

## 530 W 全光纤结构连续掺铥光纤激光器\*

刘茵紫 邢颖滨 廖雷 王一礪 彭景刚  
李海清 戴能利 李进延†

(华中科技大学, 武汉光电国家研究中心, 武汉 430074)

(2020年3月30日收到; 2020年5月6日收到修改稿)

采用改进的化学气相沉积工艺结合溶液掺杂法制备了掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤预制棒, 并拉制成纤芯/包层尺寸约为  $25/400\ \mu\text{m}$  的双包层掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤, 通过电子探针显微分析测得其中  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的浓度分别为 2.6 wt% 和 1.01 wt%, 在 793 nm 处测得的包层吸收为 3 dB/m. 基于上述大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤, 搭建了一个高功率全光纤主振荡功率放大结构的掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器, 窄线宽掺  $\text{Tm}^{3+}$  种子源经过一级放大后, 最高输出功率达到 530 W, 对应的斜率效率为 50%, 输出激光的中心波长为 1980.89 nm. 实验中没有观察到明显的放大自发辐射和非线性效应, 输出功率仅受限于抽运功率. 该结果为目前国内  $2\ \mu\text{m}$  波段全光纤结构激光器实现的最高输出功率, 验证了国产掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤在高功率系统中的可靠性.

**关键词:** 光纤制备, 光纤激光器, 高功率掺铥光纤放大器

**PACS:** 42.55.Wd, 42.81.-i, 42.81.Bm

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200466

## 1 引言

与传统的固体激光器相比, 光纤激光器有着许多优势, 比如更为紧凑轻便、良好的光束质量、较大的表面积/体积比、可以实现有效的热管理和进一步的功率放大. 近年来, 高功率光纤激光器在激光光源的生产模式和材料加工等领域掀起了新的变革<sup>[1-3]</sup>, 其中掺铽光纤激光器 (ytterbium-doped fiber laser, YDFL) 最大输出功率已超过 10 kW<sup>[4]</sup>. 具有 1700—2100 nm 超宽可调谐范围掺铥光纤激光器 (thulium-doped fiber laser, TDFL) 也引起了人们极大的兴趣, TDFL 应用十分广泛, 比如激光雷达、自由空间通信、生物医疗以及作为掺铽光纤激光器或光学参量振荡器的优秀抽运源等<sup>[5-8]</sup>. 基于成熟的制作工艺和成本控制, 绝大多数高功率 TDFL 主要采用工作在 793 nm 处的半导体激光

器 (laser diode, LD) 进行抽运, 更重要的是 793 nm 抽运方式对应的  ${}^3\text{H}_4$ ,  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ ,  ${}^3\text{F}_4$  能级跃迁过程中的交叉弛豫机制能够使 TDFL 克服 41% 的斯托克斯极限. 在应用需求的推动下, TDFL 在国内外都经历了前所未有的发展, 2010 年, Q-peak 公司的 Ehrenreich 等<sup>[9]</sup> 报道了一个主振荡功率放大器 (main-oscillator power-amplifier, MOPA), 该系统采用 793 nm 抽运方式, 采用 12 m 纤芯/包层尺寸为  $20/400\ \mu\text{m}$  的大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤作为增益介质, 种子注入功率为 50 W, 经过两级放大后被提升到 1 kW, 斜率效率为 53.2%, 工作波长为 2050 nm, 这是目前国际上输出功率最高的掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤放大器. 2016 年, 德国 Fraunhofer 应用光学和精密工程研究所的 Walbaum 等<sup>[10]</sup> 设计了一个基于商用三包层掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的全光纤振荡器, TDF 的纤芯/第一内包层/第二内包层尺寸为  $25/40/400\ \mu\text{m}$ , 输出功率为 567 W, 斜率效率为 49.4%,

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61735007) 和湖北省技术创新专项 (批准号: 2019AAA056) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [lji@mail.hust.edu.cn](mailto:lji@mail.hust.edu.cn)

