



## 高功率掺 $Tm^{3+}$ 光纤放大器热效应管理的泵浦方式优化理论研究

张轲, 延凤平, 韩文国, 冯亭

引用本文:

张轲, 延凤平, 韩文国, 等. 高功率掺 $Tm^{3+}$ 光纤放大器热效应管理的泵浦方式优化理论研究[J]. *发光学报*, 2020, 41(7): 839–848.

ZHANG Ke, YAN Feng-ping, HAN Wen-guo, et al. Theoretical Study of Pumping Method of High Power  $Tm^{3+}$ -doped Fiber Amplifier for Thermal Effect Management[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(7): 839–848.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/fgxb20204107.0839>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### [Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup>共掺碲酸盐微结构光纤激光器](#)

Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup>Co-doped Tellurite Microstructure Fiber Lasers

发光学报. 2015, 36(1): 94–98 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153601.0094>

#### [室温条件下掺铥光纤放大器中光波群速减慢的研究](#)

Slowdown of The Group Velocity in Tm<sup>3+</sup>-doped Optical Fiber

发光学报. 2015(3): 328–332 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153603.0328>

#### [应用于2.1 μm激光的Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup>共掺氟碲酸盐微结构光纤研究](#)

Tm<sup>3+</sup>/Ho Co-doped Fluorotellurite Microstructure Fiber for 2.1 μm Lasing

发光学报. 2016, 37(1): 74–80 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163701.0074>

#### [分布式抽运连续光纤激光器研究](#)

Study of Continuous Fiber Laser with Distributed Pump Structure

发光学报. 2016, 37(9): 1071–1075 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163709.1071>

#### [1J高光束质量免水冷脉冲Nd:YAG激光器](#)

High Beam Quality Water-free Pulsed Nd:YAG Laser with Output Energy 1 J

发光学报. 2019, 40(12): 1523–1530 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194012.1523>

文章编号: 1000-7032(2020)07-0839-10

# 高功率掺 $\text{Tm}^{3+}$ 光纤放大器 热效应管理的泵浦方式优化理论研究

张 轲<sup>1</sup>, 延凤平<sup>1\*</sup>, 韩文国<sup>1</sup>, 冯 亭<sup>2\*</sup>

(1. 北京交通大学光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 河北大学物理科学与技术学院 光信息技术创新中心, 河北 保定 071002)

**摘要:** 基于主振荡功率放大器结构的高功率掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器是 2  $\mu\text{m}$  波段高功率光纤激光器的主要实现形式, 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤放大器 (Thulium-doped fiber amplifier, TDFA) 热效应管理的研究对于其输出激光功率的不断提升具有重要意义。本文主要对 TDFA 热效应管理的泵浦方式优化方面进行理论研究, 利用龙格库塔法以及牛顿迭代法求解不同泵浦方式下 TDFA 的稳态速率方程, 并根据热传导方程, 模拟掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤 (Thulium-doped fiber, TDF) 温度沿径向和轴向的分布。结合遗传算法理论, 研究了分段泵浦方式, 经过参数优化, 在功率为 5 W 的 2 020 nm 输入信号光、总功率为 1 000 W 的 793 nm 激光泵浦、TDF 吸收系数为 3.1 dB/m 条件下, 将总长度为 11 m 的 TDF 分为 2.4, 2.2, 2.2, 2.6 m 的 5 段进行泵浦, 得到放大信号激光输出功率为 284.5 W、斜率效率为 28.45%、光纤外包层边界最高温度为 86.28  $^{\circ}\text{C}$  且温度总体分布均匀。与传统前向泵浦、双端泵浦方式下的 TDFA 相比, 其热效应有明显改善。

**关键词:** 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤放大器; 热效应管理; 分段泵浦; 遗传算法

中图分类号: O437 文献标识码: A DOI: 10.37188/fjxb.20204107.0839

## Theoretical Study of Pumping Method of High Power $\text{Tm}^{3+}$ -doped Fiber Amplifier for Thermal Effect Management

ZHANG Ke<sup>1</sup>, YAN Feng-ping<sup>1\*</sup>, HAN Wen-guo<sup>1</sup>, FENG Ting<sup>2\*</sup>

(1. Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education,

Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Photonics Information Innovation Center, College of Physics Science &amp; Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn; wlxyft@hbu.edu.cn

**Abstract:** The high-power thulium ( $\text{Tm}^{3+}$ ) doped fiber laser (TDFL) based on the structure of master oscillator power-amplifier is the main type of 2  $\mu\text{m}$  band high-power fiber lasers. Study on thermal effect management of the thulium doped fiber amplifier (TDFA) stage means a lot to the continuously power-scaling of the TDFL. This paper mainly focuses on the theoretical research on the optimization of the pumping method of TDFA for thermal effect management. We use the Runge-Kutta method and Newton iteration method to solve the steady-state rate equation of TDFA under different pumping methods. And, on the basis of the heat conduction equation, the temperature distributions of  $\text{Tm}^{3+}$  doped fiber (Thulium-doped fiber, TDF) along the radial and axial direction are simulated. Combining with the genetic algorithm theory, the segmentally pumping method is studied. Through optimizing of the relative parameters, using a 2 020 nm input signal light with a power of 5 W, a

收稿日期: 2020-05-03; 修订日期: 2020-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61827818, 61620106014, 61975049)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61827818, 61620106014, 61975049)

total 793 nm laser pump power of 1 000 W and a TDF with an absorption coefficient of 3.1 dB/m and a total length of 11 m which is divided into 5 segments(2.4, 2, 2, 2, 2.6 m), we obtained an amplified signal laser with an output power of 284.5 W and a slope efficiency of 28.45%, and the maximum temperature at the outer cladding boundary of the TDF is only 86.28 °C with a uniform temperature distribution along the whole fiber. Compared with a TDFA using traditional forward pumping or dual-end pumping mode, the thermal effect has been significantly improved.

