

## 同带泵浦千瓦级掺铥光纤激光器输出特性理论模拟

陶蒙蒙<sup>1,2\*</sup>, 叶锡生<sup>1\*</sup>, 叶景峰<sup>2</sup>, 余婷<sup>1</sup>, 全昭<sup>1</sup>, 漆云凤<sup>1</sup>, 冯国斌<sup>2</sup>, 陈卫标<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;<sup>2</sup>西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

**摘要** 对 793 nm、1.6  $\mu\text{m}$  和 1.9  $\mu\text{m}$  三种不同泵浦波段下千瓦级掺铥光纤激光器的输出特性开展了数值模拟研究。在 1 kW 输出功率下, 对不同泵浦波段的输出效率和热特性进行了对比分析。结果表明, 在 793 nm 泵浦下, 受益于交叉弛豫过程, 量子效率可超过 100%, 但是其整体斜率效率依然不高, 导致激光器产热严重, 废热与输出功率比达 80.8%, 光纤端面温度也相对较高。在同带泵浦下, 激光器效率得到明显提升, 尤其是在 1.9  $\mu\text{m}$  同带泵浦下, 激光器斜率效率达 90% 以上, 废热也得到显著抑制, 使用低掺杂光纤时, 增益光纤温度整体在 50  $^{\circ}\text{C}$  以内。对同带泵浦下掺铥光纤激光器的功率提升开展了初步估算和数值模拟, 估算表明在同带泵浦下, 掺铥光纤激光器的功率提升主要受限于受激布里渊散射、模式不稳定、外包层损伤以及光损伤等四个因素。数值模拟结果表明, 同带泵浦下热载显著降低, 掺铥光纤激光器的功率提升不会受到模式不稳定的影响, 而外包层损伤和受激布里渊散射成为主要的限制因素。对于 1.6  $\mu\text{m}$  和 1.9  $\mu\text{m}$  同带泵浦, 在 25  $\mu\text{m}$  芯径尺寸下, 激光器最高输出功率可分别达 5.9 kW 和 12.7 kW。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 同带泵浦; 热效应; 热载; 功率提升

中图分类号 TN244

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0101019

## 1 引言

掺铥光纤激光器(TDFL)的发射谱覆盖 1.7~2.1  $\mu\text{m}$ , 该波段存在大量密集的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  的吸收谱线, 使其在激光外科手术、激光遥感、激光光谱诊断等领域都具有广泛和重要的应用前景<sup>[1-7]</sup>。另外, 该波段也是获得蓝光和中红外激光的重要泵浦源<sup>[8-11]</sup>。得益于其较长的输出波长, 在保证单模输出的前提下, 其非线性阈值、热透镜阈值和光纤损伤阈值等都要高于 1  $\mu\text{m}$  波段的掺镱光纤激光器<sup>[12-16]</sup>。此外, 相关实验和理论计算也表明, 掺铥光纤激光器具有更高的模式不稳定阈值<sup>[17-19]</sup>, 这就意味着掺铥光纤激光器将有可能超越掺镱光纤激光器而成为下一代高功率光纤激光光源。

掺铥光纤激光器有三个主要的泵浦带, 即 793 nm、1.6  $\mu\text{m}$  和 1.9  $\mu\text{m}$ 。其中, 793 nm 凭借其成熟的商用半导体激光器(LD)技术成为目前高功率掺铥光纤激光器最常用的泵浦波长。2010 年,

Q-Peak 公司 Ehrenreich 等采用全光纤主振荡功率放大器(MOPA)结构, 利用 12 台 150 W 的 793 nm LD, 将 50 W 的 2045 nm 种子激光通过两级放大得到了大于 1 kW 的功率输出, 系统斜率效率约为 53.2%<sup>[20]</sup>。2016 年, 德国夫琅和费应用光学与精密工程研究所 Walbaum 等<sup>[21]</sup>使用 4 台 300 W 的 793 nm LD 后向泵浦一段掺铥光纤(TDF), 实现了 567 W 的直接振荡输出, 激光波长 1970 nm, 系统斜率效率约 49.4%。2021 年, 美国空军实验室 Anderson 等<sup>[22]</sup>采用多台 793 nm LD 作为泵浦源, 总泵浦功率近 2.2 kW, 利用全光纤 MOPA 结构将一个 1950 nm 单频分布式反馈(DFB)激光器经多级放大, 获得了线宽 5 GHz、近衍射极限的 1.1 kW 激光输出, 系统斜率效率约 50.7%, 这也是目前掺铥光纤放大器的最高输出功率记录。可见, 利用 793 nm 泵浦, 掺铥光纤激光系统已经实现了千瓦级的高功率输出。但是, 受限于较低的光-光转换效率, 增益光纤内部会产生大量的废热, 给系统热管理

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2021-08-24; 录用日期: 2021-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(62105268, 62005300)、激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1801Z)

通信作者: \*xsye@siom.ac.cn; \*\*taomengmeng@nint.ac.cn

带来了很大的挑战。如文献[21]中,为保证系统稳定工作,整个增益光纤都需浸泡在冷却水中,而文献[20]中报道的千瓦级激光系统,为了降低主放大级的热载,其功率放大倍数仅为 2 倍(将 500 W 的功率放大了 1 kW)。另外,从 2010 年至 2021 年的十余年间,掺铥光纤激光系统的输出功率水平并未出现显著提升,反映出 793 nm 泵浦的掺铥光纤激光系统功率进一步提升面临着很大的挑战。

同带泵浦是提高激光系统光-光转换效率、降低废热产生的一种有效途径<sup>[23-24]</sup>。在掺铥光纤激光器中,1.6  $\mu\text{m}$  和 1.9  $\mu\text{m}$  均属于同带泵浦波段。其中,1.6  $\mu\text{m}$  可以使用掺铥光纤激光器或钕镱共掺光纤激光器作为泵浦源。2007 年,IPG 公司 Meleshkevich 等<sup>[25]</sup>采用 18 个 40 W 的掺铥光纤激光器泵浦一段掺铥光纤,获得了 415 W 的 1940 nm 单模输出,系统斜效率为 60%。但是,与 793 nm LD 泵浦相比,受限于量子效率,该方案并未实现对系统效率的显著提升,无法从根本上解决掺铥光纤激光系统在高功率输出下面临的严峻热载问题。

为了有效提高掺铥光纤激光器的量子效率和光-光转换效率,从根本上解决高功率输出下的热载问题,2014 年,BAE 公司 Creeden 等<sup>[26]</sup>提出了采用 1.9  $\mu\text{m}$  进行同带泵浦的技术方案。利用该方案,研究人员在掺铥光纤激光器和放大器中均获得了超过 90% 的斜率效率<sup>[27-28]</sup>,最高获得了 123 W 的输出功率。该同带泵浦方案量子效率高、废热少,为掺铥光纤激光系统的功率提升提供了一个重要的技术途径。

