

57 W 2.05  $\mu\text{m}$  单横模掺铥光纤激光 MOPA罗学文<sup>1,2</sup>, 张露<sup>1,2</sup>, 付士杰<sup>1,2\*</sup>, 盛泉<sup>1,2</sup>, 张钧翔<sup>1,2</sup>, 史伟<sup>1,2\*\*</sup>, 姚建铨<sup>1,2</sup><sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;<sup>2</sup>天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 基于商用单模掺铥石英光纤设计了高功率 2.05  $\mu\text{m}$  波段全光纤主振荡功率放大器(MOPA)。以自制环形腔掺铥光纤激光器为种子,利用级联滤波型波分复用器优化长波长种子的光信噪比,基于 MOPA 结构实现了高效的高功率输出。基于速率方程模型,理论分析了主放大级的注入信号光功率和增益光纤长度的优化关系;实验中在 102.6 W 的 793 nm 泵浦功率下获得了输出功率为 57 W、光谱线宽为 0.08 nm、光信噪比为 58.8 dB 的单横模激光输出,主放大级斜效率为 52.6%。

**关键词** 激光器; 掺铥光纤激光器; 2  $\mu\text{m}$  激光; 单模光纤激光器; 速率方程

**中图分类号** TN248 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL231260

## 1 引言

2  $\mu\text{m}$  波段激光处于人眼的安全波段,在医疗、材料加工以及激光通信等领域中有重要应用<sup>[1-3]</sup>,并且可作为光学参量振荡或光纤激光等技术产生 3~5  $\mu\text{m}$  中红外激光的泵浦源<sup>[4-5]</sup>,是激光技术领域的研究热点。其中,2.05  $\mu\text{m}$  对应  $\text{CO}_2$  吸收峰和大气透过窗口重叠,高功率、高光束质量的 2.05  $\mu\text{m}$  激光光源适用于自由空间光通信和大气多普勒激光雷达等领域<sup>[6-8]</sup>。掺铥石英增益光纤在 1.65~2.10  $\mu\text{m}$  的宽波段范围内均能提供有效的激光增益<sup>[9]</sup>。由于铥离子特殊的能级结构,当使用 793 nm 泵浦光对高掺杂掺铥光纤进行泵浦时,会发生交叉弛豫现象,理论上可实现高达 200% 的量子效率。基于掺铥增益光纤的光纤激光器已成为获得 2  $\mu\text{m}$  波段激光的主要技术途径之一,利用主振荡功率放大器(MOPA)结构,结合大模场增益光纤,已实现数百瓦以至千瓦级的高功率输出。2010 年, Q-peak 公司采用纤芯和包层直径分别为 25  $\mu\text{m}$  和 400  $\mu\text{m}$  的掺铥增益光纤,在 2045 nm 处实现了超过 1 kW 的输出功率,斜效率为 53.2%<sup>[10]</sup>,这是目前基于掺铥光纤在 2.05  $\mu\text{m}$  处实现的最高输出功率。2023 年, Ren 等<sup>[11]</sup>报道了波长可调谐的 kW 级高功率掺铥光纤激光 MOPA。与大模场光纤相比,单模光纤的制备工艺更为成熟、成本经济,激光光束质量不受外界环境影响、更为稳定<sup>[12]</sup>。因此,基于纤芯直径较小的单模光纤实现高功率激光输出的研究仍十分重要。Romano

等<sup>[13]</sup>于 2017 年利用纤芯直径为 10  $\mu\text{m}$  的单模掺铥光纤实现了功率为 13 W 的 2.05  $\mu\text{m}$  激光输出,斜效率为 54.6%。

基于掺铥光纤实现高功率 2.05  $\mu\text{m}$  激光输出主要受限于以下两方面的因素。首先,2.05  $\mu\text{m}$  偏离了增益光纤中铥离子的发射峰,高泵浦功率下的激光器容易在 1.9  $\mu\text{m}$  发射峰附近产生严重的放大自发辐射(ASE)甚至激射,影响激光器的光信噪比以及功率和效率。例如,文献<sup>[13]</sup>采用环形器和高反射布拉格光栅用于滤除预放大级的 ASE,主放大器输出光的信噪比也仅为 40 dB。此外,2.05  $\mu\text{m}$  相对较小的发射截面以及石英光纤在长波长方向快速上升的损耗<sup>[14]</sup>也成为激光高功率高效输出的阻碍,因此,为了获得高功率 2.05  $\mu\text{m}$  光纤激光,需要对系统参数进行细致的优化以平衡增益和损耗。