**Key words:** thulium-doped fiber amplifier; thermal effect management; segmented pump; genetic algorithm

## 1 引 言

2  $\mu\text{m}$  波段掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器 (Thulium-doped fiber laser, TDFL) 的输出波长处于人眼安全波段,并且同时覆盖了多个重要的吸收带,如水的吸收峰和大气窗口等,因此有望被广泛应用于诸多领域,如激光医疗手术、激光雷达和激光大气监测与传感等<sup>[1-3]</sup>。近年来,光纤激光器的输出功率已从几瓦提高至几千瓦量级,大多采用主振荡功率放大器 (Master oscillator power-amplifier, MOPA) 结构<sup>[4-5]</sup>。除种子源激光器外,高功率放大器的性能是决定 MOPA 系统输出功率量级的关键,且随着诸多理论与实验工作的进一步开展,研究发现强烈的热效应是限制高功率光纤放大器输出功率进一步提升的主要因素之一。然而,目前关于 2  $\mu\text{m}$  波段掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤放大器 (Thulium-doped fiber amplifier, TDFA) 热效应管理的理论研究报道还比较少。双包层掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤 (Thulium-doped fiber, TDF) 增益介质本身的表面积与体积比很大,散热性能良好。但是,对于上千瓦量级的 TDFA,其泵浦光转化为信号光时量子亏损引起强烈的热效应,从而引起光纤热透镜效应、应力和折射率变化等问题<sup>[6]</sup>。此外,热效应还会严重影响激光输出特性,如输出波长不稳定、转换效率下降、光束质量变差、噪声高等。因此,研究高功率 TDFA 的热效应管理问题对其整体性能的提升有着重要意义<sup>[5-6]</sup>。

目前,对于高功率光纤放大器热效应的研究主要集中在三个方面<sup>[6]</sup>:增益光纤制作质量提升、泵浦优化及外部散热辅助,研究也多以 1  $\mu\text{m}$ 波段的掺镱光纤放大器为主<sup>[7-14]</sup>。其中,以泵浦方式及泵浦源选择研究为主的泵浦优化方面可以开展大量的实验与理论研究工作。对

于 TDFA,常用 793 nm 的半导体激光器 (Laser diode, LD) 作为 TDF 的泵浦源,而由于 793 nm ~ 2  $\mu\text{m}$  之间的量子亏损比较大,这种泵浦方式可实现的最高斜率效率为 60%,泵浦源产生的热沉积成为限制其输出功率进一步提升的主要原因<sup>[15-16]</sup>。研究者们尝试使用其他波段激光泵浦 TDF,用于实现更高的输出功率。2007 年, Melleshkevich 等利用中心波长为 1 500 nm 附近的钕镱共掺光纤激光器作为泵浦源,获得了中心波长为 1 940 nm、功率为 415 W 的连续激光输出<sup>[17]</sup>;2014 年,Creeden 等利用中心波长为 1 908 nm 的 TDFL 泵浦掺铽光纤获得中心波长为 1 993 nm、功率为 123 W 的连续激光输出<sup>[18]</sup>。但是,特殊波长的高功率泵浦源的获取是非常大的难题,对于 2  $\mu\text{m}$  波段 TDFA 的实现,目前仍以高功率 793 nm 的 LD 泵浦为主。可见,在泵浦方式方面开展研究工作,是目前高功率 TDFA 热效应管理中泵浦优化的主要途径。

本文主要针对高功率 TDFA 的分段泵浦方式进行理论建模和仿真研究,采用龙格库塔法以及牛顿迭代法求解出耦合速率方程,并根据热传导方程得出 TDF 的径向和轴向温度分布,再结合遗传算法理论对分段泵浦的每段泵浦功率及长度做出优化选择。以 5 段泵浦为例,在得到 TDFA 较高转换效率的同时实现 TDF 最高温度满足实际需要且整体光纤温度均匀分布。

## 2 理论模型与方法

### 2.1 泵浦方案和理论模型

图 1 为  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_4$  泵浦方案的能级跃迁示意图。该泵浦方案对应于 800 nm 的吸收峰,泵浦源通常使用中心波长为 793 nm 的 LD 激光器。

在  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_4$  的跃迁方式下得到双包层 TDFA 的稳态速率方程为<sup>[19-20]</sup>:

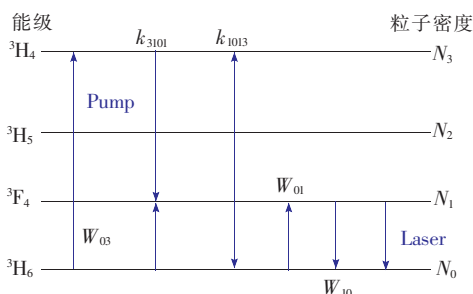


图 1  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_4$  能级跃迁示意图

Fig. 1 Schematic diagram of  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_4$  energy level transition

$$\begin{cases} \frac{dN_0}{dt} = -(W_{01} + W_{03})N_0 + \frac{N_1}{\tau_1} + W_{10}N_1 + \frac{N_3}{\tau_3} \\ \frac{dN_1}{dt} = W_{01}N_0 - \left(\frac{1}{\tau_1} + W_{10}\right)N_1 + 2G + \beta_{31}\frac{N_3}{\tau_3}, \\ \frac{dN_3}{dt} = W_{03}N_0 - \frac{1}{\tau_3}N_3 - G \\ N = N_0 + N_1 + N_3 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\tau_i$  为能级  $i$  的寿命;  $N$  为总的离子数浓度;  $G$  为交叉弛豫因子;  $W_{03}$ 、 $W_{10}$ 、 $W_{01}$  分别为基态泵浦吸收系数、 $2 \mu\text{m}$  激光受激发射系数和受激吸收系数, 它们可分别表示为:

$$\begin{cases} G = k_{3101}N_3N_0 - k_{1013}N_1^2, \\ W_{03} = \frac{\lambda_p \Gamma_p}{hcA} \sigma_\alpha(\lambda_p) [P_p^+(z) + P_p^-(z)] \\ W_{10} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA} \sigma_e(\lambda_s) [P_s^+(z) + P_s^-(z)], \\ W_{01} = \frac{\lambda_s \Gamma_s}{hcA} \sigma_\alpha(\lambda_s) [P_s^+(z) + P_s^-(z)] \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\lambda_p$ 、 $\lambda_s$  分别为泵浦光和信号光的波长,  $\Gamma_p$