表 1 模拟中所用到的相关物理参数

Table 1 Parameters used in the simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
Core radius, $r_1$	12.5 $\mu\text{m}$	Inner cladding radius, $r_2$	125 $\mu\text{m}$
Pedestal radius, $r_p$	22.5 $\mu\text{m}$	Outer cladding radius, $r_3$	200 $\mu\text{m}$
Heat conductivity of the core and the inner cladding, $k_1, k_2$	1.38 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Heat conductivity of the outer cladding, $k_3$	0.2 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Absorption cross-section@1570 nm, $\sigma_{\text{ap}1570}$	$2.0 \times 10^{-25} \text{ m}^{-3}$ <sup>[17,28]</sup>	Emission cross-section@1570 nm, $\sigma_{\text{ep}1570}$	$0.096 \times 10^{-25} \text{ m}^{-3}$ <sup>[28]</sup>
Absorption cross-section@1910 nm, $\sigma_{\text{ap}1910}$	$0.21 \times 10^{-25} \text{ m}^{-3}$ <sup>[17,26,28]</sup>	Emission cross-section@1910 nm, $\sigma_{\text{ep}1910}$	$4.97 \times 10^{-25} \text{ m}^{-3}$ <sup>[28]</sup>
Absorption cross-section@2010 nm, $\sigma_{\text{ap}2010}$	$0.03 \times 10^{-25} \text{ m}^{-3}$ <sup>[28]</sup>	Emission cross-section@2010 nm, $\sigma_{\text{ep}2010}$	$2.56 \times 10^{-25} \text{ m}^{-3}$ <sup>[7,28]</sup>
Doping concentration of LC TDF, $N_{\text{LC}}$	$14.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$	Doping concentration of HC TDF, $N_{\text{HC}}$	$28.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
Thermo-optic coefficient of silica, $k$	$1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	Lifetime of $^3\text{F}_4$ energy level, $\tau$	500 $\mu\text{s}$ <sup>[17]</sup>

## 2.1 1 kW 输出功率下的效率及热特性

在 1 kW 输出功率下对不同掺杂浓度和泵浦方

本文就同带泵浦下高功率掺铥光纤激光器的输出特性开展理论模拟,对其在千瓦级输出功率下的效率和热特性进行了研究,并与 793 nm 泵浦方案进行了对比,在此基础上对两种同带泵浦方案的功率提升限制因素进行了估算和数值模拟。通过相关研究,给出了掺铥光纤激光系统实现千瓦级高功率输出的优势泵浦方案,并对其功率进一步提升能力进行了预估。

## 2 千瓦级掺铥光纤激光器输出特性模拟与分析

同带泵浦下掺铥光纤激光器为二能级结构,速率方程较为简单<sup>[29]</sup>,与掺镱光纤激光器类似<sup>[1,30-31]</sup>。结合传输方程和边界条件,可较为方便地求解得到激光器的输出特性。模拟中使用双端泵浦方式,在 1.6  $\mu\text{m}$  波段和 1.9  $\mu\text{m}$  波段分别取 1570 nm 和 1910 nm 两个泵浦波长,信号光波长  $\lambda_s$  设为 2010 nm,增益光纤选择低掺(LC)和高掺(HC)两种掺杂浓度,光纤尺寸均为 25/250,基座直径为 45  $\mu\text{m}$ 。1570 nm 使用包层泵浦(CP)方式,1910 nm 同时考虑纤芯泵浦(CoP)和基座泵浦(PP)两种泵浦方式。基座泵浦时,泵浦光在直径为 45  $\mu\text{m}$  的基座内传输。数值计算中所使用的相关物理参数如表 1 所示。

另外,作为对比,同时对 793 nm 泵浦下的激光器特性开展了数值模拟,计算中铥离子所采用的各物理参数与文献[17]相同,光纤尺寸与表 1 中相同。

式下激光器的增益光纤长度进行了优化,并在最优长度下通过数值模拟得到了激光器系统的斜率效

率,如表 2 所示。通过对比可以发现:在 1 kW 输出功率下,793 nm 泵浦的激光器效率在 60%左右,略高于实验报道<sup>[20-22]</sup>;1570 nm 同带泵浦的激光器效率得到了一定的改善,在 75%左右,高于文献报道水平<sup>[25]</sup>;1910 nm 同带泵浦的激光器效率得到明显提升,纤芯泵浦和基座泵浦效率均在 90%以上,与文献报道水平一致<sup>[26-28]</sup>。同时,较高的掺杂浓度有利于提高激光器的斜率效率,尤其对于 793 nm 泵浦,受交叉弛豫过程的影响,提高掺杂浓度可以较为明显地改善激光器效率。在量子效率方面,同带泵浦下,激光器系统量子效率极高,均在 95%以上,而 793 nm 泵浦下,得益于交叉弛豫过程,其量子效率可高于 100%,且与掺杂浓度密切相关。

表 2 1 kW 输出功率下不同激光器系统最优增益  
光纤长度及斜率效率

Table 2 Optimal gain fiber length and corresponding slope efficiency of different laser systems at 1 kW output

Pump band	Laser configuration	Optimal TDF length / m	Slope efficiency / %	Quantum efficiency / %
793 nm	CP+HC	5.0	64.0	162.2
	CP+LC	11.0	54.4	137.9
1570 nm	CP+HC	10.0	76.4	97.8
	CP+LC	17.8	75.2	96.3
	CoP+HC	2.6	94.3	99.2
1910 nm	CoP+LC	5.0	93.9	98.8
	PP+HC	5.6	93.7	98.6
	PP+LC	10.4	92.8	97.7

值得注意的是,对于不同泵浦方式,低掺杂浓度光纤的最优光纤长度均约为高掺杂浓度光纤的 2 倍。考虑到高掺杂浓度光纤的掺杂浓度约为低掺杂浓度光纤的 2 倍,两种不同掺杂浓度下对应的总名义吸收系数应该是较为相近的。

模拟中同时发现,在 1 kW 输出功率下,不同泵浦方式对泵浦功率的要求是不尽相同的,而且信号光的转换效率也存在较大差异。表 3 给出了 1 kW 输出功率下不同激光器系统的功率特性。表中可以看出,793 nm 泵浦下对泵浦功率的要求最高,达 1810 W,吸收的泵浦光功率为 1808 W,减去 1 kW 的输出信号,剩余功率为 808 W,这部分剩余功率主要转换成了废热分布在增益光纤内部,与 1 kW 的输出功率相比,废热的比率达 80.8%。在 1570 nm

同带泵浦下,废热功率比得到了一定改善,约 32.7%。而使用 1910 nm 同带泵浦时,仅需约 1080 W 的泵浦功率即可实现 1 kW 激光输出,系统废热率低于 8%,可极大地降低激光器系统的热管理难度。

表 3 1 kW 输出下不同激光器系统的功率特性

Table 3 Power characteristics of different laser systems at 1 kW output

Pump band	Laser configuration	Pump / W	Absorbed pump / W	Heat / W	Ratio / %
793 nm	CP+LC	1810	1808	808	80.8
1570 nm	CP+LC	1335	1327	327	32.7
	CoP+LC	1067	1066	66	6.6
1910 nm	PP+LC	1081	1078	78	7.8