针对上述问题,本文建立了掺铥光纤激光放大器的速率方程模型,分析了注入信号光功率、增益光纤长度等因素对掺铥光纤激光 MOPA 输出特性的影响。实验上,设计并搭建了基于单模掺铥石英增益光纤的高功率 2.05  $\mu\text{m}$  掺铥光纤激光 MOPA,在 102.6 W 的 793 nm 泵浦功率下获得功率为 57 W 的 2048.7 nm 激光输出,光信噪比为 58.8 dB,主放大级斜效率为 52.6%。实验结果表明,单模掺铥光纤具有获得高功率、高效率、高光信噪比 2.05  $\mu\text{m}$  激光的能力。

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2023-11-08; 录用日期: 2023-12-11; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(62105240, 62275190, 62075159, 61975146)、山东省重点研发项目(2020CXGC010104, 2021CXGC010202)、天津大学自主创新基金(2023XPD-0020)、光电信息技术教育重点实验室(天津大学)开放基金

通信作者: \*shijie\_fu@tju.edu.cn; \*\*shiwei@tju.edu.cn

## 2 实验装置与理论分析

### 2.1 实验装置

2.05  $\mu\text{m}$  掺铥光纤激光 MOPA 实验光路示意图如图 1 所示, 包含作为种子源的一级振荡器和两级放大器。其中, 种子源为自制的环形腔掺铥光纤激光器, 中心波长为 2048.7 nm, 光谱线宽为 0.06 nm。其后使用一个滤波型波分复用器 (FWDM) 滤除 1800~2000 nm 发射峰附近波段的 ASE, 以提升光信噪比并避免其后续放大过程中发生激射。在 FWDM 后连接一隔离器, 阻断系统中的反向回光。两放大级均采用正向泵浦结构以及相同型号的掺铥增益光纤, 泵浦源均为

793 nm 半导体激光器, 泵浦光通过  $(2+1) \times 1$  泵浦/信号合束器注入掺铥增益光纤, 两个合束器的耦合效率均为 95%, 增益光纤的纤芯和内包层直径分别为 10  $\mu\text{m}$  和 130  $\mu\text{m}$ 、数值孔径分别为 0.15 和 0.46。将主放大级的增益光纤盘绕于 V 形刻槽水冷散热板上, 刻槽处涂覆导热硅脂以确保光纤和水冷板充分接触, 实现有效散热。在主放大级和预放大级之间插入一环形器, 一方面用于阻断主放大级的反向光, 防止其损坏种子和预放大级, 同时实时监测回光功率。在增益光纤末端连接一自制的包层模式剥除器 (CMS), 用于滤除未被吸收的泵浦光。主放大级的输出端采用  $8^\circ$  斜角切割, 以避免端面 Fresnel 反射的回光。

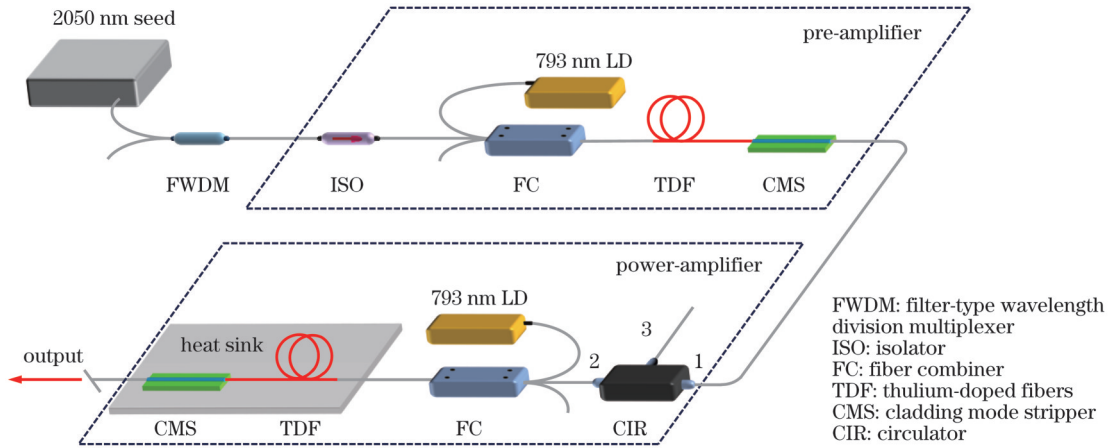


图 1 掺铥光纤激光 MOPA 的实验装置图

Fig. 1 Experiment setup of thulium-doped fiber MOPA

### 2.2 掺铥光纤放大器理论分析

为了优化掺铥光纤 MOPA 的输出功率和效率, 我们利用速率方程分析了主放大级的增益光纤长度和注入信号光功率对激光输出功率的影响。在 793 nm 泵浦下, 掺铥光纤激光器属于三能级系统, 其速率方程组<sup>[15]</sup>为