和  $\Gamma_s$  为泵浦光和信号光的重叠因子,  $h$  为普朗克常量,  $c$  为光速,  $k_{ijkl}$  表示能级  $i$  到能级  $j$  和能级  $k$  到能级  $l$  的能量转移系数。  $\sigma_e(\lambda_p)$ 、 $\sigma_\alpha(\lambda_p)$ 、 $\sigma_e(\lambda_s)$ 、 $\sigma_\alpha(\lambda_s)$  分别为泵浦光的发射和吸收截面、 $2 \mu\text{m}$  激光的发射和吸收截面;  $P_p^+(z)$  和  $P_s^+(z)$  分别为前、后向泵浦光功率和前、后向信号光功率, 忽略 SBS 效应的影响, 可分别表示为:

$$\begin{cases} \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \\ \mp [\Gamma_p(\sigma_\alpha(\lambda_p)N_0 + \sigma_e(\lambda_p)N_1) + \delta_p] P_p^\pm(z), \\ \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \\ \pm [\Gamma_s(\sigma_e(\lambda_s)N_1 - \sigma_\alpha(\lambda_s)N_0) + \delta_s] P_s^\pm(z) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\delta_p$  和  $\delta_s$  分别为泵浦光和  $2 \mu\text{m}$  激光的本征吸收系数, 正、负号分别表示沿光纤的正、反方向。

分段泵浦示意图如图 2 所示, 其中  $P_{s1}^+(0)$  为种子光功率。公式(4)为满足分  $n$  段的泵浦边界方程:

$$\begin{cases} P_{pm}^+(0) = (1 - \mu) P_{p(m-1)}^+(L) + p_{m-1}^+ \\ P_{pm}^+(L) = (1 - \mu) P_{p(m+1)}^-(0) + p_m^- \\ P_{sm}^+(0) = (1 - \eta) P_{s(m-1)}^+(L) \\ P_{sm}^-(L) = (1 - \eta) P_{s(m+1)}^-(0) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $P_{pm}^+(0)$ 、 $P_{pm}^-(L)$ 、 $P_{sm}^+(0)$ 、 $P_{sm}^-(L)$  分别为第  $m$  段的前、后向泵浦光与信号光功率。  $p_m^+$  和  $p_m^-$  分别是第  $m$  段前、后向注入泵浦光功率,  $\mu$  为泵浦点泵浦光的泄露比率, 取 0.123;  $\eta$  为前、后向激光在经过泵浦点时的损耗比率, 取 0.01; 下标  $m$  表示相应的光纤段序数。

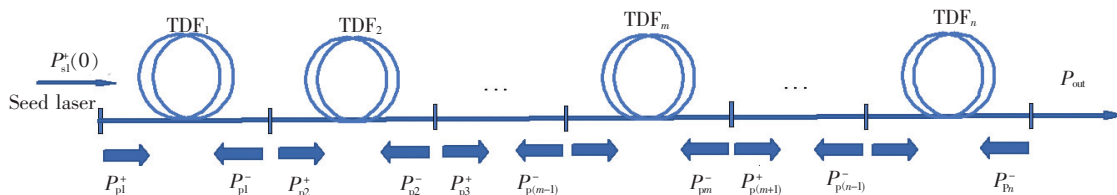


图 2 TDFAs 分段泵浦示意图

Fig. 2 Schematic diagram of segmentally pumped TDFAs

## 2.2 温度分布和理论模型

TDFAs 中的大部分热量是吸收泵浦光时量子亏损引起的, 其在光纤径向的热传导方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\partial T}{\partial r} \right] = - \frac{Q}{k}, \quad (5)$$

其中  $r$  为光纤径向方向坐标,  $k$  为热传导系数,  $Q$  为热功率密度。假设 TDF 的纤芯半径为  $r_0$ , 内包层半径为  $r_1$ , 外包层半径为  $r_2$ 。将热传导方程与光纤温度分布的边界条件结合, 得到 TDF 中径向温度分布:

$$\begin{cases} T_0(r) = T_0 - \frac{1}{4} \frac{Qr^2}{k} \\ T_1(r) = T_0 - \frac{Qr_0^2}{4k} - \frac{Qr_0^2}{2k} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \\ T_2(r) = T_0 - \frac{Qr_0^2}{4k} - \frac{Qr_0^2}{2k} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) - \frac{Qr_0^2}{k} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \end{cases}, \quad (6)$$

其中,  $T_0(r)$ 、 $T_1(r)$ 、 $T_2(r)$  分别为纤芯、内包层、外包层中坐标  $r$  处的温度, 且有  $T_0 = T_0(0)$ 。单位体积内泵浦功率密度及纤芯轴向温度可分别表示为:

$$Q(z) = \frac{\beta_p \eta_h [P_p^+(z) + P_p^-(z)]}{\pi r_0^2}, \quad (7)$$

$$T_0(z) = T_c + \frac{Qr_0^2}{2Hr_2} + \frac{Qr_0^2}{4k} + \frac{Qr_0^2}{2k_2} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{Qr_0^2}{2k} \ln\left(\frac{r_2^2}{r_1^2}\right), \quad (8)$$

其中,  $\beta_p$  为泵浦吸收系数,  $H$  为对流传热系数,  $T_c$  为环境温度或制冷温度, 且若只考虑量子亏损产生的热量时,  $\eta_h = (\lambda_s - \lambda_p) / \lambda_s$ 。

### 2.3 理论方法

龙格库塔法配合牛顿迭代法可求解两点边值问题的微分方程组, 在计算分段泵浦的速率方程时可以将多点边值问题转换为两点问题。基本思路是: 假设存在 3 个泵浦点, 分别位于  $z=0$ 、 $z=kL$ 、 $z=L$  处, 其中  $L$  为光纤长度; 将泵浦点 1 和 2 之间的区间通过线性坐标变换  $z = z_1/k_1$  由  $[0, k_1L]$  换成  $[0, L]$ , 泵浦点 2 和 3 之间光纤通过线性变化同样由  $[0, k_2L]$  变为  $[0, L]$ ,  $k_1$ 、 $k_2$  分别为两段光纤与整段光纤的长度比, 则分别有  $dz_1 = k_1Ldz$  和  $dz_2 = k_2Ldz$ 。这样就可将三点边值问题转换为两点边值问题<sup>[21]</sup>。使用 MATLAB 进行数值仿真, 计算中所用到的各个参数的选取如表 1 所示。

基于表 1 中的参数, 对于 TDFA, 图 3 给出了前向泵浦方式下, 泵浦功率为 1 000 W、信号光功率为 5 W、纤芯掺杂浓度  $N = 2.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$  时光纤径向温度分布以及光纤外包层边界 ( $r = 200 \mu\text{m}$ ) 处温度沿光纤轴向的分布情况。从图 3(a) 中可以看出, TDF 中纤芯与外包层外侧处温差为 20 °C, 而纤芯与外包层外侧正常工作所允许的最高温度分别为 700 °C 与 200 °C, 故外包层外侧的温度为主要的限制因素。从图 3(b) 中可以看出,