激光器内热载分布  $Q(z)$  可表示为<sup>[17]</sup>

$$Q(z) = \left[ \frac{dP_p^-(z)}{dz} - \frac{dP_p^+(z)}{dz} \right] + \left[ \frac{dP_s^-(z)}{dz} - \frac{dP_s^+(z)}{dz} \right], \quad (1)$$

式中,  $P_p^\pm(z)$  代表增益光纤内前向和后向的泵浦光分布,  $P_s^\pm(z)$  代表增益光纤内前向信号光分布,由此可计算增益光纤内的热载分布。图 1 为 1 kW 输出功率下不同激光系统的热载分布特性,可见 793 nm 泵浦下激光器的热载水平显著高于同带泵浦,且对于激光器系统而言,增益光纤两端的泵浦端面热载最高,这就极容易导致光纤的泵浦端面产生损伤。而在 1910 nm 同带泵浦下,得益于较高的信号光转换效率,光纤在信号光输出端面热载明显高于高反端面,但整体热载水平可控。

分别设定增益光纤的冷却对流系数  $H$  为  $H_1 = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$  和  $H_2 = 10000 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 1 kW 输出功率下,不同激光器系统的平均热载和温度参数如表 4 所示,可以看出在不同泵浦方式下,由于低掺杂浓度光纤的最优光纤长度较长,其对应的平均热载也相对较低,整体而言,793 nm 泵浦下,由于量子亏损大,激光器转换效率低,热载较为显著,对应的纤芯和包层温度也较高,得益于更低的量子亏损,同带泵浦表现出了更小的热载,同时增益光纤内部温升也更为可控。尤其是 1910 nm 基座泵浦方式,使用低掺杂光纤,激光器平均热载仅为 6.8 W/m,与 793 nm 泵浦相比,其热载降低了约 93.5%,在 1 kW 输出功率下,其外包层最高温度不超过 50℃,这无疑将会对激光器的热管理带来极大便利。

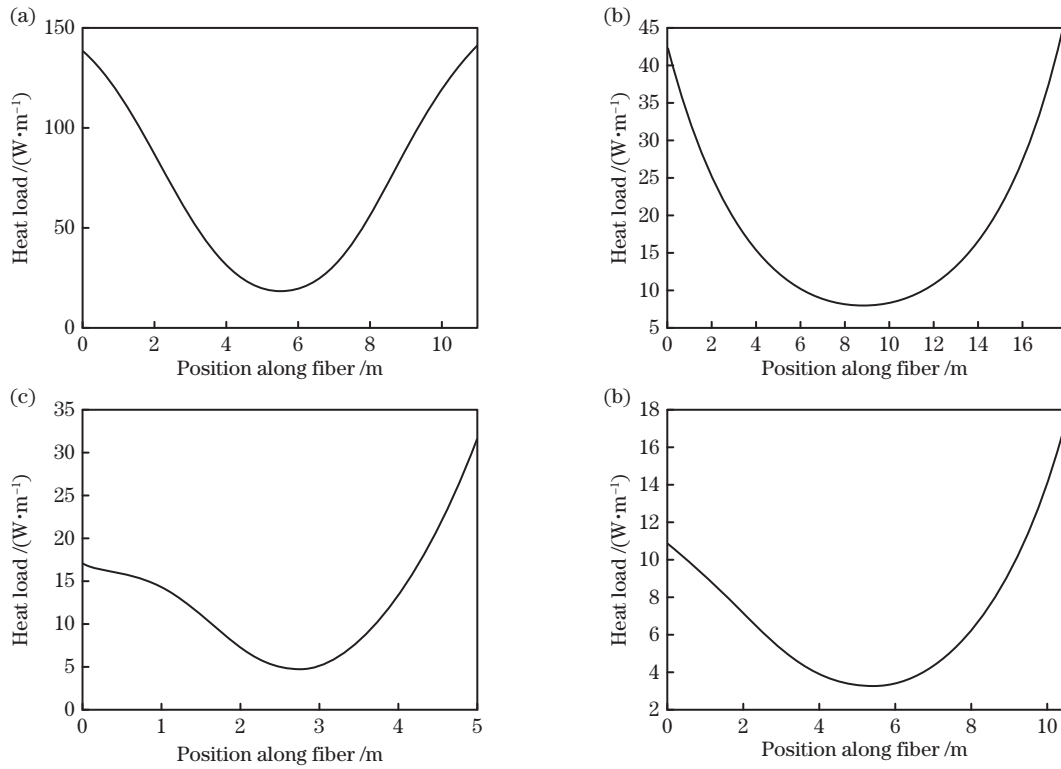


图 1 1 kW 输出下不同激光器系统增益光纤内部的热载分布。(a)793 nm 包层泵浦;(b)1570 nm 包层泵浦;  
(c)1910 nm 纤芯泵浦;(d)1910 nm 基座泵浦

Fig. 1 Distribution of the heat load for different laser systems at 1 kW output. (a) 793 nm cladding pump;  
(b) 1570 nm cladding pump; (c) 1910 nm core pump; (d) 1910 nm pedestal pump

表 4 1 kW 输出下不同激光器系统的热特性

Table 4 Thermal characteristics of different laser systems at 1 kW output

Pump band	Laser configuration	Average heat load / (W·m <sup>-1</sup> )	Maximum temperature /°C @ H <sub>1</sub>		Maximum temperature /°C @ H <sub>2</sub>	
			Core	Outer cladding	Core	Outer cladding
793 nm	CP+HC	104.3	407.7	323.1	220.2	135.6
	CP+LC	69.3	227.6	182.0	126.5	80.9
1570 nm	CP+HC	30.1	141.6	114.6	81.8	54.7
	CP+LC	17.8	83.2	68.8	51.4	37.0
1910 nm	CoP+HC	22.1	103.8	84.9	62.1	43.3
	CoP+LC	12.5	63.9	53.7	41.3	31.1
	PP+HC	11.1	61.1	51.6	39.9	30.3
	PP+LC	6.8	41.7	36.3	29.8	24.4

## 2.2 功率提升限制因素分析

### 2.2.1 初步估算

光纤激光器功率的提升主要受限于泵浦亮度、非线性效应、热效应以及光损伤等因素。在同带泵浦下,采用高亮度的光纤激光器作为泵浦源,在保证对泵浦光有效吸收的前提下,泵浦亮度因素可不予考虑。

非线性效应主要包括受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)。对于输出线宽为  $\Delta\nu$  的激光器,其 SRS 阈值  $P_{SRS}$  和 SBS 阈值  $P_{SBS}$  可分别表

示为<sup>[32-33]</sup>

$$P_{SRS} = \frac{25\pi\omega^2}{g_R L} \ln G, \quad (2)$$

$$P_{SBS} = \frac{21\pi\omega^2}{g_B L} (\ln G) \frac{\Delta\nu + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B}, \quad (3)$$

式中, $\omega$  为有效模场半径, $G$  为信号增益倍数, $L$  为光纤长度, $\Delta\nu_B$  为 SBS 增益带宽, $g_R$  和  $g_B$  分别为 SRS 峰值增益和 SBS 峰值增益。