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = W_{03} N_0 - \frac{1}{\tau_{31}} N_3 - K_{3011} N_3 N_0 + K_{1130} N_1^2, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = W_{01} N_0 - W_{10} N_1 - \frac{1}{\tau_{10}} N_1 + \frac{1}{\tau_{31}} N_3 + 2K_{3011} N_3 N_0 - 2K_{1130} N_1^2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} = -W_{03} N_0 - W_{01} N_0 + W_{10} N_1 + \frac{1}{\tau_{10}} N_1 - K_{3011} N_3 N_0 + K_{1130} N_1^2, \quad (3)$$

$$N = N_0 + N_1 + N_3, \quad (4)$$

式中:  $N$  表示增益光纤中铥离子的掺杂浓度;  $N_0$ 、 $N_1$ 、 $N_3$  分别表示  $^3\text{H}_6$ 、 $^3\text{F}_4$ 、 $^3\text{H}_4$  三个能级所对应的铥离子浓度;  $\tau_{10}$ 、 $\tau_{31}$  分别表示  $^3\text{F}_4$ 、 $^3\text{H}_4$  能级铥离子的寿命;  $K_{3011}$ 、 $K_{1130}$  分别表示  $^3\text{F}_4$ 、 $^3\text{H}_4$  能级之间铥离子的交叉弛豫速率和反交叉弛豫速率;  $W_{03}$ 、 $W_{01}$  分别表示  $^3\text{H}_6$  能级铥离子跃迁至  $^3\text{F}_4$ 、 $^3\text{H}_4$  能级的吸收跃迁几率;  $W_{10}$  表示  $^3\text{F}_4$  能级铥离子的发射跃迁几率<sup>[16-17]</sup>。

$$W_{03} = \frac{\lambda_p \Gamma_p}{hcA_{\text{core}}} \sigma_a(\lambda_p) [P_p^+(z) + P_p^-(z)], \quad (5)$$

$$W_{01} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA_{\text{core}}} \sigma_a(\lambda_s) [P_s(z) + P_{\text{ASE}}^+(z) + P_{\text{ASE}}^-(z)], \quad (6)$$

$$W_{10} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA_{\text{core}}} \sigma_e(\lambda_s) [P_s(z) + P_{\text{ASE}}^+(z) + P_{\text{ASE}}^-(z)], \quad (7)$$

式中:  $\lambda_p$  和  $\lambda_s$  分别表示泵浦光和信号光的波长;  $\Gamma_p$  和  $\Gamma_s$  分别表示泵浦光和信号光模场与增益光纤中的掺杂离子分布区域的重叠因子;  $\sigma_a(\lambda_p)$  表示泵浦光的吸收截面;  $\sigma_a(\lambda_s)$  和  $\sigma_e(\lambda_s)$  分别表示信号光的吸收截面和发射截面;  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  分别表示泵浦光和信号光的光纤损耗系数;  $h$  表示普朗克常数;  $c$  表示真空中光的传播速度;  $A_{\text{core}}$  表示增益光纤的纤芯截面积;  $P_p$ 、 $P_s$ 、 $P_{\text{ASE}}$  分别表示泵浦光、信号光、ASE 的功率<sup>[17]</sup>; 右上角+表示信号光传输方向; 右上角-表示信号光反向传输方向。

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} = -P_p(z) \left\{ \Gamma_p [\sigma_a(\lambda_p) N_0] + \alpha_p \right\}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = \Gamma_s [\sigma_e(\lambda_s) N_1 - \sigma_a(\lambda_s) N_0] P_s(z) - \alpha_s P_s(z), \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_{\text{ASE}}^\pm}{\partial z} = \pm P_{\text{ASE}}^\pm(z) \left\{ \Gamma_s [\sigma_e(\lambda_s) N_1 - \sigma_a(\lambda_s) N_0] - \alpha_s \right\} + 2\sigma_e(\lambda_s) N_1 \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \Delta\lambda, \quad (10)$$

式中:  $z$  为增益光纤的位置;  $\Delta\lambda$  为波长的取样分辨率。

联立式(1)~(10), 采用有限差分法数值求解微分方程组, 参数取值如表 1 所示。主放大级信号光放大的功率随增益光纤长度和注入信号功率的变化如图 2(a) 所示, 其中标注的数值为信号光放大的功率, 即输出功率减注入信号功率。当增益光纤长度一定时, 信号光放大的功率随注入信号功率的增大先增大后减小。在同一注入信号功率下, 信号光放大的功率随着光纤长度的增大呈现先快速增大后缓慢减小的变化规律。优化结果表明, 最佳光纤长度在 3.4 m 左右, 最佳注入信号功率约为 7 W, 但这两个参数的可取值范围较宽, 当光纤长度为 2.8~4.0 m, 注入信号功率大于 3 W 时, 主放大级系统能实现较高的信号光放大功率。