其工作在多模运转模式下, 峰值波长处的 3 dB 带宽为 180 pm, 这是目前报道的输出功率最高的掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤振荡器. 2015 年, 本课题组<sup>[11]</sup> 采用改进的化学气相沉积 (modified chemical vapor deposition, MCVD) 工艺制备了一根双包层掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤, 其纤芯/包层尺寸为 25/250  $\mu\text{m}$ , 数值孔径 (numerical aperture, NA) 为 0.11,  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  的掺杂浓度约为 44000 ppm (1 ppm = 1 mg/L), 在 793 nm 处的包层吸收系数为 3 dB/m. 利用 4 m 该自制掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤, 搭建了一个工作波长为 1915 nm 的全光纤结构的振荡器, 当抽运功率为 252 W 时, 得到最大输出激光功率为 121 W, 斜率效率为 51%. 2017 年, 复旦大学的 Yao 等<sup>[12]</sup> 报道了全光纤窄线宽掺铥 MOPA 系统, 采用纤芯/包层尺寸为 25/400  $\mu\text{m}$  的 TDF 作为放大级增益介质, 将 3.5 W 的种子功率提高到 400 W, 斜率效率为 53%, 中心波长为 1941 nm, 输出光谱的 3 dB 带宽为 67 pm. 2018 年, 该课题组利用一个  $1 \times 3$  合束器和一个  $3 \times 1$  合束器, 将 3 个最高输出功率为 323, 305 和 229 W 的掺铥 MOPA 激光系统进行集成 (非相干) 合束输出, 在总抽运功率为 1505 W 时, 获得了 790 W 的激光输出, 合束系统的斜率效率为 52.2%<sup>[13]</sup>.

另一方面, 目前掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤预制棒的制备方法主要有 MCVD 法<sup>[14]</sup>、管-棒法<sup>[15]</sup> 和粉末法<sup>[16]</sup>. 尽管管-棒法和粉末法也能制备出具有高掺杂浓度和折射率分布均匀的掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤, 但目前基于这些方法制备的掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤搭建的光纤激光器系统最终获得的 2  $\mu\text{m}$  激光功率仍处于瓦级水平<sup>[15-17]</sup>. 这主要是因为通过这些方法制备出的掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的光纤尺寸或 NA 不能很好地与无源器件的尾纤匹配, 不利于全光纤化和功率放大. 因此, 目前实现数百瓦级甚至更高功率全光纤 TDFL 的最佳途径还是采用 MCVD 方法制备的大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤. 比较国外的研究, 国内高功率 TDFL 的发展相对较慢, 且在掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤, 尤其是用于高功率系统的大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的选用上长期依赖国外公司. 国产掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的制备主要有以下几个瓶颈: 1)  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂浓度不高, 交叉弛豫效应得不到增强, 致使光纤效率较低<sup>[18]</sup>; 2) 掺杂均匀性较差, 主要体现为光纤折射率剖面在横向和纵向上存在较大波动, 使得掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的 NA 存在较大偏差, 不能很好地与无源器件匹配, 实现全光纤化结构<sup>[19]</sup>;

3) 可重复性较差, 不同批次的掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤可能表现出较大的激光性能差异, 这主要是由环境、仪器不稳定性及参数调控等因素导致的. 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤作为 TDFL 搭建过程中不可缺少的核心材料, 实现国产化, 生产出能够代替国外产品的性能优良的大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤是十分有必要的.

本文采用 MCVD 方法结合溶液掺杂技术, 并通过对制备过程中的关键参数进行优化, 制备了一根高掺杂、高吸收系数的双包层大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤. 该光纤的纤芯/包层尺寸约为 25/400  $\mu\text{m}$ , 对应的 NA 为 0.1, 纤芯中  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的掺杂浓度分别为 2.6 wt% 和 1.01 wt%, 在 793 nm 处测得的包层吸收为 3 dB/m. 基于该大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤, 搭建了一个一级放大的 MOPA 系统, 实现了 530 W 的激光输出, 斜率效率为 50%, 工作波长为 1980.89 nm, 在输出功率为 100 W 时测得的  $M^2$  小于 1.3. 在实验过程中没有观察到功率下降的现象, 从光谱上没有观察到放大自发辐射和寄生振荡现象. 据我们所知, 这是目前国内报道的 TDFL 实现的最高激光输出, 同时实现了国产大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤在制备技术上的突破.

## 2 实验装置

实验中使用的掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤预制棒采用 MCVD 工艺结合溶液掺杂法制备而成, 该工艺的基本流程可以总结为以下 5 个过程: 1) 阻挡层和疏松层沉积; 2) 溶液浸泡和稀土离子掺杂; 3) 热干燥; 4) 通气脱水; 5) 烧结成棒. 关于光纤预制棒的详细制备过程, 许多文献都有介绍和描述<sup>[20,21]</sup>, 在此不作赘述. 值得指出的是, 由于会成为光纤的纤芯部分, 疏松层的沉积温度非常关键, 沉积的孔隙大小及其均匀度将直接影响  $\text{Tm}^{3+}$  的掺杂浓度和均匀性, 也间接决定着掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的激光性能, 温度过高或过低都会导致疏松层质量下降. 通过控制沉积趟次, 可制备出不同掺杂浓度的掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤. 为了实现高的  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂浓度, 增强交叉弛豫效应, 并避免由  $\text{Tm}^{3+}$  团簇引起的光子猝灭, 在进行溶液掺杂时, 有必要加入一定量的  $\text{Al}^{3+}$  作为分散剂, 以提高  $\text{Tm}^{3+}$  离子的溶解度和分布均匀性<sup>[22,23]</sup>. 因此, 合适的  $\text{TmCl}_3$  和  $\text{AlCl}_3$  溶液配比及浸泡时间也能在保证掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤 NA 的前提下实现高掺杂浓度. 另外, 进料速度、预烧结及烧结温度等参数也会对掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的性能造成较大影响. 本文报道

的  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的相关制备参数如表 1 所列.