热效应主要是由于光纤内部废热所导致的热透镜、纤芯熔化、外包层损伤(OCD)、热破裂以及

模式不稳定(TMI)等。热透镜阈值可表示为<sup>[32]</sup>

$$P_{TL} = \frac{\pi k_1 \lambda_s^2}{2k r_1^2} \frac{\eta_{laser}}{\eta_{heat}} L, \quad (4)$$

式中,  $\eta_{laser}$  和  $\eta_{heat}$  分别为激光效率和产热效率,  $\eta_{laser}$  可使用表 2 中给出的激光器斜率效率,  $\eta_{heat}$  可

取值为  $\eta_{heat} = 1 - \eta_{laser}$ 。

纤芯熔化和外包层损伤均与增益光纤内部的温度特性相关。激光器在稳态运行情况下,其增益光纤内部的温度分布可表示为<sup>[34]</sup>

$$\begin{cases} T_1(r) = T_c + \frac{Q}{\pi} \left[ \frac{1}{2Hr_3} + \frac{1}{2k_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2k_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \right] + \frac{Q}{4\pi k_1} \left(1 - \frac{r^2}{r_1^2}\right), 0 \leq r \leq r_1 \\ T_2(r) = T_c + \frac{Q}{\pi} \left[ \frac{1}{2Hr_3} + \frac{1}{2k_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \right] + \frac{Q}{2\pi k_2} \left[ \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \right], r_1 < r \leq r_2 \\ T_3(r) = T_c + \frac{Q}{2\pi Hr_3} + \frac{Q}{2\pi k_3} \left[ \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) - \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) \right], r_2 < r \leq r_3 \end{cases}, \quad (5)$$

式中,  $Q$  为单位长度产生的废热,即热载,单位为  $W/m$ ,  $T_c$  为冷却温度。

石英光纤的纤芯基质为熔融石英,其温度应保持在石英的熔化温度  $T_M = 1709.9 \text{ }^\circ\text{C}$  以内<sup>[13]</sup>。当纤芯达到熔化温度  $T_M$  时有

$$T_1(0) = T_c + \frac{Q}{\pi} \left[ \frac{1}{2Hr_3} + \frac{1}{2k_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2k_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \right] + \frac{Q}{4\pi k_1} = T_M. \quad (6)$$

双包层光纤的外包层一般采用低折射率的聚酯材料,其稳定运行温度一般应低于损伤温度  $T_m = 105 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[12]</sup>。当外包层最高温度达到损伤阈值损伤温度  $T_m$  时,有

$$T_2(r_2) = T_c + \frac{Q}{2\pi Hr_3} + \frac{Q}{2\pi k_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) = T_m. \quad (7)$$

由此可估算纤芯和外包层在热损伤阈值处的热载分别表示为

$$Q = \frac{T_M - T_c}{\frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2Hr_3} + \frac{1}{2k_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2k_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \right] + \frac{1}{4\pi k_1}}, \quad (8)$$

$$Q = \frac{T_m - T_c}{\frac{1}{2\pi Hr_3} + \frac{1}{2\pi k_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}. \quad (9)$$

增益光纤内前、后向传输的泵浦光  $P_p^\pm$  和信号光  $P_s^\pm$  的分布可表示为

$$\begin{cases} \pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\alpha_p(z) P_p^\pm(z) \\ \pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = g_s(z) P_s^\pm(z) \end{cases}, \quad (10)$$

式中,  $\alpha_p(z)$  为增益光纤对泵浦光的吸收系数,

$g_s(z)$  为增益光纤对泵浦光的增益系数。

增益光纤热载分布可表示为

$$Q(z) = \left[ \frac{dP_p^-(z)}{dz} - \frac{dP_p^+(z)}{dz} \right] + \left[ \frac{dP_s^-(z)}{dz} - \frac{dP_s^+(z)}{dz} \right] = \alpha_p(z) [P_p^+(z) + P_p^-(z)] - g_s(z) [P_s^+(z) + P_s^-(z)]. \quad (11)$$

由于增益光纤内  $\alpha_p(z)$  和  $g_s(z)$  分布是不均匀的,因此  $Q(z)$  也是不均匀的。为了便于估算,取平均热载为增益光纤内各处的等效热载。增益光纤内热载的主要来源是泵浦光转换为信号光时产生的量子亏损,增益光纤内的平均热载可表示为

$$\bar{Q} = \frac{P_p \eta_{heat}}{L}, \quad (12)$$

式中,  $P_p$  为总的泵浦功率。

结合(8)式和(9)式,可以得到纤芯熔化阈值热载  $\bar{Q}_{MC}$  和外包层损伤阈值热载  $\bar{Q}_{OCD}$  分别为

$$\bar{Q}_{MC} = \frac{T_M - T_c}{\frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2Hr_3} + \frac{1}{2k_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2k_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \right] + \frac{1}{4\pi k_1}}, \quad (13)$$

$$\bar{Q}_{OCD} = \frac{T_m - T_c}{\frac{1}{2\pi Hr_3} + \frac{1}{2\pi k_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}. \quad (14)$$

高功率输出下,又有

$$P_s \approx P_p \eta_{laser}, \quad (15)$$

则可得外包层损伤功率阈值为

$$P_{MC} = \frac{T_M - T_c}{\frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2Hr_3} + \frac{1}{2k_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2k_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \right] + \frac{1}{4\pi k_1}} \frac{\eta_{laser}}{\eta_{heat}} L, \quad (16)$$

$$P_{\text{OCD}} = \frac{T_m - T_c}{\frac{1}{2\pi H r_3} + \frac{1}{2\pi k_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \frac{\eta_{\text{laser}}}{\eta_{\text{heat}}} L. \quad (17)$$

模式不稳定阈值与增益光纤内部的平均热载  $\bar{Q}$  密切相关<sup>[18-19,35]</sup>。在掺铥光纤激光器中,模式不稳定阈值对应的平均热载  $\bar{Q}_{\text{YDFL}}$  约为 34 W/m,由于该值与波长的平方相关,因此在掺铥光纤激光器模式不稳定阈值的估算中选择对应的平均热载  $\bar{Q}_{\text{TDFL}}$  约为 136 W/m<sup>[18]</sup>。结合(12)式和(15)式,可

表 5 功率受限因素估算中所用到的相关物理参数

Table 5 Parameters used in the estimation of power limit factors

Parameter	Value	Parameter	Value
Peak gain of SRS, $g_{\text{R}}^*$	$0.5 \times 10^{-13}$ m/W <sup>[13]</sup>	Peak gain of SBS, $g_{\text{B}}$	$1.2 \times 10^{-11}$ m/W <sup>[36]</sup>
Linewidth of SBS gain, $\Delta\nu_{\text{B}}$	10.0 MHz <sup>[12]</sup>	Laser linewidth, $\Delta\nu$	1.0 GHz
Melting temperature of the core, $T_{\text{M}}$	1709.9 °C <sup>[12]</sup>	Damage temperature of the outer cladding, $T_{\text{m}}$	105.0 °C <sup>[12]</sup>
Coolant temperature, $T_{\text{c}}$	16.9 °C <sup>[13]</sup>	Average heat load of TDFL at TMI threshold, $\bar{Q}_{\text{TDFL}}$	136.0 W/m <sup>[18]</sup>
Signal gain, $G$	10.0 <sup>[13]</sup>	Optical damage limit, $I_{\text{OD}}$	35.0 W/ $\mu\text{m}^2$ <sup>[14]</sup>