表 1 掺铥光纤激光器的仿真计算参数

Table 1 Simulation parameters of thulium-doped fiber lasers

Parameter	Symbol	Value	Parameter	Symbol	Value
Wavelength of pump laser	$\lambda_p$	793 nm	Wavelength of signal laser	$\lambda_s$	2.05 $\mu\text{m}$
Lifetime of level $^3F_4$	$\tau_{10}$	337.4 $\mu\text{s}$	Lifetime of level $^3H_4$	$\tau_{31}$	14.3 $\mu\text{s}$
Planck constant	$h$	$6.626 \times 10^{-34}$ J·s	Core area	$A_{\text{core}}$	$7.85 \times 10^{-11}$ $\text{m}^2$
Overlap factor of pump mode field	$\Gamma_p$	0.006	Overlap factor of signal mode field	$\Gamma_s$	0.85
Thulium particle concentration	$N$	$3 \times 10^{26}$ $\text{m}^{-3}$	Emission cross section at 2.05 $\mu\text{m}$	$\sigma_e(\lambda_s)$	$2.1 \times 10^{-25}$ $\text{m}^2$
Absorption cross section at 793 nm	$\sigma_a(\lambda_p)$	$8.5 \times 10^{-25}$ $\text{m}^2$	Absorption cross section at 2.05 $\mu\text{m}$	$\sigma_a(\lambda_s)$	0
Loss coefficient at 793 nm	$\alpha_p$	$1.99 \times 10^{-3}$ $\text{m}^{-1}$	Loss coefficient at 2.05 $\mu\text{m}$	$\alpha_s$	$1.2 \times 10^{-2}$ $\text{m}^{-1}$
Cross relaxation rate	$K_{3011}$	$1.8 \times 10^{-22}$ $\text{m}^3/\text{s}$	Inverse cross relaxation rate	$K_{1130}$	$1.5 \times 10^{-23}$ $\text{m}^3/\text{s}$

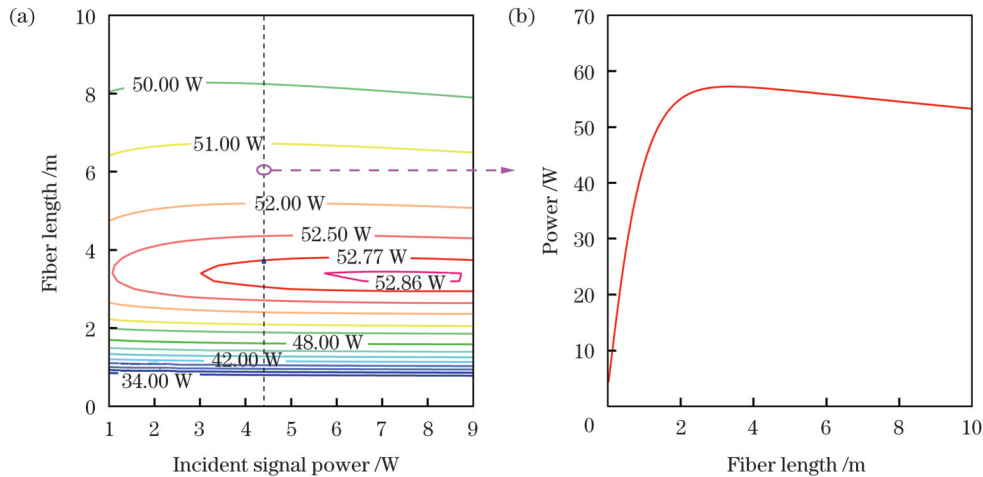


图 2 掺铥光纤激光器的仿真结果。(a) 信号光放大的功率与光纤长度和注入信号功率的关系; (b) 当注入信号光功率为 4.4 W 时, 输出功率与光纤长度的关系

Fig. 2 Simulation results of thulium-doped fiber laser. (a) Amplified signal power versus fiber length and incident signal power; (b) output power versus fiber length at 4.4 W incident signal power

### 3 实验结果与分析

考虑到 2.05  $\mu\text{m}$  波长已经严重偏离铥离子增益峰, 1800~2000 nm 波段在放大过程中会产生严重的 ASE 甚至引发寄生振荡, 与信号光形成增益竞争, 导致信号光输出功率降低, 因此种子激光须具有较高的光信噪比。采用超连续源和光谱仪(分辨率为

实验中, 为获得较高的总输出功率、抑制短波 ASE, 我们尽可能提高了主放大级的注入信号光功率。由于环形器的标称最大可承受功率为 5 W, 实际注入主放大级的信号光功率为 4.4 W; 相应地, 掺铥增益光纤长度选为 3.7 m。需要说明的是, 较高的放大器注入信号光功率有助于提高输出功率、抑制 ASE, 但放大过程中非线性效应的累积严重。图 2(b) 是注入信号功率为 4.4 W 时, 主放大级 2.05  $\mu\text{m}$  激光输出功率随增益光纤长度变化的仿真结果。激光输出功率随光纤长度的增大呈现先快速增大后缓慢减小的变化规律。这是因为初始光纤长度过短, 泵浦吸收不充分, 所以放大效果较差; 当光纤长度超过最佳长度时, 由于光纤对信号光的损耗, 输出功率会随着光纤长度的增加逐渐减小。