表 1 25/400 双包层掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤的制备参数 (1 sccm = 1 mL/min)

Table 1. Fabrication parameters of the 25/400 double clad  $\text{Tm}^{3+}$ -doped silica fiber.

| 光纤制备参数                             | 数值   |
|------------------------------------|------|
| 疏松层沉积温度/ $^{\circ}\text{C}$        | 1730 |
| $\text{SiCl}_4$ 进料速度/sccm          | 100  |
| $\text{AlCl}_3/\text{TmCl}_3$ 溶液配比 | 1.8  |
| 溶液浸泡时间/h                           | 2    |
| 预烧结温度/ $^{\circ}\text{C}$          | 1700 |
| 烧结温度/ $^{\circ}\text{C}$           | 2000 |

预制棒制备完成后, 为了提高抽运光吸收率, 将其打磨加工至横截面呈八边形, 在对其表面进行充分清洁后, 置于拉丝塔上进行拉丝和涂覆, 拉丝温度设置在  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上. 拉制出的双包层掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤横截面如图 1 内嵌小图所示, 为八边形, 实际测得的纤芯直径为  $24.75\text{ }\mu\text{m}$ , 内包层边-边距离为  $402.66\text{ }\mu\text{m}$ . 采用光纤分析仪 (IFA-100) 测得的 25/400 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的折射率剖面图如图 1 所示, 折射率剖面中心的凹陷主要是由高温下掺杂物挥发造成的, 测得纤芯折射率波动小于  $5.4 \times 10^{-4}$ , 显示出比较优良的均匀性 [16,24]. 通过对缩棒时的流量、温度以及管内压力等参数进行综合优化, 可以进一步改善这种折射率剖面中心凹陷现象.

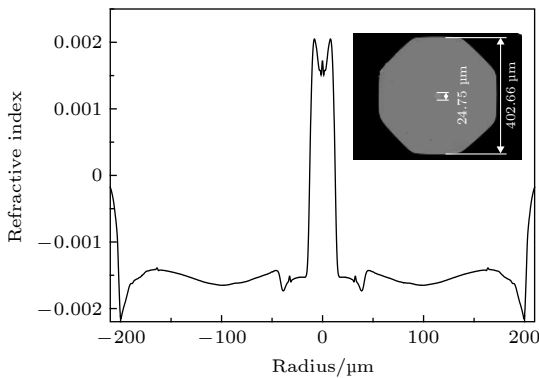


图 1 25/400 掺  $\text{Tm}^{3+}$  双包层石英光纤的折射率剖面图 (内嵌小图: 横截面示意图)

Fig. 1. Refractive index profile of the 25/400 double clad  $\text{Tm}^{3+}$ -doped silica fiber. Inset: image of the TDF cross section.

采用电子探针微区分析仪 (EPMA-8050G, SHIMADZU Co., Ltd.) 对掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤进行线扫描分析得出掺杂元素的分布特性, 如图 2 所示,

扫描精度为  $0.2\text{ }\mu\text{m}$ . 从图 2 可以看出,  $\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Al}^{3+}$  被限制在直径为  $25\text{ }\mu\text{m}$  的纤芯范围内. 对光纤样品的定量分析测得纤芯中  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的浓度分别为  $2.6\text{ wt}\%$  和  $1.01\text{ wt}\%$ . 另外, 采用截断法测得该掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤的包层吸收在  $793\text{ nm}$  处为  $3\text{ dB/m}$ , 用光纤损耗分析仪 (P104, Photon Kinetics Inc.) 测得在  $885\text{ nm}$  处的包层背景损耗约为  $43\text{ dB/km}$ .

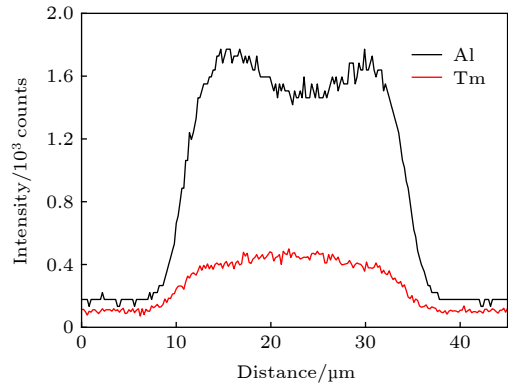


图 2 25/400 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤中 Al 和 Tm 分布情况

Fig. 2. Distribution of Al and Tm in the 25/400 TDF.