\* SRS 峰值增益与泵浦波长成反比,因此这里 SRS 峰值增益取为 1  $\mu\text{m}$  处的 1/2。

将表 1 和表 5 中的相关参数代入(16)式和(17)式,得到外包层损伤阈值远小于纤芯熔化阈值。同时,热破裂阈值又远高于纤芯熔化阈值<sup>[37]</sup>,因此,估算中可不考虑纤芯熔化和热破裂因素。那么,结合(2)~(4)式、(17)~(19)式,即可对掺铥光纤激光器的功率受限因素进行估算。

表 6 最优增益光纤长度下不同激光器系统功率受限因素估算

Table 6 Estimation of power limit for different laser systems at optimal gain fiber lengths

Pump band	Laser configuration	SBS@1 GHz /kW	SRS /kW	TMI /kW	TL /kW	OCD /kW		OD /kW
						$H_1$	$H_2$	
1570 nm	CP+HC	14.7	41.7	4.4	165.0	2.4	6.3	12.7
	CP+LC	8.3	23.4	7.4	275.0	4.1	10.5	12.7
	CoP+HC	56.7	160.3	5.8	219.2	3.2	8.4	12.7
1910 nm	CoP+LC	29.5	83.3	10.5	392.2	5.8	15.0	12.7
	PP+HC	26.3	74.4	11.3	389.0	6.3	16.2	12.7
	PP+LC	14.2	40.1	18.2	626.1	10.1	26.1	12.7

表中可以看出,对于同带泵浦掺铥光纤激光器而言,受激拉曼散射阈值和热透镜阈值较高,均在数十千瓦量级水平,其功率提升主要需考虑受激布里渊散射、模式不稳定、外包层损伤以及光损伤等四个因素的影响。

### 2.2.2 数值模拟

在初步估算的基础上,对功率提升的四个主要限制因素开展了理论模拟。模拟中,为了保证对泵浦光具有相同的吸收,改变增益光纤长度时,其掺杂浓度

得掺铥光纤激光器模式不稳定阈值关系式为

$$P_{\text{TMI}} = 136 \frac{\eta_{\text{laser}}}{\eta_{\text{heat}}} L. \quad (18)$$

光损伤主要是指由于纤芯功率密度过高导致的光纤端面损伤,其阈值表达式为<sup>[13]</sup>

$$P_{\text{OD}} = \pi w^2 I_{\text{OD}}, \quad (19)$$

式中,  $I_{\text{OD}}$  光纤端面损伤的极限功率密度。

估算中使用的各物理量如表 5 所示<sup>[12,14,36]</sup>。

在最优增益光纤长度下,同带泵浦掺铥光纤激光器的功率受限因素估算结果如表 6 所示。需要指出的是,由于外包层损伤阈值的估算使用的是增益光纤的平均热载,而不是最高点的热载,所以估算得到的外包层损伤阈值会高于实际值。

也随之改变,以使激光器系统保持对泵浦光相同的名义吸收率。对于外包层损伤阈值,模拟中同时考虑了  $H_1 = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$  和  $H_2 = 10000 \text{ W/m}^2\text{K}$  两种冷却对流系数。

理论模拟中受激布里渊散射阈值和光损伤阈值可分别通过(2)式和(18)式进行计算,过程较为简单。模式不稳定阈值和外包层损伤阈值的计算算法结构框图如图 2 所示。在给定的激光器结构参数下,通过速率方程、传输方程和边界条件完成激光器数值模

拟,得到激光器系统内部功率分布和热载分布,然后通过热模拟得到激光器系统内部温度分布。在得到

热载分布和温度分布后分别通过一个泵浦功率的迭代循环求解模式不稳定阈值和外包层损伤阈值。

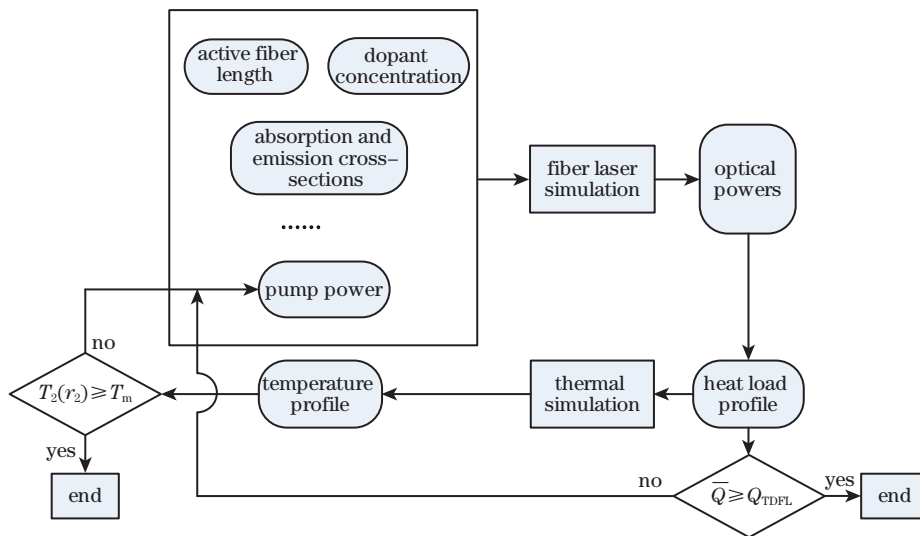


图 2 模式不稳定阈值和外包层损伤阈值算法框架图

Fig. 2 Algorithm diagram for simulation of TMI threshold and outer cladding damage threshold

文献[27]指出,高功率泵浦下的掺铒光纤会出现较为严重的泵浦漂白,导致对泵浦光的吸收降低,从而影响系统的输出效率,给高功率掺铒光纤激光系统的优化设计带来诸多难题。在理论模拟中,若不能保证激光系统在不同增益光纤长度下都能实现对泵浦光的有效吸收,则会给激光器的输出功率计

算带来较大误差。模拟中设定增益光纤保持对泵浦光相同的名义吸收率,以保证对泵浦光的有效吸收。为了验证该设定的可行性,对不同泵浦功率和增益光纤长度下激光系统对泵浦光的吸收效率进行了计算,结果如图 3 所示。