泵浦端的外包层外侧温度为 693.21 °C, 远高于 200 °C, 所以在高功率 TDFA 中需要进行热管理。

表 1 数值模型中各个参数的取值<sup>[19]</sup>

Tab. 1 Value of each parameter in the numerical model<sup>[19]</sup>

$\lambda_p/\text{nm}$	$\lambda_s/\text{nm}$	$h/(\text{J} \cdot \text{s})$	$\tau_1/\mu\text{s}$
793	2 020	$6.63 \times 10^{-34}$	340
$k_{3101}/(\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$	$k_{1013}$	$\beta_{31}$	$\sigma_\alpha(\lambda_p)/\text{m}^2$
$3 \times 10^{-23}$	$0.084k_{3101}$	0.72	$5 \times 10^{-25}$
$\sigma_e(\lambda_p)/\text{m}^2$	$\sigma_\alpha(\lambda_s)/\text{m}^2$	$\sigma_e(\lambda_s)/\text{m}^2$	$\Gamma_p/\text{m}^2$
$2.5 \times 10^{-25}$	$10^{-26}$	$2.5 \times 10^{-25}$	0.896 4
$\Gamma_s$	$\delta_p$	$\delta_s$	$k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
0.752	0.012	0.002 3	1.33
$H/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$r_0/\mu\text{m}$	$r_1/\mu\text{m}$	$r_2/\mu\text{m}$
50	15	125	200

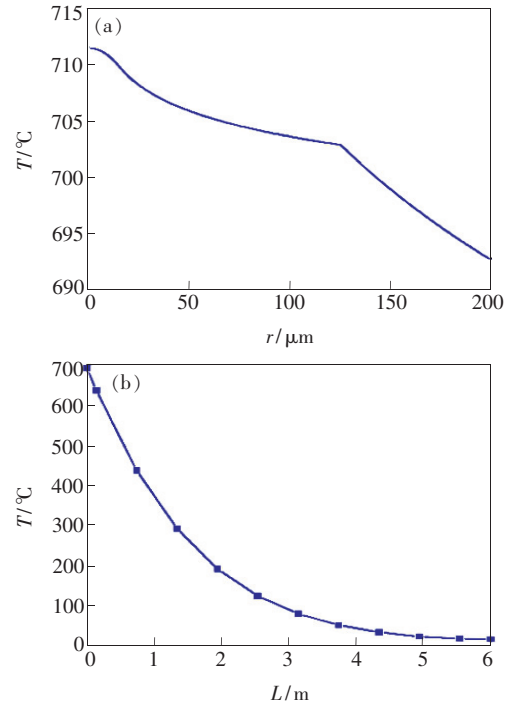


图 3 TDF 中温度沿光纤径向分布(a)与轴向分布(b)

Fig. 3 Radial distribution(a) and axial distribution(b) of temperature in TDF

## 3 分段泵浦仿真分析与优化

### 3.1 泵浦方式对比及分析

本文仿真中参数设置为低掺杂浓度掺杂  $\text{Tm}^{3+}$  的交叉弛豫系数, 所以得到的斜率效率比较低, 但是对应的量子亏损更大, 产生的热效应也就更为明显, 得到的仿真结果更适用于一般情况, 更有助

于说明分段泵浦方式热效应管理的优势。当采用前向泵浦方式, 泵浦光功率为 1 000 W、信号光功率为 5 W 时, 转化斜率效率与交叉弛豫系数关系如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 斜率效率随着交叉弛豫系数的增大而增大, 这是因为增强交叉弛豫过程会增加量子转换效率。

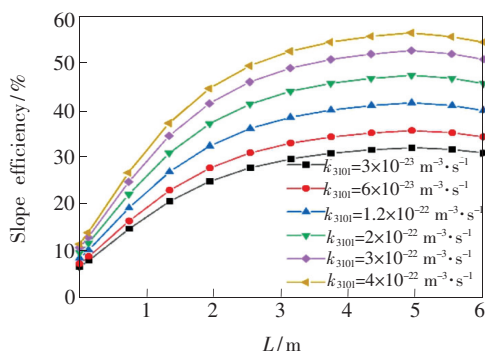


图 4 交叉弛豫系数对斜率效率的影响

Fig.4 Effect of cross-relaxation coefficient on slope efficiency

基于表 1 中的仿真参数, 对于 TDFA, 图 5 给出了在总泵浦功率为 1 000 W 条件下, 2 020 nm 种子源信号光功率为 5 W、纤芯掺杂浓度  $N = 2.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$  时, 分别在前向泵浦、双端泵浦、分段泵

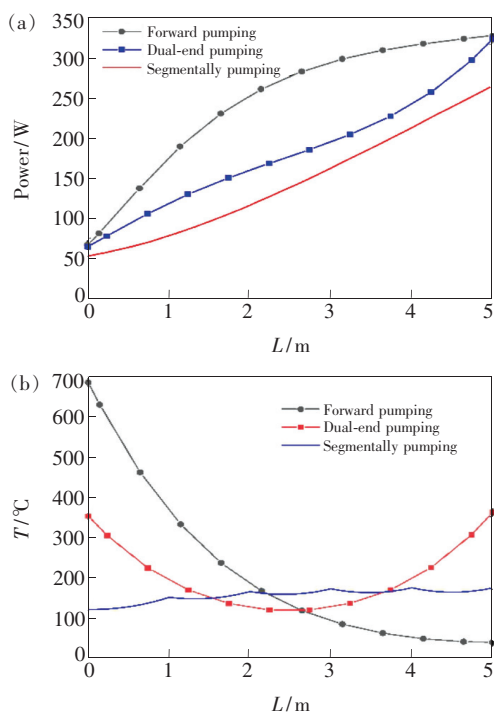


图 5 不同泵浦方式下 TDF 中信号光功率(a)与外包层边界温度(b)沿光纤轴向分布

Fig.5 Distribution of signal laser power(a) and outer cladding boundary temperature(b) along the TDF under different pumping methods

浦(5 段)3 种泵浦方式下, TDF 中放大信号光功率及光纤外包层边界( $r = 200 \mu\text{m}$ )处温度沿光纤轴向分布情况。其中, 3 种情况下 TDF 长度均为 5 m。