图 3(a) 为全光纤结构 MOPA 系统的具体实验装置, 包括振荡器和放大级两部分. 振荡器由一对光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 和  $8\text{ m}$  上述自制大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤组成, 其中高反射光栅 (FBG 1) 和部分反射光栅 (FBG 2) 的中心波长为  $1980\text{ nm}$ , 且在  $1980\text{ nm}$  处的反射率分别为  $99.6\%$  和  $10\%$ ,  $3\text{ dB}$  带宽分别为  $1.92\text{ nm}$  和  $1\text{ nm}$ . 采用 3 个尾纤耦合输出, 工作波长为  $793\text{ nm}$  的多模 LD 作为抽运源, 最高总输出功率为  $200\text{ W}$ . 抽运光经由一个  $(6+1) \times 1$  合束器 (combiner1) 耦合进掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤内包层中, 合束器抽运尾纤规格与 LD 的尾纤相同, 纤芯/包层尺寸为  $200/220\text{ }\mu\text{m}$ , NA 为  $0.22$ . 为了得到光束质量良好的种子源, 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤以  $6\text{ cm}$  半径盘绕在一块刻槽铝制水冷板上, 水冷温度控制在  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 并且对振荡器和放大级之间的无源光纤的涂覆层进行了阶梯式剥除处理, 将剥除区 (约  $10\text{ cm}$ ) 完全浸没在高折射率胶中滤除剩余抽运光和包层光. 放大级采用双向抽运方案, 每个方向熔接 5 个与振荡器中规格一致的 LD, 每个 LD 可以提供约  $110\text{ W}$  的抽运功率, 并通过正反向两个  $(6+1) \times 1$  合束器耦合到有源光纤内包层中, 正向合束器 (combiner 2)



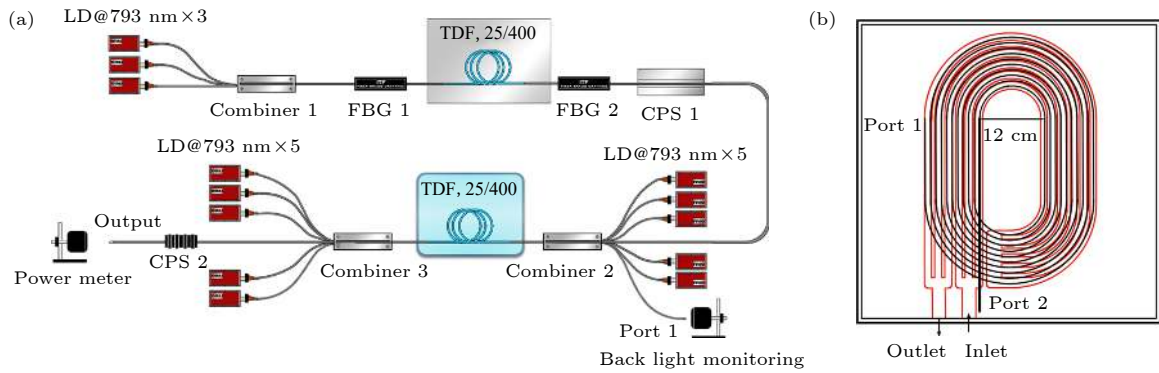


图 3 (a) 掺  $Tm^{3+}$  全光纤 MOPA 系统结构图; (b) 放大级中水冷板设计示意图

Fig. 3. (a) Experimental setup of the all-fiber  $Tm$ -doped MOPA system; (b) the design diagram of water-cooling plate in amplification stage.