0.05 nm, 采样间隔为 0.01 nm) 测得 FWDM 的透射谱, 结果如图 3 所示。FWDM 透射端口的截止波长为 2025 nm, 能够对该波长以下的光谱成分实现约 20 dB 的抑制比, 而长波段的激光则可以低损耗透过, 透过率约为 80%。实验中, 种子激光通过 FWDM 后功率从 1.01 W 下降到 0.83 W。图 3 同样给出了种子激光通过 FWDM 前后的输出光谱对比, 可见

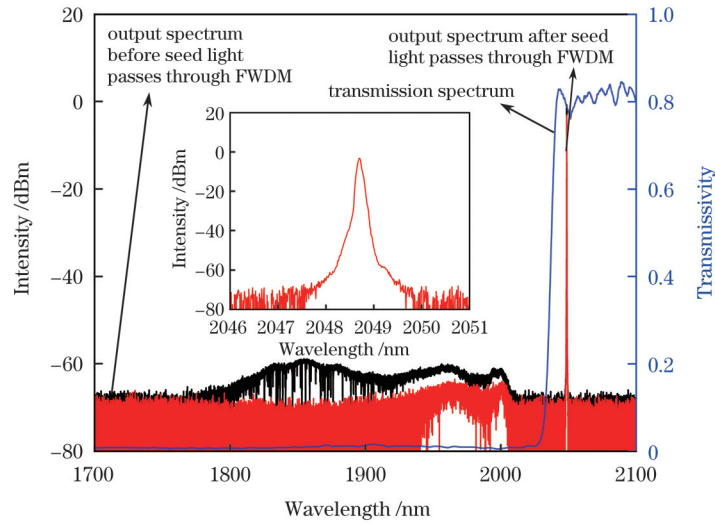


图 3 种子经过 FWDM 前后的输出光谱和 FWDM 透射谱, 插图为种子在 2046~2051 nm 范围内的输出光谱

Fig. 3 Output spectra before and after seed light passes through FWDM and transmission spectrum of FWDM with output spectrum of seed light in 2046–2051 nm shown in inset

FWDM 能够有效滤除波长小于 1930 nm 的 ASE, 而波长大于 1930 nm 的 ASE 仍有部分剩余, 种子光的信噪比由 58.6 dB 提升至 62.8 dB。图 3 中的插图为种子激光通过 FWDM 后 2046~2051 nm 范围内的输出光谱, 其 3 dB 光谱线宽为 0.07 nm, 接近光谱仪分辨率极限。

为获得足够的注入信号光功率, 在预放大级中使用长度为 2.8 m 的掺铥增益光纤。在第一个 CMS 后

测试预放大级的输出功率, 结果如图 4(a) 所示, 输出功率随着进入有源光纤的泵浦功率的增加呈线性增长, 在 17 W 泵浦功率下获得了 8 W 的输出功率, 斜效率( $\eta_s$ )为 41.8%, 能够满足第 2 节理论计算对主放大级注入信号功率的优化要求。图 4(b) 是经过预放大后, 输出功率为 4.4 W 时预放大级的输出光谱, 相较于种子激光, 预放大级输出中 ASE 的光谱范围扩大、强度略有上升, 但光信噪比仍达到 59.9 dB。

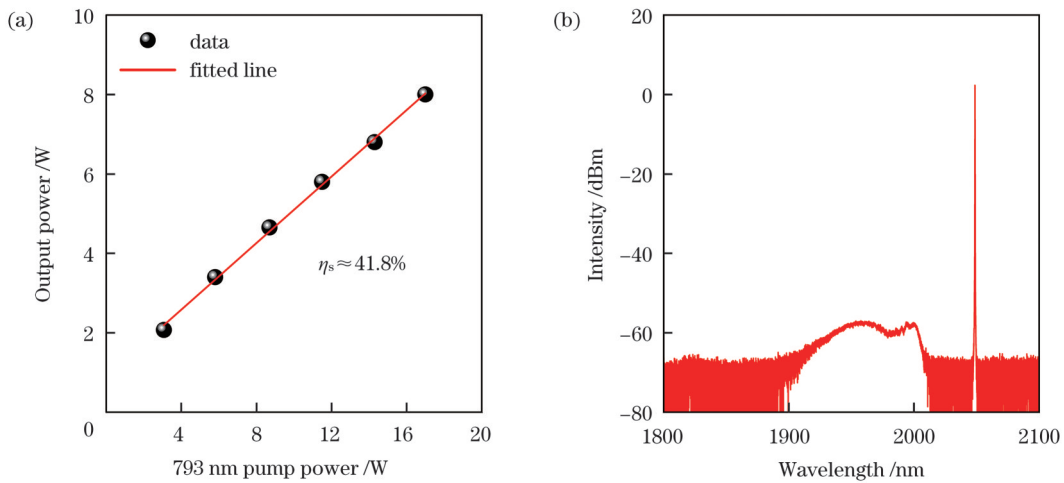


图 4 第一级放大的输出特性。(a) 输出功率; (b) 输出光谱

Fig. 4 Output characteristics of first amplifier. (a) Output power; (b) output spectrum