从图 5(a)中可以看出, 在光纤长度相同时, 3 种泵浦方式在光纤末端处的放大信号光功率分别为 326.68, 322.71, 264.73 W, 其中前向泵浦的信号光功率最大, 其次为双端泵浦, 分段泵浦的信号光功率最低。造成这种情况的原因主要有两个: 一是泵浦光转化效率不同, 因为在不同的泵浦方式下光纤的最佳长度不一样, 存在光纤长度过短时泵浦光未被完全吸收现象; 二是分段泵浦的泵浦光以及产生激光受每段泵浦点的耦合效率以及传输效率的影响, 即泵浦点越多, 泵浦光以及信号光损耗的功率就越多。由图 5(b)可以明显看出, 在不考虑外部散热条件下, 在传统前向泵浦及双端泵浦方案中, 当泵浦光总功率达到千瓦级别时, TDF 外包层边界最高温度分别为 693.21 °C 和 360.71 °C。但一般双包层 TDF 外包层外起保护作用的涂覆层在温度达到 200 °C 时就会被烧毁。分段泵浦的最高温度为 173.29 °C, 而且整体分布均匀, 可以达到 TDF 工作时涂覆层对于温度的要求。由此可见, 采用分段泵浦的方式可以大大降低光纤外包层边界的温度并且使温度大致均匀地分布在光纤中。另外, 前向、双端、分段泵浦的斜率效率分别为 32.68%、32.27%、26.47%, 可见采用分段泵浦斜率效率下降了 6% 左右。这有望通过进一步分析得到分段泵浦的最佳光纤长度后得以改善, 而且在提高斜率效率的同时, 有望进一步减小泵浦光在每个泵浦点的沉积从而降低光纤中的最高温度。

### 3.2 泵浦吸收系数分析

除光纤长度外, 从公式(7)、(8)可以看出, 光纤工作温度也与平均泵浦吸收系数  $\beta_p$  密切相关, 长度为  $L$  的 TDF 光纤的  $\beta_p$  可以定义为:

$$\beta_p = \frac{1}{2L} \left[ \lg \frac{P_p(0)}{P_p(L)} + \lg \frac{P_p(L)}{P_p(0)} \right] \times 10, \quad (9)$$

双端泵浦可以看作一种特殊分段泵浦方式, 故以双端泵浦为例, 找到兼顾激光器输出性能以及温度的最佳泵浦吸收系数, 为接下来分析分段泵浦提供数据依据。在总泵浦功率为 1 000 W (前、后向分别为 500 W) 条件下, 泵浦吸收系数为 3.1

dB/m 时,泵浦光及放大信号光功率分布及信号光输出功率与光纤总长度的关系分别如图 6(a)、(b)所示。

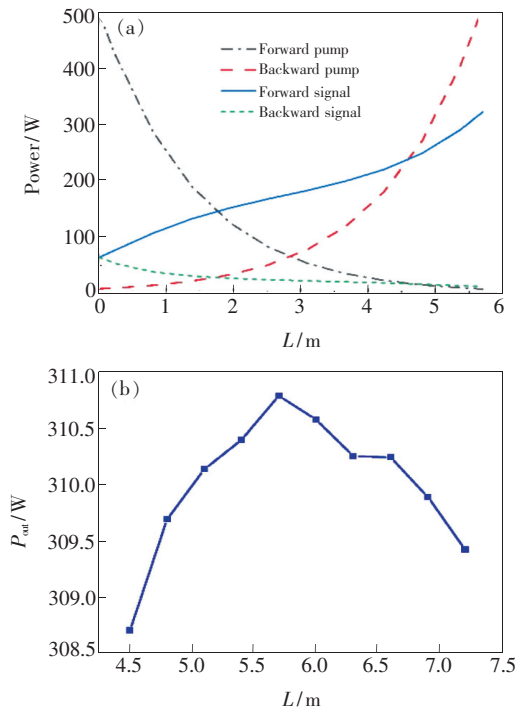


图 6 (a) 双端泵浦方式下 TDF 中各功率成分分布图; (b) 输出功率与光纤长度关系。

Fig. 6 (a) Distribution of each power component in the TDF under dual-end pumping mode. (b) Relationship between laser output power and fiber length used.

由于双端泵浦方式下增益光纤两端都有泵浦源,所以当光纤长度一定时,信号光功率在光纤上的分布整体呈增长趋势,无法直观判断出最优光纤长度,需要通过比较不同长度的光纤后才能得出结果。如图 6(b)所示,在泵浦吸收系数为 3.1 dB/m 时,光纤最优长度为 5.75 m,其他泵浦吸收系数及其对应的最优光纤长度研究方法与此相同。

光纤最优长度与泵浦吸收系数的关系及光纤最优长度时对应的放大信号激光输出功率、光纤外包层边界最高温度及平均温度与泵浦吸收系数的对应关系如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出,随着泵浦吸收系数的增大,光纤最优长度减小。图 7(b)、(c)显示,在利用图 7(a)中得到的  $\beta_p$  对应的最优光纤长度时,随着  $\beta_p$  增大,放大信号激光的输出功率逐渐增大,光纤的最高温度及平均温度也逐渐升高。当  $\beta_p \geq 3.1$  dB/m 时,信号输出功率增加逐渐趋于平缓,斜率效率大于 32% 且不

再明显增加,但此时光纤的温度依然处于线性升高状态,所以此时不应过于追求增加斜率效率。由双端泵浦可以得出  $\beta_p = 3.1$  dB/m 为泵浦吸收系数的最佳取值,以此为条件来提高分段泵浦的斜率效率。