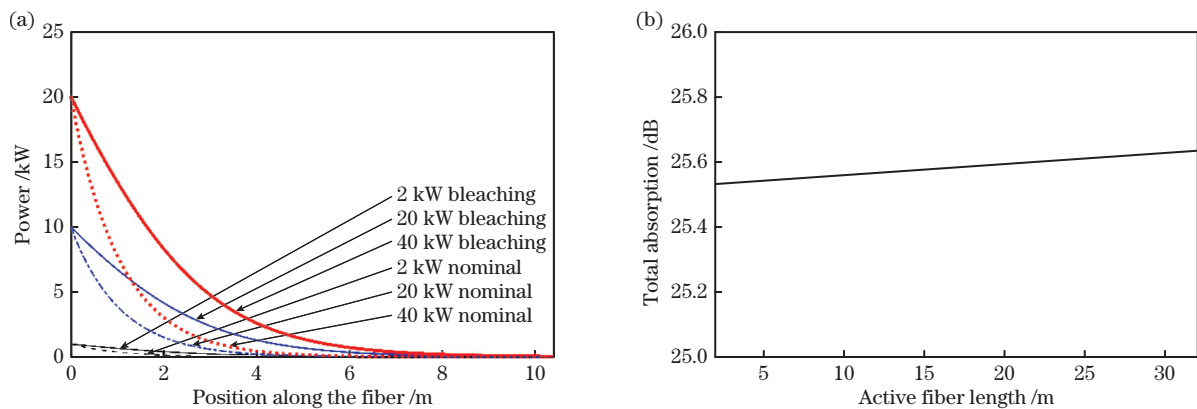


图 3 固定名义吸收率下激光系统对泵浦光的吸收情况。(a)前向泵浦分布情况;(b)泵浦光总吸收

Fig. 3 Pump absorption with a constant nominal total absorption. (a) Forward pump distribution;

(b) total absorption of pump

图 3(a)给出了固定增益光纤长度下不同泵浦功率前向泵浦光的分布情况。可以看出,增益光纤内实际泵浦光分布与名义吸收系数计算得到的泵浦光分布存在较大差异。与名义吸收系数计算得到的泵浦光分布相比,由于泵浦漂白的存在,泵浦光在增益光纤内的吸收更为平缓。尤其在泵浦注入端的一段距离内,增益光纤对泵浦光吸收近乎呈线性关系,随着泵浦功率的减低,吸收又逐渐恢复指数关系。

但是,在给定的增益光纤长度内,不同功率的泵浦光都得到了较为充分的吸收。图 3(b)给出了 40 kW 高功率泵浦时不同增益光纤长度下激光系统对泵浦光的总体吸收情况。可以看出,在 2~32 m 长度范围内,增益光纤对泵浦光的吸收均在 25 dB 以上,且随着增益光纤长度的增长略有增加。可见,保持名义吸收率不变,即使在高功率泵浦下增益光纤也能实现对泵浦光的有效吸收,验证了模拟中设定固定

名义吸收率的可行性。

模拟得到的 1570 nm 同带泵浦下掺铥光纤激光器输出功率受限因素的变化情况如图 4 所示。图中可以看出,1570 nm 同带泵浦下,掺铥光纤激光器模式不稳定阈值显著高于外包层损伤阈值。在关注的增益光纤长度内,即掺杂浓度范围内,掺铥光纤激光器功率提升主要受到受激布里渊散射和外包层损伤的限制。

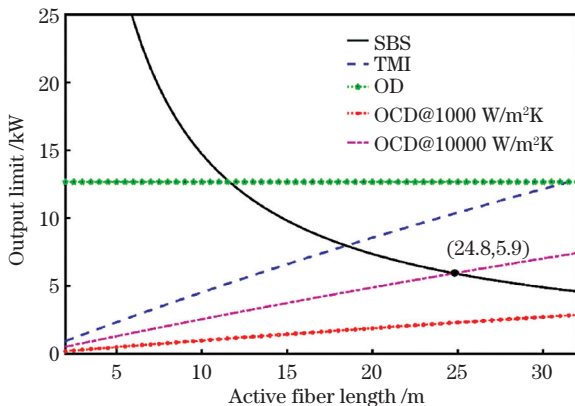


图 4 1570 nm 泵浦下掺铥光纤激光器的功率限制因素  
Fig. 4 Power limitation of Tm-doped fiber laser at 1570 nm pump

在 1000 W/m<sup>2</sup>K 的冷却对流系数下,激光器外包层损伤阈值直接决定了激光器的最高输出功率。

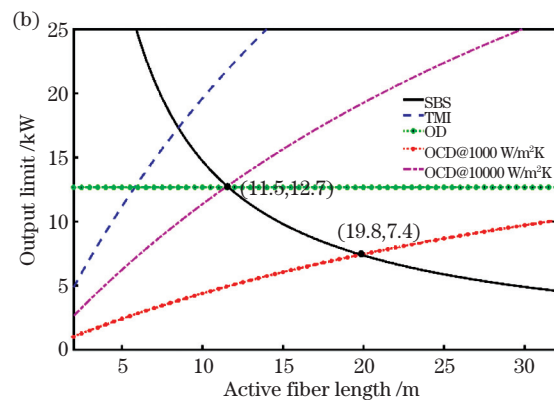
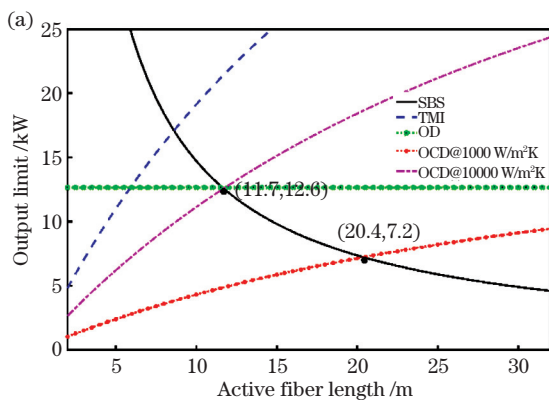


图 5 1910 nm 泵浦下掺铥光纤激光器的功率限制因素。(a)纤芯泵浦;(b)基座泵浦

Fig. 5 Power limitation of Tm-doped fiber laser at 1910 nm pump. (a) Core pump; (b) pedestal pump

在 1000 W/m<sup>2</sup>K 的冷却对流系数下,增益光纤长度在 20 m 以内时,激光器外包层损伤阈值直接决定了激光器的最高输出功率。激光器外包层损伤阈值随光纤长度增长呈单调递增趋势。纤芯泵浦时,在增益光纤长度为 2.6 m 和 5.0 m 处,外包层损伤阈值分别为 1.3 kW 和 2.4 kW。基座泵浦时,在增益光纤长度为 5.6 m 和 10.4 m 处,外包层损伤阈值分别为 2.7 kW 和 4.5 kW,均小于表 6 中的估算数据。当增益光纤长度增加到约为 20 m 时,

激光器外包层损伤阈值随光纤长度增长呈线性增加,斜率约为 89.2 W/m。在增益光纤 10 m 和 17.8 m 处,外包层损伤阈值分别为 1.0 kW 和 1.7 kW,小于表 6 中的估算数据。

在 10000 W/m<sup>2</sup>K 的冷却对流系数下,外包层损伤阈值仍随光纤长度增长而线性增加,增长斜率得到显著提升,约为 230.0 W/m。在增益光纤 10 m 和 17.8 m 处,外包层损伤阈值分别为 2.6 kW 和 7.7 kW,小于表 6 中的估算数据。在增益光纤长度为 24.8 m 时,外包层与受激布里渊散射阈值相同,约为 5.9 kW。继续增加增益光纤长度,受激布里渊散射成为直接限制因素,使得激光器最高输出功率呈下降趋势。