的耦合效率为 93%，其中一个空悬抽运臂 (port 1) 用来监测回光功率，反向合束器 (combiner 3) 的耦合效率为 94%。为保证抽运光被充分吸收，提供足够增益，放大级中同样采用 8 m 上述 25/400 双包层掺  $Tm^{3+}$  光纤作为增益介质，两个合束器的合束端尾纤的尺寸及 NA 皆与有源光纤匹配。在系统输出端前熔接了一个包层光剥除器 (CPS 2) 以滤除包层光，改善输出激光的光束质量，其尾纤的纤芯/包层尺寸为 25/400  $\mu m$ ，NA 为 0.1。在输出端熔接了一段长度约为 3 mm、切口为  $8^\circ$  角的无芯光纤，以防止产生菲涅耳反射。对于放大光纤的散热，设计了一块带有下沉的铝制刻槽水冷板，结构如图 3(b) 所示，放置掺  $Tm^{3+}$  光纤的水冷槽为黑色线条所示，设计为螺旋盘绕的跑道，最小盘绕半径为 6 cm，放大级中的有源光纤由端口 2 盘入，以减小光纤中的高阶模得到的增益，光纤端口 2 处设计了一段深于其他弯道的直槽，避免光纤交叠产生热积累，合束器与掺  $Tm^{3+}$  光纤的熔点置于最内圈跑道直道上。水冷管道如红色线条所示，呈回环状铺设在光纤水冷槽正下方并覆盖整个光纤盘绕区域，能够有效地减少热积累，入水口和出水口的位置如图中标注所示。整块水冷板挖有约 1 cm 深的下沉，掺  $Tm^{3+}$  光纤完全浸没在水中，水冷温度设置为 10  $^\circ C$ 。

### 3 实验结果

经过 CPS 1 后测得的种子源输出激光功率随抽运光功率的变化如图 4 所示，振荡器的阈值功率为 19 W，当抽运光功率达到阈值功率后，随着抽运光功率的增加，种子源输出激光功率呈线性增

加，当抽运功率为 202 W 时，最大输出功率为 91 W，对应的斜率效率为 49%，光-光效率为 45%。种子输出功率提升过程中对应的后向回光通过合束器 1 的信号臂检测，且一并记录在图 4 中，种子源输出功率达到最大时，对应的回光为 1.6 W。光谱测量和记录采用日本横河公司的光谱分析仪 AQ6375B，扫描精度为 0.05 nm。在高功率系统中，主要测量功率计靶面散射光光谱，图 5 是种子源输出功率为 91 W 时对应的光谱，中心波长为 1980.89 nm，输出激光信噪比为 28 dB，3 dB 带宽测得为 75 pm，这种窄线宽的激光输出可以归因于振荡腔内的模式竞争 [12,25]。

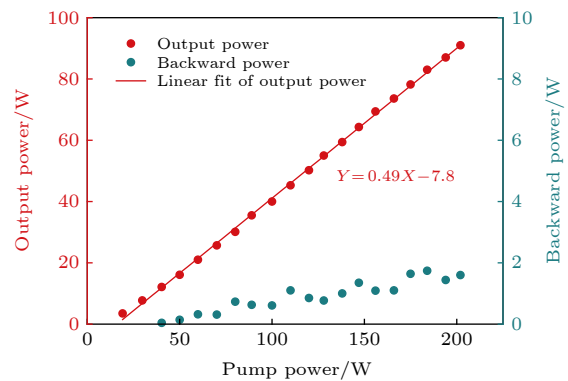


图 4 种子源输出功率及后向回光随抽运功率的变化  
Fig. 4. Output power of oscillator and backward power versus the incident pump power.

种子源注入放大级的初始功率设置为 80 W，放大级抽运源未启动时，种子激光经过整个放大级后衰减至 57 W，对其进行放大，图 6 所示是掺  $Tm^{3+}$  光纤放大器输出功率及 port 1 处测得的回光功率随抽运功率的变化。输出激光功率呈线性增加，整个过程没有观察到功率下降现象，抽运功率

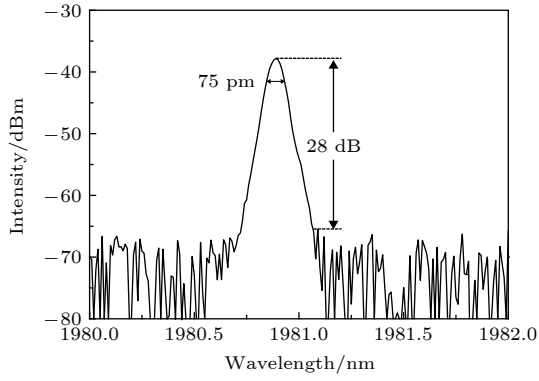


图 5 种子源输出功率为 91 W 时对应的光谱  
Fig. 5. Spectrum of the oscillator at output power of 91 W.

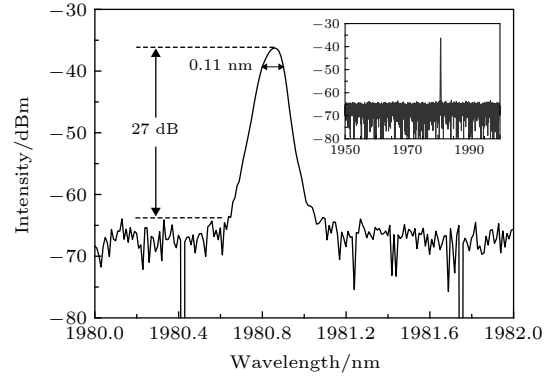


图 7 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤放大器输出功率为 500 W 时对应的光谱  
Fig. 7. Spectrum of the  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber amplifier at output power of 500 W.