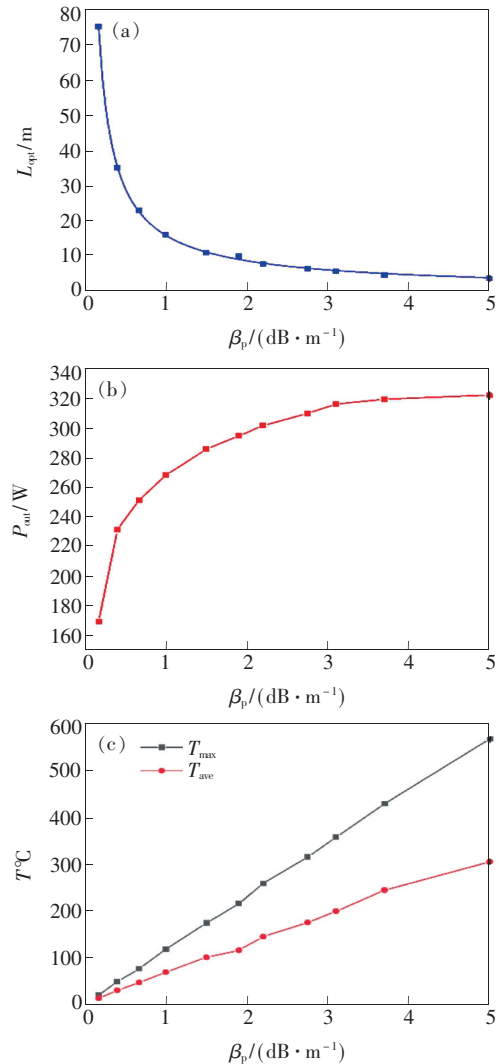


图 7 光纤最优长度(a)、激光输出功率(b)、TDF 外包层边界最高温度与平均温度(c)与泵浦吸收系数的对应关系。

Fig. 7 Correspondence between the optimized fiber length (a), laser output power(b), maximum temperature and average temperature at TDF's outer cladding boundary (c) and pump absorption coefficient of TDF.

### 3.3 分段泵浦分析

由以上分析可知,分段泵浦存在一个最佳光纤长度使得光光转换效率最高并且可以减小泵浦光的沉积。图 8 表示了总泵浦功率为 1 000 W、泵浦吸收系数为 3.1 dB/m 条件下,分

段泵浦的 TDFA 中放大信号激光输出功率, 以及光纤外包层边界最高温度随光纤长度变化的趋势。图中 3 条曲线分别表示分段数为 4, 5, 6 时的情况, 其中每段的光纤长度、注入的泵浦光功率都相等。

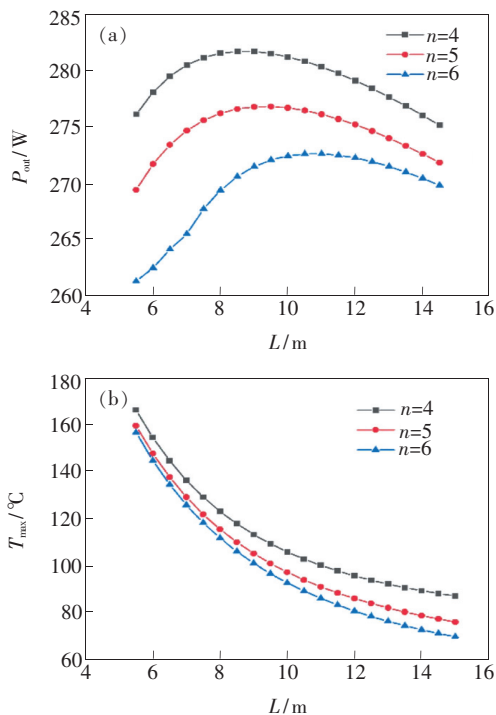


图 8 分段泵浦方式下, 激光输出功率(a)与 TDF 外包层边界最高温度(b)随使用 TDF 光纤长度的变化关系。

Fig. 8 Relationship between the laser output power (a), maximum temperature at TDF's outer cladding boundary(b) and the length of TDF used under segmentally pumping method.

从图 8(a) 可以看出, 随着光纤长度的增加, 信号光的输出功率逐渐增大, 达到最大功率后逐渐下降, 存在一个最佳长度。逐渐增大对应泵浦光转换为信号光的过程, 再减小是由于光纤过长时信号光会被吸收而在其他波段产生自发辐射。经过计算可知, 3 种分段方式下, 最佳长度分别为 8.5, 9.6, 11.1 m, 而且可以发现段数越多, 最佳长度越长, 这是因为泵浦点越多就需要更长的光纤来吸收泵浦光; 同时可以看出, 随着分段数的增加, TDFA 信号光的最大功率逐渐减小, 分段数为 4, 5, 6 时对应的最大信号功率分别为 281.64, 276.78, 272.61 W。这是因为每个泵浦点处泵浦光并不能完全耦合入光纤中, 即耦合效率不是 100%, 存在泵浦光损耗的因素。其次, 在分段光

纤熔接处, 即使熔接质量很好, 也会存在一定程度的激光泄露。功率损耗会随着分段数进行叠加, 分段越多, 损耗越大。所以在光纤温度处于正常时, 在满足功率输出要求下, 尽可能采取分段少的方式进行热管理。图 8(b) 表明随着光纤长度的增加, 光纤最高温度逐渐降低, 这也验证了之前关于光纤过短时泵浦光在泵浦点累积导致光纤最高温度升高的观点。

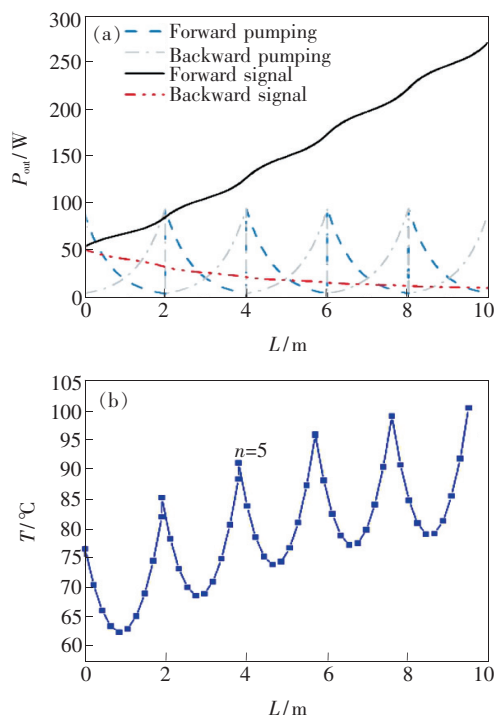


图 9 未优化时, 分段泵浦方式下, 各功率成分(a)与 TDF 外包层边界温度(b)沿光纤轴向分布图。

Fig. 9 Distribution of each power component(a) and temperature at TDF's outer cladding boundary(b) along the TDF under segmentally pumping method without optimization

