M, Guryanov A N, Likhachev M E 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 1
- [19] Ghatak A K, Goyal I C, Jindal R 1999 *International Conference on Fiber Optics and Photonics: Selected Papers from Photonics India'98* New Delhi, India, April 28, 1999 p40
- [20] Wang C C, Zhang F, Lu Y C, Liu C, Geng R, Ning T G, and Jian S S 2009 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** 65402
- [21] Valentin C, Calvet P, Quiquempois Y, Bouwmans G, Bigot L, Coulombier Q, Douay M, Delplace K, Mussot A, Hugonnot E 2013 *Opt. Express* **21** 23250
- [22] Jain D, Sahu J K, Fleming S 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 6362
- [23] Liu Y, Zhang F, Zhao N, Lin X, Liao L, Wang Y, Peng J, Li H, Yang L, Dai N, Li J 2018 *Opt. Express* **26** 3421
- [24] Jain D, Baskiotis C, Sahu J K 2013 *Opt. Express* **21** 26663
- [25] Wang X, Lou S, Lu W 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20** 200
- [26] Wang X, Lou S, Lu W, Sheng X, Zhao T, Hua P 2016 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **22** 117
- [27] Saitoh K, Tsuchida Y, Rosa L, Koshiba M, Poli F, Cucinotta A, Selli S, Pal M, Paul M, Ghosh D, Bhadra S 2009 *Opt. Express* **17** 4913
- [28] Shi C, Su R T, Zhang H W, Yang B L, Wang X L, Zhou P, Xu X J, Lu Q S 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 1

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

Lin Xian-Feng¹⁾ Zhang Zhi-Lun¹⁾ Xing Ying-Bin¹⁾ Chen Gui¹⁾ Liao Lei²⁾
Peng Jing-Gang¹⁾ Li Hai-Qing¹⁾ Dai Neng-Li¹⁾ Li Jin-Yan^{1)†}

¹⁾ (Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

²⁾ (Wuhan Changjin Laser Technology Co., Ltd., Wuhan 430206, China)

(Received 20 September 2021; revised manuscript received 10 October 2021)

Abstract

High power fiber laser systems have attracted extensive attention due to compactness, good beam quality, efficient heat dissipation and high conversion efficiency. They are widely used in industrial processing, military, medical treatment and other fields. Over the past two decades, owing to the development of double cladding fiber and high-brightness laser diodes, the output power of fiber lasers has been greatly improved. Unfortunately, nonlinear effects (NLEs), such as stimulated Brillouin scattering (SBS) and stimulated Raman scattering (SRS), restrict the further enhancement of the output power of fiber lasers. Apparently, increasing the core diameter is the most common way to suppress NLEs in the fiber, but this causes another limiting factor, i.e. mode instability (MI), resulting in the deterioration of the beam quality and in the limitation of the power scaling. Therefore, it is important and urgent to suppress the NLEs and MI simultaneously in fiber lasers. The M-type fiber, by designing refractive index profile, breaks through the stringent trade-off between mode area and numerical aperture (NA), so it possesses a larger mode area than the step index fiber, which helps to avoid NLEs and expand the power range. The M-type ytterbium doped double-clad fiber is fabricated by the modified chemical vapor deposition (MCVD) process with solution doping technology (SDT), the core/cladding diameter is 25/400 μm . The NA of high index ring and index dip in the core are 0.054 and 0.025, respectively. To test the performance of the M-type fiber during high-power operation, a 976 nm bidirectional pumped all-fiber amplifier is constructed. As a result, maximum output power of 2285 W is achieved with an optical-to-optical conversion efficiency of 66.5% under bidirectional pumping scheme, and the measured M^2 factor is 1.42, the central wavelength and 3 dB linewidth of output laser are 1080 nm and 3.01 nm, respectively. To the best of our knowledge, this is the highest output power in a continuous-wave fiber laser employing an M-type fiber at present. However, the MI effect is observed at the output power of 2252 W. The future work will focus on optimizing the structure of the M-type fiber to achieve a stabler higher-power and higher-efficiency laser output.

Keywords: M-type fiber, mode instability, fiber amplifier

PACS: 42.55.Wd, 42.81.Cn, 42.60.Da, 42.81.-i

DOI: 10.7498/aps.71.20211751

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61735007, 61975061).

† Corresponding author. E-mail: ljy@mail.hust.edu.cn