1910 nm 同带泵浦下掺铥光纤激光器输出功率受限因素的变化情况如图 5 所示,可以看出纤芯泵浦方式与基座泵浦方式得到的模拟结果近乎相当。得益于 1910 nm 同带泵浦极高的量子效率,增益光纤内热载水平较低,使得模式不稳定阈值显著高于外包层损伤阈值,并随着增益光纤长度的增加迅速超越光损伤阈值(@~5.9 m)和受激布里渊散射阈值(@~8.6 m)。因此,在关注的增益光纤长度内,掺铥光纤激光器功率提升主要受到受激布里渊散射、光损伤和外包层损伤的限制。

外包层损伤阈值与受激布里渊散射阈值相当,约为 7.3 kW,此后受激布里渊散射成为激光器的最高输出功率的直接限制因素。

在 10000 W/m<sup>2</sup>K 的冷却对流系数下,外包层损伤阈值仍随光纤长度增长而单调递增,且增长斜率得到显著提升。增益光纤长度大约在 11.6 m 以内时,激光器外包层损伤阈值直接决定了激光器的最高输出功率。纤芯泵浦时,在增益光纤长度为 2.6 m 和 5.0 m 处,外包层损伤阈值分别为 3.4 kW



和 6.2 kW。基座泵浦时,在增益光纤长度为 5.6 m 和 10.4 m 处,外包层损伤阈值分别为 6.9 kW 和 11.7 kW,也均小于表 6 中的估算数据。在增益光纤长度约为 11.6 m 时,外包层损伤阈值、光损伤阈值、受激布里渊散射阈值三者相近,约为 12.7 kW。随着增益光纤长度的继续增加,受激布里渊散射成为激光器最高输出功率的直接限制因素,且呈下降趋势。

表 7 不同激光器系统最高输出功率

Table 7 Maximum output powers for different pump configurations

Pump configuration	Maximum output powers /kW	
	$H_1$	$H_2$
1570 nm CP	2.9	5.9
1910 nm CoP	7.2	12.6
1910 nm PP	7.4	12.7

表 7 对图 5 和图 6 所示的三种同带泵浦方式下激光器最高输出功率进行了总结对比。可见,三种同带泵浦方式均可实现千瓦级的功率输出,而 1910 nm 同带泵浦功率提升空间更大,在 1000 W/m<sup>2</sup>K 的常规冷却对流系数下即可获得超过 7 kW 的功率输出,在 10000 W/m<sup>2</sup>K 的常规冷却对流系数下可实现 10 kW 级功率输出,为掺铥光纤激光器的功率提升提供了一种有效的技术途径。

### 3 结 论

通过理论模拟研究,对比分析了不同泵浦波段下千瓦级掺铥光纤激光器的输出特性及热特性,并对掺铥光纤激光器进一步的功率提升进行了模拟分析。结果表明,传统 793 nm 泵浦下,激光器内部热载严重,功率的进一步提升会受到模式不稳定和外包层损伤的严重制约。而采用 1.6  $\mu\text{m}$  和 1.9  $\mu\text{m}$  同带泵浦则可大幅缓解激光器系统的热载压力,实现数千瓦的功率输出,尤其是在 1.9  $\mu\text{m}$  同带泵浦下,激光器系统量子亏损低、转换效率高、热载可控,是掺铥光纤激光器实现数千瓦甚至万瓦高功率输出的优选方案。

### 参 考 文 献

- [1] Jackson S D, King T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 948-956.
- [2] Fried N M, Blackmon R L, Irby P B. A review of thulium fiber laser ablation of kidney stones [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7914: 791402.
- [3] Kronenberg P, Traxer O. The laser of the future: Reality and expectations about the new thulium fiber laser—a systematic review [J]. *Translational Andrology and Urology*, 2019, 8(S4): S398-S417.
- [4] Barnes N P, Walsh B M, Reichle D J, et al. Tm: fiber lasers for remote sensing [J]. *Optical Materials*, 2009, 31(7): 1061-1064.
- [5] Fjodorow P, Hellmig O, Baev V M. A broadband Tm/Ho-doped fiber laser tunable from 1.8 to 2.09  $\mu\text{m}$  for intracavity absorption spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(4): 1-8.
- [6] Tao M M, Tao B, Hu Z Y, et al. Development of a 2  $\mu\text{m}$  Tm-doped fiber laser for hyperspectral absorption spectroscopy applications [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32386-32394.
- [7] Tao M M, Tao B, Ye J F, et al. Linewidth compression of tunable Tm-doped fiber laser and its hyperspectral absorption application [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(3): 034205.  
陶蒙蒙, 陶波, 叶景峰, 等. 可调谐掺铥光纤激光器线宽压缩及其超光谱吸收应用 [J]. *物理学报*, 2020, 69(3): 034205.
- [8] Creeden D, Blanchard J, Pretorius H, et al. 486nm blue laser operating at 500 kHz pulse repetition frequency [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 972829.
- [9] Fu Q, Xu L, Liang S J, et al. Widely tunable, narrow-linewidth, high-peak-power, picosecond midinfrared optical parametric amplifier [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 5100706.
- [10] Bu X B, Shi H X, Cheng Z C, et al. Tunable narrow-linewidth Cr:ZnSe laser pumped by thulium-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201014.  
卜祥宝, 师红星, 程昭晨, 等. 掺铥光纤激光器抽运的可调谐窄线宽 Cr:ZnSe 激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201014.
- [11] Hemming A, Richards J, Davidson A, et al. 99 W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25% duty cycle [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 10062-10069.
- [12] Goodno G D, Book L D, Rothenberg J E, et al. Narrow linewidth power scaling and phase stabilization of 2- $\mu\text{m}$  thulium fiber lasers [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 111608.
- [13] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [14] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and

- amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (19): 18645-18654.
- [15] Zhu J J, Du W B, Zhou P, et al. Numerical study on power limit of single-mode fiber lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(6): 064209.  
朱家健, 杜文博, 周朴, 等. 单模光纤激光极限功率的数值研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(6): 064209.
- [16] Zhu Y D, Zhou P, Zhang H W, et al. Analysis of the power scaling of resonantly pumped Tm-doped silica fiber lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8904: 89040R.
- [17] Smith A V, Smith J J. Mode instability thresholds for Tm-doped fiber amplifiers pumped at 790 nm [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 975-992.
- [18] Jauregui C, Otto H J, Stutzki F, et al. Simplified modelling the mode instability threshold of high power fiber amplifiers in the presence of photodarkening [J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20203-20218.
- [19] Gaida C, Gebhardt M, Heuermann T, et al. Ultrafast thulium fiber laser system emitting more than 1 kW of average power [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5853.
- [20] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, et al. 1-kW, all-glass Tm: fiber laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580: 758016.
- [21] Walbaum T, Heinzig M, Schreiber T, et al. Monolithic thulium fiber laser with 567 W output power at 1970 nm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41 (11): 2632-2635.
- [22] Anderson B M, Solomon J, Flores A. 1.1 kW, beam-combinable thulium doped all-fiber amplifier [J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 1166: 116650B.
- [23] Kotov L V, Aleshkina S S, Khudyakov M M, et al. High-brightness multimode fiber lasers for resonant pumping [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(20): 4540-4546.
- [24] Zhou P, Xiao H, Leng J Y, et al. High-power fiber lasers based on tandem pumping [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34 (3): A29-A36.
- [25] Meleshkevich M, Platonov N, Gapontsev D, et al. 415W single-mode CW thulium fiber laser in all-fiber format [C]//2007 European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference, June 17-22, 2007, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2007.
- [26] Creeden D, Johnson B R, Setzler S D, et al. Resonantly pumped Tm-doped fiber laser with >90% slope efficiency [J]. *Optics Letters*, 2014, 39 (3): 470-473.
- [27] Creeden D, Johnson B R, Rines G A, et al. High power resonant pumping of Tm-doped fiber amplifiers in core-and cladding-pumped configurations [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 29067-29080.
- [28] Wang Y, Yang J L, Huang C Y, et al. High power tandem-pumped thulium-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2991-2998.
- [29] Peng Z L, Ma S C, Lu S H, et al. Numerical simulation and experimental study of gain-switched thulium-doped fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 191404.  
彭昭亮, 马善超, 陆思华, 等. 增益调制掺铥光纤激光器的数值仿真及实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 191404.
- [30] Kelson I, Hardy A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34 (9): 1570-1577.
- [31] Yang W Q, Hou J, Song R, et al. Theoretical analysis of two-stage pumping technology for high power fiber lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60 (8): 084210.  
杨未强, 侯静, 宋锐, 等. 高功率光纤激光器二级抽运技术的理论分析 [J]. *物理学报*, 2011, 60 (8): 084210.
- [32] Parthasarathy T A. Predicted performance limits of yttrium aluminum garnet fiber lasers [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(9): 094302.
- [33] Wang X, Zhou P, Wang X, et al. 102 W monolithic single frequency Tm-doped fiber MOPA [J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 32386-32392.
- [34] Tao M M, Chen H W, Feng G B, et al. Thermal modeling of high-power Yb-doped fiber lasers with irradiated active fibers [J]. *Optics Express*, 2020, 28 (7): 10104-10123.
- [35] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 429-484.
- [36] Lucas E, Lombard L, Jaouën Y, et al. 1 kW peak power, 110 ns single-frequency thulium doped fiber amplifier at 2050 nm [J]. *Applied Optics*, 2014, 53 (20): 4413-4420.
- [37] Brown D C, Hoffman H J. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(2): 207-217.

# Modeling In-band Pumped kW Level High-Power Tm-Doped Fiber Lasers via Simulations

Tao Mengmeng<sup>1,2\*</sup>, Ye Xisheng<sup>1\*</sup>, Ye Jingfeng<sup>2</sup>, Yu Ting<sup>1</sup>, Quan Zhao<sup>1</sup>,  
Qi Yunfeng<sup>1</sup>, Feng Guobin<sup>2</sup>, Chen Weibiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

<sup>2</sup> *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China*

## Abstract

**Objective** Until now, high-power Tm-doped fiber systems at the kW-level output are all laser diode (LD) pumped at 793 nm. However, even with the cross-relaxation process, the operation efficiency at the high-power output for a 793 nm pump is  $\sim 50\%$ , leading to a heat waste comparable with the output and posing severe challenges on heat management and power scaling. In high-power fiber systems, in-band pumping is an effective way to reduce the quantum defect and improve the energy conversion efficiency. For Tm-doped fiber systems, 1.6  $\mu\text{m}$  and 1.9  $\mu\text{m}$  are the two major resonant pump bands. With the 1.6  $\mu\text{m}$  pump, systems with an output  $>400$  W have been demonstrated. However, with a quantum defect of 20%, the operation efficiency of the 1.6  $\mu\text{m}$  pump is  $\sim 60\%$ , indicating that it is not an ideal pump choice for high-power Tm-doped fiber systems. The 1.9  $\mu\text{m}$  pump is recently developed in high-power Tm-doped fiber systems; the extremely high efficiency of this pumping scheme has been experimentally demonstrated with 100-W-level output, manifesting the huge potential for power scaling of Tm-doped fiber systems to high output levels. In this study, the output and thermal characteristics of kW-level Tm-doped fiber amplifiers (TDFAs) are investigated for different pump bands. Moreover, the power scalability of in-band pumped TDFAs is explored under several conditions.

**Methods** Numerical simulations were performed to investigate the output and thermal characteristics. Different laser configurations featuring different pump schemes and active fibers were compared. Active fiber lengths for different laser configurations were optimized before comparison. For power scaling, a rough estimation was made at first. Then, a numerical algorithm with iterative loops for heat load profile and temperature distribution was developed for further investigations. In the simulation, the overall absorption was set as a constant to ensure sufficient absorption of the pump, whereas the doping concentration and the fiber length were varying parameters.

**Results and Discussions** Simulations show that, for the 793 nm pump, owing to the cross-relaxation process, quantum efficiency could reach above 100% (Table 2). However, the overall efficiency remains low, leading to severe heat problems with a heat ratio of 80.8% over the output (Table 3). Besides, the temperatures of the fiber ends remain high (Table 4). For the in-band pump, laser efficiency is significantly improved. At the 1.9  $\mu\text{m}$  pump band, the laser shows a slope efficiency of  $>90\%$  with heat under control (Table 2, Table 3). Further, the maximum temperature of the active fiber remains within 50  $^{\circ}\text{C}$  for low doping concentrations (Table 4). For power scaling, rough estimations present that, with the in-band pump, the power scaling of narrow-linewidth Tm-doped fiber systems is primarily limited by stimulated Brillouin scattering, transverse mode instability, and outer cladding and optical damage (Table 6). Simulations show that the heat load can be remarkably reduced with the in-band pump, thereby eliminating the impact of transverse mode instability; however, challenges due to outer cladding damage and stimulated Brillouin scattering still exist (Figs. 4 and 5). The simulated maximum output for the 1.6  $\mu\text{m}$  and 1.9  $\mu\text{m}$  pump band reaches 5.9 kW and 12.7 kW, respectively, with a fiber core diameter of 25  $\mu\text{m}$  (Table 7).

**Conclusions** Performance and power scalability of resonantly pumped Tm-doped fiber systems are theoretically investigated. Simulations demonstrate that the 1.9  $\mu\text{m}$  resonant pedestal pump provides high-power Tm-doped fiber systems with a high operation efficiency of  $>90\%$ , resulting in a controllable heat waste (within 10% of the output). This limited heat greatly relieves the thermal effects inside the active fiber, eliminating transversal mode instability as a major concern for power scaling of Tm-doped fiber systems. For the widely exploited 25/250 double-clad TDF, the 10-kW-level output is attainable with the 1.9  $\mu\text{m}$  resonant pump.

**Key words** lasers; fiber laser; in-band pump; thermal effects; heat load; power scaling