接下来以 5 段泵浦方式为例, 分析其在最佳泵浦吸收系数以及最佳光纤长度下功率与温度的分布。图 9 为泵浦光与信号光以及光纤温度在  $\beta_p = 3.1$  dB/m 对应的最佳长度时沿光纤的轴向分布。图 9(a) 表明信号光的输出功率为 276.78 W, 大于未在最优长度时的 264.73 W, 斜率效率为 27.6%, 相比其他泵浦方式只下降 5%。从图 9(b) 中可以看出光纤最高温度为 100.28  $^{\circ}\text{C}$ , 低于未在最优长度时的 173.29  $^{\circ}\text{C}$ 。但是可以发现光纤每段的最高温度分布不均匀, 最大为 100.28  $^{\circ}\text{C}$ , 最小为 76.45  $^{\circ}\text{C}$ , 这主要是因为泵浦光功率分布未优化, 泵浦光沉积现象依然存在。



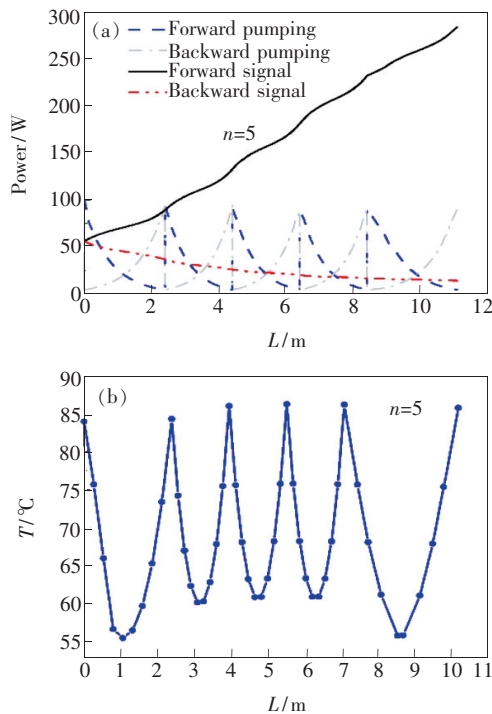


图 10 优化后,分段泵浦方式下,各功率成分(a)与 TDF 外包层边界温度(b)沿光纤轴向分布图。

Fig. 10 Distribution of each power component (a) and temperature at TDF's outer cladding boundary (b) along the TDF under segmentally pumping method after optimization

### 3.4 温度分布优化

由公式(7)、(8)可以看出在  $\eta_h$  不变时,解决温度分布不均匀的主要方法有对分段光纤设置非均匀的泵浦吸收系数、不同的泵浦光功率、光纤长度等。本文主要通过对每段光纤设置不同的泵浦光功率以及光纤长度来达到温度分布均匀的目的。具体方法为:使用遗传算法同时对光纤长度和泵浦光功率进行选择,在实现温度均匀分布的同时获得较大的斜率效率。其基本方法为:设置优化参数  $L_i, P_{p,i}^+, P_{p,i}^-$ ,  $i = 1, 2, \dots, n, P_{p,i-1}^- = P_{p,i}^+$ , 即前后相邻的泵浦光功率设置相等;  $n$  是光纤段数,  $L_2 = L_3 = \dots = L_{n-1}$ , 除首尾两端外,中间分段光纤的长度相同,这是因为首尾端的光纤要充分吸收前向、后向泵浦功率。遗传算法的目标函数为参数优化后最终要达到的目的,其定义为:

### 参 考 文 献:

[1] 龙井宇,白晋涛,任兆玉,等. 2  $\mu\text{m}$  掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤激光器的泵浦效率分析和研究进展 [J]. 激光杂志, 2009,

$$- \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_{\text{ave}})^2 \right]^{1/2} - \frac{1}{P_{\text{out}}}, \quad (10)$$

其中,  $T_i$  为光纤每段中最高温度,  $T_{\text{ave}}$  为每段的平均温度,  $P_{\text{out}}$  为输出功率。目标函数的第一部分为光纤中最高温度的标准方差,第二部分为输出功率的倒数;遗传算法优化时采用搜索目标函数最大值机制,所以取两项的相反数,同时满足得到最小标准方差和最大输出功率的结果,实现温度的均匀分布及获得较高的斜率效率。对分 5 段泵浦的情况进行优化计算得到结果为  $L_1 = 2.4 \text{ m}$ ,  $L_5 = 2.6 \text{ m}$ , 其他分段长度为 2 m, 总长 11 m。泵浦功率设置分别为  $P_{p,1}^+ = 115 \text{ W}$ ,  $P_{p,5}^- = 89 \text{ W}$ ,  $P_{p,1}^- = P_{p,2}^+ = 108 \text{ W}$ ,  $P_{p,2}^- = P_{p,3}^+ = 100 \text{ W}$ ,  $P_{p,3}^- = P_{p,4}^+ = 94 \text{ W}$ ,  $P_{p,4}^- = P_{p,5}^+ = 96 \text{ W}$ 。

TDF 中各功率成分和外包层边界温度沿光纤轴向分布分别如图 10(a)、(b)所示。可得 TDF 的输出功率为 284.5 W, 斜率效率 28.45%, 相比单向及双端泵浦方式仅下降了 4%。但光纤中最高温度仅为 86.28 °C, 且每段最高温度间最大差值仅为 1.97 °C, 实现了温度的均匀分布, 并且与优化前相比降低了光纤最高工作温度。

## 4 结 论

本文对基于分段泵浦的高功率 TDF 热效应管理进行理论研究, 利用龙格库塔法以及牛顿迭代法求解不同泵浦方式下 TDF 的稳态速率方程, 并根据热传导方程, 模拟 TDF 温度沿径向和轴向的分布, 通过对比得出分段泵浦对于热效应管理的优势。结合遗传算法理论, 以 5 段泵浦为例, 经过参数优化, 当给定功率为 5 W 的种子光输入时, 将吸收系数为 3.1 dB/m、总长度为 11 m 的 TDF 分为 2.4, 2, 2, 2, 2.6 m 的 5 段进行泵浦, 在总功率为 1 000 W 的 793 nm 激光泵浦下, 得到激光输出功率为 284.5 W, 斜率效率为 28.45%。光纤外包层边界最高温度为 86.28 °C 且温度总体分布均匀, 总体热效应较传统前向泵浦、双端泵浦以及未优化前的分段泵浦 TDF 均有明显改善。本文的研究工作及研究方法为 2  $\mu\text{m}$  波段高功率 TDF 的热效应管理及功率的进一步提升提供了重要的研究基础。