当注入信号光功率为 4.4 W 时, 主放大级激光输出功率随进入有源光纤的 793 nm 泵浦功率的变化如图 5(a) 所示, 随着泵浦功率的增加, 输出功率呈线性增长。在实验所用泵浦源所能提供的 102.6 W 最大泵浦功率下, 2.05  $\mu\text{m}$  激光的输出功率达到 57 W, 30 min 内的均方根(RMS)稳定度优于 2%, 斜效率为 52.6%, 采用刀口法测得 57 W 最大输出功率下水平方向的光束质量因子( $M_x^2$ )和垂直方向的光束质量因子( $M_y^2$ )分

别为 1.08 和 1.11, 进一步的功率提升受限于有限的泵浦功率。图 5(a) 中的实线给出了相同条件(光纤长度和注入信号光功率)下的仿真结果, 实验结果与理论模拟结果一致。图 5(b) 给出了主放大级输出功率分别为 15 W 和 57 W 时的输出光谱, 当激光中心波长为 2048.7 nm, 输出功率为 57 W 时, 光信噪比为 58.8 dB, 相较于预放大级, 光信噪比并未出现明显劣化, 证明主放大级光纤长度及注入信号光功率的选取较为合适。

图 5(c) 为信号光通过主放大级后在 2046~2051 nm 范围内的输出光谱, 当输出功率为 57 W 时光谱线宽约为 0.08 nm。尽管 2048.7 nm 信号光功率较高, 所用单模有源光纤尺寸也较小, 但在输出光谱中并没有观察到受激拉曼散射(SRS)效应产生的 2.25  $\mu\text{m}$  附近波长的 Stokes 光成分。原因如下: 一方面有源光纤长度较短, 避免了非线性效应的累积; 另一方面石英有源光纤对

2.25  $\mu\text{m}$  附近波长的损耗较大, 对 SRS 起到了抑制作用。在环形器的 3 端口处监测反向光功率, 始终没有发现明显的非线性增强过程, 说明未发生受激布里渊散射(SBS)效应。实验结果显示, 通过系统参数的合理优化和高效的水冷散热手段, 基于单模掺铥增益光纤可以实现数十瓦或更高功率水平的高效率、高光信噪比的 2.05  $\mu\text{m}$  激光输出。

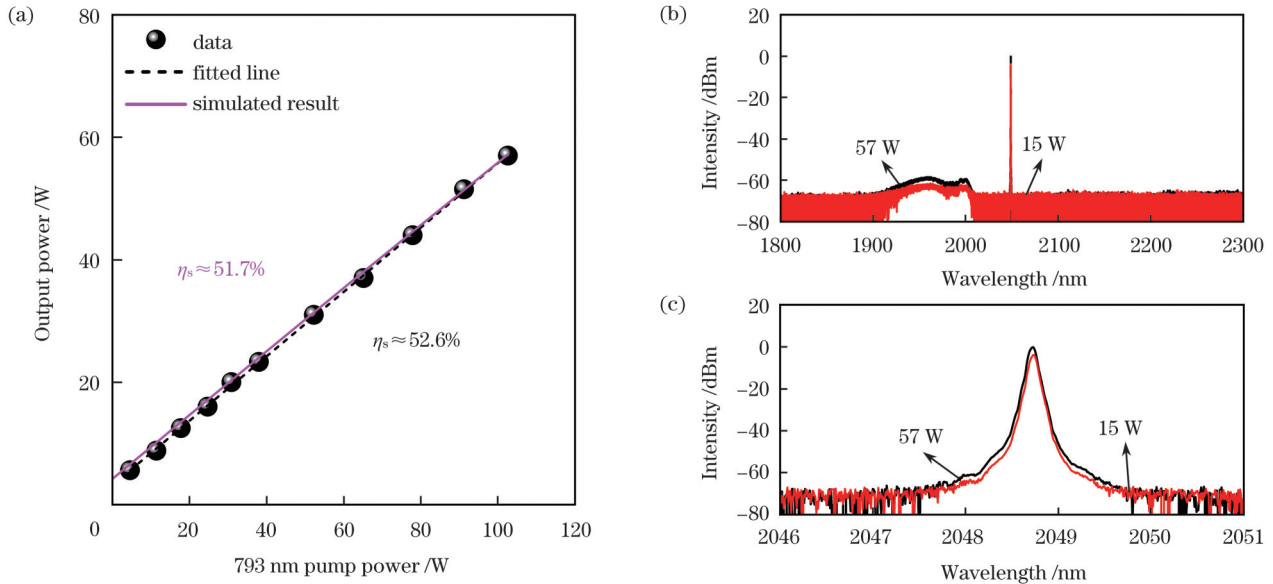


图 5 第二级放大的输出特性。(a) 输出功率; (b) 1800~2300 nm 处的输出光谱; (c) 2046~2051 nm 处的输出光谱

Fig. 5 Output characteristics of second amplifier. (a) Output power; (b) output spectrum in 1800~2300 nm; (c) output spectrum in 2046~2051 nm

## 4 结 论

报道了基于单模掺铥增益光纤的高功率 2.05  $\mu\text{m}$  光纤激光 MOPA。为实现 2.05  $\mu\text{m}$  激光的高效放大和对 1.9  $\mu\text{m}$  发射峰附近 ASE 的有效抑制, 通过构建速率方程模型, 对主放大级的光纤长度和注入信号功率进行了数值优化。在此基础上, 实验获得了最高输出功率为 57 W、主放大级斜效率为 52.6%、信噪比为 58.8 dB 的 2.05  $\mu\text{m}$  单模激光输出, 进一步的功率提升仅受限于有限的泵浦功率。证明了单模掺铥增益光纤具有实现数十瓦高光信噪比长波长激光输出的能力, 能够为激光雷达及空间光通信等应用提供高性能激光光源。

## 参 考 文 献

- [1] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, et al. 2  $\mu\text{m}$  laser sources and their possible applications[M]//Pal B. Frontiers in guided wave optics and optoelectronics. New York: InTech, 2010: 471.
- [2] 孙威威, 冯亭, 李东元, 等. 2  $\mu\text{m}$  波段混合复合谐振腔型单纵模光纤激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(5): 0514006. Sun W W, Feng T, Li D Y, et al. 2- $\mu\text{m}$ -band hybrid compound-resonating-cavity single-longitudinal-mode fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5): 0514006.
- [3] 董亚举, 白雪涛, 郑义. 高功率连续掺铥光纤激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(23): 2300005. Dong Y J, Bai X T, Zheng Y. Research progress of high power continuous wave thulium-doped fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(23): 2300005.
- [4] Lippert E, Nicolas S, Arisholm G, et al. Midinfrared laser source with high power and beam quality[J]. Applied Optics, 2006, 45(16): 3839-3845.
- [5] Lemieux-Tanguay M, Fortin V, Boilard T, et al. 15 W monolithic fiber laser at 3.55  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2022, 47(2): 289-292.
- [6] Barrientos Barria J, Mammez D, Cadiou E, et al. Multispecies high-energy emitter for CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub>O monitoring in the 2  $\mu\text{m}$  range[J]. Optics Letters, 2014, 39(23): 6719-6722.
- [7] McComb T S, Shah L, Sims R A, et al. Atmospheric propagation testing with a high power, tunable thulium fiber laser system[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7578: 75781G.
- [8] 程丹, 延凤平, 冯亭, 等. 基于无源三环复合子腔的 2050 nm 波段单纵模掺铥光纤激光器[J]. 发光学报, 2022, 43(2): 247-254. Cheng D, Yan F P, Feng T, et al. Single-longitudinal mode thulium-doped fiber laser in 2050 nm band based on passive compound triple-ring cavity[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2022, 43(2): 247-254.
- [9] Jackson S D, King T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 948-956.
- [10] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, et al. 1 kW, all-glass thulium-doped fiber laser[EB/OL]. [2023-12-12]. <https://www.doc88.com/p-9963638496080.html>.
- [11] Ren C Y, Shen Y Q, Zheng Y H, et al. Widely-tunable all-fiber Tm doped MOPA with >1 kW of output power[J]. Optics Express, 2023, 31(14): 22733-22739.
- [12] 陈明, 李剑峰, 王屹山, 等. 高功率大模场光纤激光器高阶模抑制技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 080002. Chen M, Li J F, Wang Y S, et al. Progress of high-order mode-

- suppression technology in high-power large mode field fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080002.
- [13] Romano C, Tench R E, Jaouën Y, et al. Simulation and design of a multistage 10 W thulium-doped double clad silica fiber amplifier at 2050 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10083: 100830H
- [14] Nürnberg F, Kühn B, Langner A, et al. Bulk damage and absorption in fused silica due to high-power laser applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9632: 96321R.
- [15] Fang Q, Shi W, Kieu K, et al. High power and high energy monolithic single frequency 2  $\mu\text{m}$  nanosecond pulsed fiber laser by using large core Tm-doped germanate fibers: experiment and modeling[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16410-16420.
- [16] 王文杰. 掺铥光纤激光器的理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 26.  
Wang W J. Theoretical research on thulium-doped fiber lasers[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009: 26.
- [17] Khamis M A, Enns K. Theoretical model of a thulium-doped fiber amplifier pumped at 1570 nm and 793 nm in the presence of cross relaxation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(24): 5675-5681.

## 57 W 2.05 $\mu\text{m}$ Single-Transverse-Mode Thulium-Doped Fiber Laser MOPA

Luo Xuewen<sup>1,2</sup>, Zhang Lu<sup>1,2</sup>, Fu Shijie<sup>1,2\*</sup>, Sheng Quan<sup>1,2</sup>, Zhang Junxiang<sup>1,2</sup>,  
Shi Wei<sup>1,2\*\*</sup>, Yao Jianquan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

### Abstract

**Objective** Fiber lasers operating at the wavelength of 2.05  $\mu\text{m}$  (corresponding to the absorption peak of CO<sub>2</sub> and the atmospheric transmission window) have attracted intense interest owing to their applications in coherent Doppler lidars, free space communication, etc. To date, the highest output power of a 2.05  $\mu\text{m}$  fiber laser has been scaled to the kilowatt level; it is obtained through a master oscillator power amplifier (MOPA) configuration combined with large mode area fiber. However, studying high-power single-mode fiber lasers is also important because they are cost-effective and more resistant to environmental disturbance. To date, the output power of single-mode thulium-doped fiber lasers has been limited to the multiwatt level owing to the diminishing emission cross section of thulium at 2.05  $\mu\text{m}$  and the rising background loss of silica fiber at wavelengths above 2  $\mu\text{m}$ . This work develops a rate equation model to determine the optimal incident signal power and thulium-doped fiber length, based on which a high power, single-transverse-mode 2.05  $\mu\text{m}$  fiber laser with a MOPA configuration is presented.

**Methods** The schematic of the thulium-doped fiber laser MOPA, which contains an oscillator and two stages of amplifiers, is given in Fig. 1. The seed laser is generated from a homemade ring-cavity thulium-doped fiber laser, after which a filter-type wavelength division multiplexer (FWDM) is inserted to improve the optical signal noise ratio (OSNR). In the amplifiers, the gain fiber is 10  $\mu\text{m}$ /130  $\mu\text{m}$  thulium-doped fiber and is forward-pumped by a 793 nm laser diode. In the power-amplifier, the gain fiber is coiled on a water-cooled plate for effective heat dissipation. A rate equation model is developed to determine the optimal incident signal power and thulium-doped fiber length for high-efficiency laser generation.

**Results and Discussions** The simulation results are given in Fig. 2; they indicate an optimal fiber length of 3.7 m and incident signal power of 4.4 W. In the experiment, the output power of the 2.05  $\mu\text{m}$  ring-cavity seed is 1.01 W and decreased to 0.88 W after the FWDM, whereas the OSNR increases from 58.6 dB to 62.8 dB. The 3 dB spectral linewidth is 0.07 nm (Fig. 3). In the pre-amplifier, the 2.05  $\mu\text{m}$  laser is boosted to 8 W under the 793 nm diode pump power of 17 W, with a slope efficiency of 41.8% [Fig. 4(a)]. The OSNR at 4.4 W output power still reaches 59.9 dB [Fig. 4(b)] despite the increased amplified spontaneous emission (ASE). In the power-amplifier, a maximum output power of 57 W at 2048.7 nm with an OSNR of 58.8 dB is obtained when the 793 nm diode pump power is 102.6 W, corresponding to a slope efficiency of 52.6% (Fig. 5). The root-mean-square (RMS) fluctuation of output power is below 2% within 30 min. The beam quality factor ( $M_x^2$ ) in the horizontal direction and the beam quality factor ( $M_y^2$ ) in the vertical direction are 1.08 and 1.11 under 57 W output power at 2.05  $\mu\text{m}$ , demonstrating a near diffraction-limited beam quality. Further power scaling is only limited by the available pump power. The experimental results show that a high-efficiency, high-OSNR 2.05  $\mu\text{m}$  laser with an output power of at least tens of watts can be achieved based on a single-mode thulium-doped gain fiber through system parameter optimization combined with efficient water-cooled heat dissipation.

**Conclusions** This work demonstrates a high-power all-fiber MOPA at 2.05  $\mu\text{m}$  based on a commercial single-mode thulium-doped silica fiber. A rate equation model is developed to optimize the incident signal power and thulium-doped fiber length of the power-amplifier. In an experiment, a maximum output power of 57 W at 2048.7 nm is obtained under a 793 nm diode pump power of 102.6 W, corresponding to a slope efficiency of 52.6%. The linewidth and OSNR are measured as 0.08 nm and 58.8 dB, respectively.

**Key words** lasers; thulium-doped fiber lasers; 2  $\mu\text{m}$  laser; single-mode fiber laser; rate equation