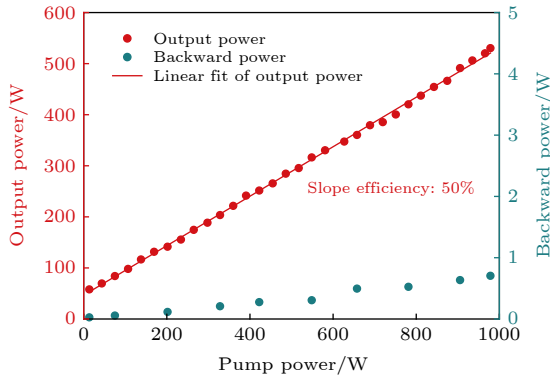


图 6 放大级输出功率及后向回光随抽运功率的变化  
Fig. 6. Output power and backward power of amplifier stage versus pump power.

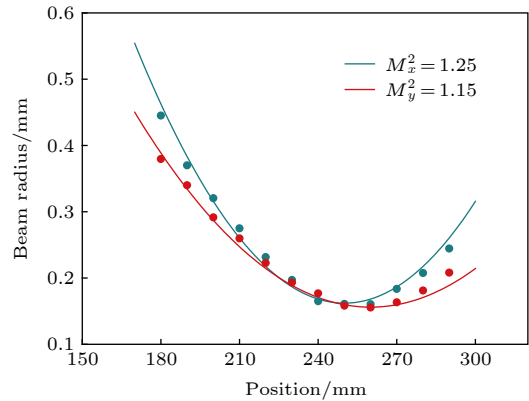


图 8 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤放大器输出功率为 100 W 时测得的  $M^2$   
Fig. 8. Beam quality factor of the  $\text{Tm}$ -doped fiber amplifier at 100 W.

为 979 W 时, 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤放大器输出功率达到 530 W, 对应的斜率效率为 50%, port 1 处监测到的最大回光功率小于 1 W. 在输出功率为 500 W 时测得的光谱如图 7 所示, 中心波长与种子源一致, 输出激光信噪比为 27 dB. 输出激光的 3 dB 带宽有些许展宽, 为 0.11 nm, 这种展宽一方面被认为与系统中的热积累有关, 温度升高导致光栅透射光谱展宽变形; 另一方面, 光纤的非线性效应 (如四波混频、自相位调制) 随着功率的不断提升而增强, 致使激光线宽展宽<sup>[26,27]</sup>. 扫描了 1950—2000 nm 范围内的激光光谱, 没有观察到明显的自发辐射和受激布里渊散射效应, 如图 7 内嵌图所示, 说明输出激光功率仅受限于抽运功率. 由于缺少衰减片, 测量了掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤放大器输出功率为 100 W 时的光束质量因子 ( $M^2$ ), 如图 8 所示, 测得的  $M^2$  小于 1.3, 说明该掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤 MOPA 系统具有较高的亮度. 由于放大级增益光纤采用螺旋跑道式盘绕方法, 且为了更好地进行热管理, 相邻跑道之间的间隔设置为 1 cm, 导致盘绕半径逐渐增大, 使得在

外圈部分, 对高阶模的抑制作用逐渐减弱. 在充分散热的前提下, 通过进一步优化光纤盘绕半径, 能够进一步改善系统的输出光束质量.

本实验采用热成像仪 (MAG32 384 × 288, Magnity Electronics Co., Ltd.) 观察记录掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的温度, 在输出功率为 530 W 时, 其最高温度超过 60 °C, 若想实现激光功率的进一步提升, 对掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤的热管理至关重要. 采用多级放大是缓解有源光纤及无源器件高温压力的有效途径, 另外, 近年来研究人员提出的新型高效散热光纤, 如金属包层光纤<sup>[28]</sup>、石墨烯光纤<sup>[29]</sup>等也为有源光纤的热管理提供了新思路. 但是这无疑大大增加了光纤制备的成本, 因此, 提升掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器输出功率的核心解决方法还是要制备出高浓度、高效率的掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤, 减小量子亏损, 提高抽运光利用率. 2019 年南安普顿大学的 Ramírez-Martínez 等<sup>[30]</sup> 报道的采用 MCVD 方法结合气相掺杂技术制备出的  $\text{Tm}^{3+}$  光纤, 其激光效率可达到 72.4%.

对该项技术的探索和分析正在进行当中,有望制备出更高效的国产大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤,推进国内高功率掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器研究领域的发展。

## 4 结 论

报道了一个全光纤结构高功率掺铥 MOPA 系统,其中掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤通过 MCVD 工艺结合溶液掺杂法制备而成,纤芯/包层尺寸约为 25/400  $\mu\text{m}$ , NA 为 0.1,测得纤芯掺杂的  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  浓度分别为 2.6 wt% 和 1.01 wt%,在 793 nm 处的包层吸收为 3 dB/m. 采用 8 m 自制大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤和一对 FBG,搭建了一个直腔结构窄线宽振荡器,振荡器的中心波长为 1980.89 nm, 3 dB 光谱带宽为 75 pm. 放大级采用双端抽运结构,增益介质同样为 8 m 自制大模场掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤,通过一级放大将 57 W 的种子激光提升至 530 W,对应的放大级斜率效率为 50%. 输出激光的 3 dB 光谱带宽为展宽至 0.11 nm. 实验过程中没有观察到明显的放大自发辐射和非线性效应,输出功率仅受限于抽运功率. 系统在输出功率为 100 W 时测得的  $M^2$  小于 1.3. 据我们所知,该结果是目前国内报道的 TDFL 达到的最高输出功率。

## 参考文献

- [1] Jauregui C, Jens L, Andreas T 2013 *Nat. Photonics* **7** 861
- [2] Shima K, Ikoma S, Uchiyama K, Takubo Y, Kashiwagi M, Tanaka D 2018 *Proc. SPIE 10512, Fiber Lasers XV: Technology and Systems* San Francisco, United States, February 26, 2018 p105120C
- [3] Kliner D A V, Victor B, Rivera C, Fanning G, Balsley D, Farrow R L, Kennedy K, Hampton S, Hawke R, Soukup E, Reynolds M, Hodges A, Emery J, Brown A, Almonte K, Nelson M, Foley B, Dawson D, Hemenway D M, Urbanek W, DeVito M, Bao L, Koponen J, Gross K 2018 *Proc. SPIE 10513, Components and Packaging for Laser Systems IV* San Francisco, United States, February 26, 2018 p105130S
- [4] Lin H H, Xu L X, Li C Y, Shu Q, Chu Q H, Xie L H, Guo C, Zhao P F, Li Z B, Wang J J, Jing F, Tang X 2019 *Results in Phys.* **14** 102479
- [5] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, Shah L, Kadwani P, Richardson M 2012 *Opt. Laser Technol.* **44** 2095
- [6] Michalska M, Brojek W, Rybak Z, Sznalewski P, Mamajek M, Swiderski J 2016 *Laser Phys. Lett.* **13** 115101
- [7] Hemming A, Simakov N, Oermann M, Carter A, Haub J 2016 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* San Jose, United States, June 5–10, 2016 p1
- [8] Bremer K, Pal A, Yao S, Lewis E, Sen R, Sun T, Grattan K T V 2013 *Appl. Opt.* **52** 3957
- [9] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, Tankala K, Rines G, Moulton P 2010 *Photonics West 2010: LASE* Beijing, China, January 23–28, 2010 p758016
- [10] Walbaum T, Heinzig M, Schreiber T, Eberhardt R, Tünnermann A 2016 *Opt. Lett.* **41** 2632
- [11] Xing Y B, Liao L, Bu F, Wang Y B, Peng J G, Dang N L, Li J Y 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 034204
- [12] Yao W, Shao Z, Shen C, Zhao Y, Chen H, Shen D 2017 *Laser Applications Conference* Nagoya, Aichi Japan, October 1–5 2017 pJTU2A-33
- [13] Yao W, Shen C, Shao Z, Wang J, Wang F, Zhao Y, Shen D 2018 *Appl. Opt.* **57** 5574
- [14] Xing Y B, Ye B Y, Jiang Z W, Dai N L, Li J Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014209 (in Chinese) [邢颖滨, 叶宝圆, 蒋作文, 戴能利, 李进延 2014 物理学报 **63** 014209]
- [15] Lee Y W, Ling H Y, Lin Y H, Jiang S 2015 *Opt. Mater. Express* **5** 549
- [16] Darwich D, Dauliat R, Jamier R, Benoit A, Auguste J L, Grimm S, Kobelke J, Schwuchow A, Schuster K, Roy P 2016 *Opt. Lett.* **41** 384
- [17] Lou F G, Kuan P W, Zhang L, Wang S, Zhou Q, Wang M, Feng S, Li K F, Yu C L, Hu L L 2014 *Opt. Mater. Express* **4** 1267
- [18] Meng J, Zhang W, Zhao K Q, Yu T, Wu W D, Yu C L, Li X, Li X J, Ye X S, Cao Q 2019 *Chin. Opt.* **12** 1109 (in Chinese) [孟佳, 张伟, 赵开祺, 余婷, 吴闻迪, 于春雷, 李璇, 李兴冀, 叶锡生, 曹清 2019 中国光学 **12** 1109]
- [19] Yi Y Q, Wang D B, Liang X H, Duan Y F, Ning D 2010 *Laser & Infrared* **40** 264 (in Chinese) [衣永青, 王东波, 梁小红, 段云峰, 宁鼎 2010 激光与红外 **40** 264]
- [20] Xing Y B 2016 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [邢颖滨 2016 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [21] Muhd-Yassin S Z, Omar N Y M, Abdul-Rashid H A 2018 *Optimized Fabrication of Thulium Doped Silica Optical Fiber Using MCVD* (Singapore: Springer) pp1–35
- [22] Jackson S D, Mossman S 2003 *Appl. Opt.* **42** 2702
- [23] Jackson S D 2004 *Opt. Commun.* **230** 197
- [24] Wang Y Y, Gao C, Tang X, Zhan H, Peng K, Ni L, Liu S, Li Y W, Guo C, Wang X L, Zhang L H, Y J, Jiang L, Lin H H, Wang J J, Jing F, Lin A X 2018 *J. Light. Technol.* **36** 3396
- [25] Jauncey M, Reekie L, Mears R J, Rowe C J 1987 *Opt. Lett.* **12** 164
- [26] Lapointe M, Piché M 2009 *Proc. SPIE 7386, Photonics North Quebec, Canada, August 4, 2009* p73860S
- [27] Yang C S, Yu S H, Li C, Mo S P, Feng Z M, Jiang Z H, Yang Z M 2013 *Scientia Sinica* **43** 1407 (in Chinese) [杨昌盛, 徐善辉, 李灿, 莫树培, 冯洲明, 姜中宏, 杨中民 2013 中国科学 **43** 1407]
- [28] Daniel J M O, Simakov N, Hemming A, Clarkson W A, Haub J 2016 *Opt. Express* **24** 18592
- [29] Xin G, Yao T, Sun H, Scott S M, Shao D, Wang G, Lian J 2015 *Science* **349** 1083
- [30] Ramírez-Martínez N J, Núñez-Velázquez M, Umnikov A A, Sahu J K 2019 *Opt. Express* **27** 196

# 530 W all-fiber continuous-wave Tm-doped fiber laser<sup>\*</sup>

Liu Yin-Zi   Xing Ying-Bing   Liao Lei   Wang Yi-Bo   Peng Jing-Gang  
Li Hai-Qing   Dai Neng-Li   Li Jin-Yan<sup>†</sup>

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

( Received 30 March 2020; revised manuscript received 6 May 2020 )

## Abstract

In the past decades, thulium-doped fiber lasers (TDFLs) operating in an eye-safe range have attracted considerable attention, for they have extensive applications such as LIDAR, free space communication, medical diagnostics and pumping source for holmium-doped fiber laser or optical parameter oscillator. In this paper, we report a high power all-fiberized TDFL based on main-oscillator power-amplifier (MOPA) configuration. The preform is fabricated by the modified chemical vapor deposition method combined with solution doping technique and drawn into a core/clad size of 25/400  $\mu\text{m}$ . The numerical aperture of the TDF is 0.1. The concentration of  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  are 2.6 wt% and 1.01 wt%, respectively, measured by an electron probe micro-analyzer. The cladding absorption is 3 dB/m at 793 nm measured by cut-back method. The oscillator consists of 8 m 25/400 TDF mentioned above and a pair of fiber Bragg gratings. The oscillator yields maximum power of 91 W with pump power of 202 W and a 3 dB spectral bandwidth as narrow as 75 pm. In the amplifier stage, the bi-directional pumping scheme is employed. The narrow linewidth seed with output power of 57 W is scaled to 530 W through one-stage amplification, corresponding to a slope efficiency of 50%. The central wavelength of the Tm-doped MOPA is 1980.89 nm and the linewidth is broadened to 0.11 nm at 530 W. The measured  $M^2$  factor at 100 W is less than 1.3. Neither obvious amplified spontaneous emission nor non-linear effect is observed, and the output power is only limited by pump power. To the best of our knowledge, this is the highest output power of TDF at present.

**Keywords:** fiber fabrication, fiber laser, high power Tm-doped amplifier

**PACS:** 42.55.Wd, 42.81.-i, 42.81.Bm

**DOI:** [10.7498/aps.69.20200466](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200466)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61735007) and the Technological Innovation Special Fund of Hubei Province, China (Grant No. 2019AAA056).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lji@mail.hust.edu.cn](mailto:lji@mail.hust.edu.cn)