- 30(4):1-3.
- LONG J Y, BAI J T, REN Z Y, *et al.*. Pumping efficiency analysis and progress of 2  $\mu\text{m}$   $\text{Tm}^{3+}$  doped silica fiber lasers [J]. *Laser J.*, 2009, 30(4):1-3. (in Chinese)
- [ 2 ] MA Q L, BO Y, ZONG N, *et al.*. Light scattering and 2  $\mu\text{m}$  laser performance of Tm: YAG ceramic [J]. *Opt. Commun.*, 2011, 284(6):1645-1647.
- [ 3 ] WANG X, ZHOU P, ZHANG H W, *et al.*. 100 W-level Tm-doped fiber laser pumped by 1 173 nm Raman fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(15):4329-4332.
- [ 4 ] 刘江, 刘晨, 师红星, 等. 342 W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器 [J]. *物理学报*, 2016, 65(19):194209-1-5.
- LIU J, LIU C, SHI H X, *et al.*. 342 W narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2016, 65(19):194209-1-5. (in Chinese)
- [ 5 ] 胡志涛, 何兵, 周军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8):080002-1-10.
- HU Z T, HE B, ZHOU J, *et al.*. Research progress in thermal effect of high power fiber lasers [J]. *Laser Optoelectron. Progr.*, 2016, 53(8):080002-1-10. (in Chinese)
- [ 6 ] 王郡婕, 冯晓强, 冯选旗, 等. 掺铥双包层光纤激光器的热效应分析和实验研究 [J]. *激光杂志*, 2013, 34(1):4-6.
- WANG J J, FENG X Q, FENG X Q, *et al.*. Thermal effect and experimental research for  $\text{Tm}^{3+}$ -doped double-clad fiber laser [J]. *Laser J.*, 2013, 34(1):4-6. (in Chinese)
- [ 7 ] WANG Y, XU C Q, PO H. Thermal effects in kilowatt fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, 16(1):63-65.
- [ 8 ] WANG Y. Heat dissipation in kilowatt fiber power amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, 40(6):731-740.
- [ 9 ] HE X L, LIAO L, ZHANG F F, *et al.*. Analysis of laser efficiency and thermal effects in kilowatt fiber lasers based on distributed side-coupled fibers [J]. *Opt. Eng.*, 2018, 57(9):096108-1-12.
- [ 10 ] 楼祺洪, 周军, 漆云凤, 等. 千瓦级双包层光纤激光器冷却方案设计理论和实验研究 [J]. *物理学报*, 2008, 57(8):4966-4971.
- LOU Q H, ZHOU J, QI Y F, *et al.*. Theoretical and experimental research on cooling scheme design of kilowatt double-clad fiber laser [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2008, 57(8):4966-4971. (in Chinese)
- [ 11 ] 薛冬, 周军, 楼祺洪, 等. 高功率双包层光纤激光器热效应及功率极限 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(7):1013-1018.
- XUE D, ZHOU J, LOU Q H, *et al.*. Thermal effect and power limit in high power double-clad fiber laser [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2009, 21(7):1013-1018. (in Chinese)
- [ 12 ] 陈金宝, 曹润秋, 潘志勇, 等. 全国产分布式侧面抽运光纤激光器实现千瓦输出 [J]. *中国激光*, 2015, 42(2):0219002.
- CHEN J, CAO J Q, PAN Z Y, *et al.*. Nationally produced distributed side pumped fiber lasers to achieve kilowatt output [J]. *Chin. J. Lasers*, 2015, 42(2):0219002. (in Chinese)
- [ 13 ] 陈爽, 冯莹. 高功率光子晶体光纤激光器温度分布研究 [J]. *光子学报*, 2008, 37(6):1134-1138.
- CHEN S, FENG Y. Temperature distribution in high power photonic crystal fiber laser [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2008, 37(6):1134-1138. (in Chinese)
- [ 14 ] 代守军, 何兵, 周军, 等. 高功率散热技术及高功率光纤激光放大器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(5):13-18.
- DAI S J, HE B, ZHOU J, *et al.*. Cooling technology of high-power and high-power fiber laser amplifier [J]. *Chin. J. Lasers*, 2013, 40(5):13-18. (in Chinese)
- [ 15 ] TANG Y L, LI F, XU J Q. High peak-power gain-switched  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2011, 23(13):893-895.
- [ 16 ] WANG Y, YANG J L, HUANG C Y, *et al.*. High power tandem-pumped thulium-doped fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(3):2991-2998.
- [ 17 ] MELESHKEVICH M, PLATONOV N, GAPONTSEV D, *et al.*. 415 W single-mode CW thulium fiber laser in all-fiber format [C]. *Proceedings of 2007 European Conference on Lasers and Electro-Optics and The International Quantum Electronics*

*Conference, Munich, Germany, 2007*:1.

- [18] 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]. *Opt. Express*, 2014, 22(23):29067-29080.
- [19] 黎大军, 杜戈果, 闫培光. LD 泵浦掺铥( $\text{Tm}^{3+}$ )光纤激光器的数值分析 [J]. *应用光学*, 2007, 28(4):439-444.  
LI D J, DU G G, YAN P G. Numerical analysis of  $\text{Tm}^{3+}$ -doped silica fiber lasers pumped by LD [J]. *J. Appl. Opt.*, 2007, 28(4):439-444. (in Chinese)
- [20] JACKSON S D, KING T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(5):948-956.
- [21] 欧攀, 贾豫东, 白明, 等. 高等光学仿真: MATLAB 版: 光波导·激光 [M]. 第 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014:7.  
OU P, JIA Y D, BAI M, *et al.*. *Advanced Optical Simulation; MATLAB Version; Optical Waveguide · Laser* [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2014:7. (in Chinese)



张轲(1995-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 2017 年于中国石油大学(华东)获得学士学位, 主要从事  $2\ \mu\text{m}$  波段光纤激光器方面的研究。  
E-mail: 17120162@bjtu.edu.cn



冯亭(1986-), 男, 河北张家口人, 博士, 副教授, 2014 年于北京交通大学获得博士学位, 主要从事光纤激光、光纤传感器及其应用等方面的研究。  
E-mail: wlxyft@hbu.edu.cn



延凤平(1966-), 男, 山西兴县人, 博士, 教授, 1996 年于北方交通大学获得博士学位, 主要从事光纤激光器、光纤传感器、光纤通信、基于太赫兹超材料等方面的研究。  
E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn