

# 增益调制掺铥光纤激光器的数值仿真及实验研究

彭昭亮, 马善超, 陆思华, 罗长飞, 张宝夫\*, 焦中兴\*\*

中山大学物理学院, 广东 广州 510275

**摘要** 对增益调制掺铥光纤激光器展开了系统性探究, 基于速率方程与传输方程构建了增益调制掺铥光纤激光振荡器和放大器的数值模型, 并通过时域有限差分法进行求解, 从理论和实验上探究了不同的泵浦光及激光器结构参数下输出的  $2\ \mu\text{m}$  激光特性。通过数值仿真和实验优化, 获得了高转换效率、窄线宽、单一偏振的  $2\ \mu\text{m}$  波段纳秒激光输出。种子源振荡器获得了最大功率为 796 mW、脉宽为 67.9 ns、斜效率为 54.4% 的脉冲激光; 在一级放大器后得到了最大功率为 9.13 W、脉宽为 50.5 ns 的  $2\ \mu\text{m}$  脉冲激光。数值仿真模型的模拟结果与实验结果较好地吻合, 该模型能够为该类型激光器的实验研究和工程设计提供参考。

**关键词** 激光器; 掺铥光纤激光器;  $2\ \mu\text{m}$  激光; 增益调制; 数值仿真

中图分类号 O434

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.191404

## Numerical Simulation and Experimental Study of Gain-Switched Thulium-Doped Fiber Laser

Peng Zhaoliang, Ma Shanchao, Lu Sihua, Luo Changfei, Zhang Baofu\*, Jiao Zhongxing\*\*

School of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China

**Abstract** A systematic research on the gain-switched thulium-doped fiber laser is carried out in this paper. Based on the rate equation and the propagation equation, numerical models of a gain-switched thulium-doped fiber laser oscillator and an amplifier are constructed, and the solution is obtained by the finite difference time domain method. The characteristics of  $2\ \mu\text{m}$  laser output under different pump light and laser structure parameters are explored theoretically and experimentally. Through numerical simulation and experimental optimization, the nanosecond laser output at  $2\ \mu\text{m}$  band with high conversion efficiency, narrow linewidth, and single polarization is obtained. The seed source oscillator obtains the highest power of 796 mW, pulse width of 67.9 ns, and slope efficiency of 54.4%. A  $2\ \mu\text{m}$  pulsed laser with the highest power of 9.13 W and pulse width of 50.5 ns has been obtained after the first-stage amplifier. Simulation results of the numerical simulation model agree well with the experimental results. The model can provide a reference for the experimental research and engineering design of this type of laser.

**Key words** lasers; thulium-doped fiber laser;  $2\ \mu\text{m}$  laser; gain-switching; numerical simulation

**OCIS codes** 140.3510; 140.3538; 140.3410

## 1 引言

近年来,  $2\ \mu\text{m}$  波段 ( $1.9\sim 2.1\ \mu\text{m}$ ) 红外激光在医疗、环境探测、工业、科研等各领域有着广泛的应用, 对该波段激光光源的研究也成为了激光领域的研究热点。相对于其他类型的  $2\ \mu\text{m}$  激光光源, 掺铥光纤激光器具有结构简单、转换效率高、环境适应

性好以及光束质量佳等诸多优点<sup>[1]</sup>。通过增益调制的方法, 全光纤结构的掺铥光纤激光器能够产生纳秒级脉宽的  $2\ \mu\text{m}$  激光脉冲, 可应用于生物组织切割<sup>[2-3]</sup>、激光雷达探测<sup>[4]</sup>、特殊材料焊接<sup>[5-6]</sup>, 也可作为  $\text{Cr}^{2+}$  激光器和光学参量振荡器的泵浦源<sup>[4]</sup>。因此, 研究掺铥光纤激光器具有重要意义。

国内科研机构及高校对增益调制掺铥光纤激光

收稿日期: 2020-02-10; 修回日期: 2020-02-20; 录用日期: 2020-02-24

基金项目: 广东省自然科学基金(2017A030310305, 2018A030310092)、中山大学高校基本科研业务费青年教师培育项目(20174500031610017)

\* E-mail: zhangbf5@mail.sysu.edu.cn; \*\* E-mail: jiaozhx@mail.sysu.edu.cn

器的实验研究起步较晚,但发展较快。2013年,哈尔滨工业大学的 Zhou 等<sup>[7]</sup>将双光纤布拉格光栅(FBG)增益开关振荡器作为种子源,实现了 5~25 kHz 可调的脉冲激光输出,通过一级放大系统在 5 kHz 重复频率时实现了脉宽为 39 ns、平均功率为 2.5 W 的激光输出。2015年,国防科技大学 Li 等<sup>[8]</sup>报道了自主构建的基于全光纤式增益调制的掺铥光纤激光器种子源,获得了功率为 470 mW、转换效率约为 53.6% 的种子光输出,并通过两级双包层光纤放大器,得到了重复频率为 40 kHz、脉宽为 40 ns、最高单脉冲能量为 1 mJ 的 2 μm 短脉冲激光输出。

在增益调制掺铥光纤激光器的构建过程中,通过数值仿真对激光器的结构进行设计,可以得到符合应用需求的 2 μm 波段激光输出,并减小了生产过程中的原材料损耗。目前大部分针对增益调制掺铥光纤激光器数值模型的研究<sup>[9-11]</sup>都是直接参考了固体激光器的数值模型,只建立了基于掺铥光纤三能级系统的激光速率方程,再利用龙格库塔法等方法对这些速率方程组进行求解。这种类型的增益调制掺铥激光器数值模型往往只考虑了激光器内反转粒子数密度和光子数密度(激光功率)随时间的变化。但是实际中,增益介质作为光纤激光器的掺杂光纤,其长度(通常为 10<sup>-1</sup>~10<sup>1</sup> m)比固体激光器中的掺杂晶体长度(通常为 10<sup>-3</sup>~10<sup>-2</sup> m)要长得多,因此泵浦光功率、反转粒子数密度和光子数密度在掺杂光纤上会有明显变化,如果数值模型中不考虑这些参数在掺铥光纤上的变化,其准确性将得不到保障。

本文通过结合激光速率方程组和激光在光纤中的传输方程构建了增益调制掺铥光纤激光器的数值模型,并利用时域有限差分(FDTD)法对其进行求解以得到该激光器的输出特性。通过实验验证了该数值模型的有效性和准确性,并在理论上和实验上探究了不同泵浦光参数和激光器结构参数对增益调制掺铥光纤激光器输出激光特性的影响。在这些探究结果的指导下,搭建了基于主振荡器+功率放大器(MOPA)结构的增益调制掺铥光纤激光器,最终获得了功率为 9.13 W、脉宽为 50.5 ns、转换效率为 42.2% 的 2 μm 脉冲激光输出。

## 2 数值模型

为研究泵浦光及激光器结构参数对增益调制光纤激光器输出特性的影响并获得高功率、窄脉宽的 2 μm 激光输出,分别建立了增益调制光纤振荡器与放大器的数值模型。两个模型均基于掺铥光纤中的

激光速率方程组以及激光传输方程组,通过 FDTD 法求解方程,得到激光输出特性。对这两个模型的详细描述以及相应的求解过程如下。

### 2.1 振荡器数值模型

激光振荡器的典型结构如图 1 所示,这里采用 1550 nm 的脉冲激光器作为泵浦源,FBG 作为激光器腔镜,掺铥光纤作为增益介质,结合无源光纤组成了谐振腔。其中,利用掺铥光纤的铥离子在 1550 nm 泵浦光下产生 2 μm 激光的过程是通过一个准三能级系统实现的,其泵浦能级到激光上能级的弛豫时间非常短(同在<sup>3</sup>F<sub>4</sub>能级),因此可将泵浦能级上的粒子数近似为 0,将三能级系统简化为二能级(<sup>3</sup>H<sub>6</sub>能级和<sup>3</sup>F<sub>4</sub>能级)系统。振荡器激光速率方程<sup>[12]</sup>可以写为

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \frac{N_0(\sigma_{ap}\lambda_p\gamma_p P_p + \sigma_{as}\lambda_s\gamma_s P_s)}{hcA} - \frac{N_1\sigma_{es}\lambda_s\gamma_s P_s}{hcA} - R_{10}N_1 - \Gamma_1 N_1, \quad (1)$$

$$N = N_0 + N_1, \quad (2)$$

式中: $t$ 为时间; $P_p$ 为泵浦光功率; $P_s$ 为激光功率; $N_0$ 、 $N_1$ 分别为掺铥光纤中铥离子参与激光过程的能级<sup>3</sup>H<sub>6</sub>、<sup>3</sup>F<sub>4</sub>的粒子数密度; $N$ 为增益介质的总粒子数密度; $\sigma_{ap}$ 为泵浦光的吸收截面; $\sigma_{as}$ 为激光的吸收截面; $\sigma_{es}$ 为激光的发射截面; $\lambda_p$ 为泵浦光的波长; $\lambda_s$ 为激光波长; $h$ 为普朗克常数; $c$ 为真空光速; $A$ 为光纤的纤芯面积; $\gamma_s$ 和 $\gamma_p$ 分别为激光和泵浦光在光纤中的填充因子; $\Gamma_1$ 为能级<sup>3</sup>F<sub>4</sub>的非辐射弛豫系数; $R_{10}$ 为能级<sup>3</sup>F<sub>4</sub>的粒子向能级<sup>3</sup>H<sub>6</sub>自发辐射跃迁的概率。

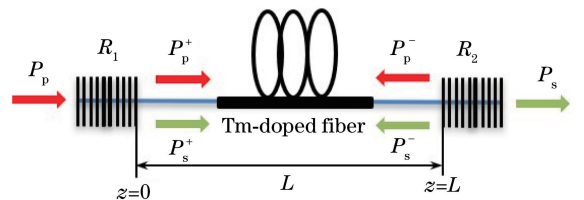


图 1 典型的振荡器结构

Fig. 1 Typical oscillator configuration

增益光纤中的激光传输方程组<sup>[12]</sup>可描述为

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} + \frac{\partial P_p}{v_g \partial t} = -\alpha_p P_p - \sigma_{ap}\gamma_p P_p N_0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} + \frac{\partial P_s}{v_g \partial t} = -\alpha_s P_s + \sigma_{es}\gamma_s P_s N_1 - \sigma_{as}\gamma_s P_s N_0 + \frac{2hc^2\sigma_{es}\gamma_s N_1 \Delta\lambda_s}{\lambda_s^3}, \quad (4)$$

式中:  $z$  为光纤位置;  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  分别为增益光纤对泵浦光和激光的散射损耗;  $v_g$  为激光在介质中传播的群速度;  $\Delta\lambda_s$  为自发辐射的波长范围。

无源光纤中的激光传输方程组可描述为

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} + \frac{\partial P_p}{v_g \partial t} = -\alpha_p P_p, \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} + \frac{\partial P_s}{v_g \partial t} = -\alpha_s P_s. \quad (6)$$

谐振腔的两端存在边界条件:

$$\begin{cases} P_p^+(0) = P_p^L \\ P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0) \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_p^-(L) = P_p^R \\ P_s^-(L) = R_2 P_s^-(L) \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $P_p^R$  和  $P_p^L$  分别为从右端面和左端面注入光纤

包层的泵浦光功率;  $P_p^+$  和  $P_p^-$  分别为沿正方向和反方向传输的泵浦光功率;  $P_s^+$  和  $P_s^-$  分别为沿正方向和反方向的输出光功率;  $L$  为增益长度;  $R_1$  和  $R_2$  分别为左、右腔镜的反射率。

在激光振荡器的仿真模型中,使用 FDTD 法可以较为精准地求解出不同时刻激光腔内不同位置的泵浦光功率、上能级粒子数密度和光子数密度,从而得到激光器的输出激光特性。整个求解过程类似于对两边界问题的求解<sup>[13]</sup>。以增益光纤部分为例,求解过程可以描述为:将整个增益光纤分成若干段,确定相应的空间步长  $\Delta z$  与时间步长  $\Delta t$ 。 $(z_k, t_j)$  处的激光高能级粒子数密度可由  $(z_k, t_{j-1})$  处的激光高能级粒子数密度表示,其中,  $k$  和  $j$  为正整数,分别为位置和时间段的序号。此时 FDTD 的差分方程表示为

$$\begin{aligned} N_1(k, j) = & N_1(k, j-1) + \Delta t \cdot \{ \{ N_0(k, j-1) \{ \sigma_{ap} \lambda_p \gamma_p P_p(k, j-1) + \\ & \sigma_{as} \lambda_s \gamma_s [P_s^+(k, j-1) - P_s^-(k, j-1)] \} \} \cdot (hcA)^{-1} - \\ & \frac{N_1(k, j-1) \sigma_{es} \lambda_s \gamma_s [P_s^+(k, j-1) - P_s^-(k, j-1)]}{hcA} - R_{10} N_1(k, j-1) - \Gamma_1 N_1(k, j-1) \}. \end{aligned} \quad (9)$$

$(z_k, t_j)$  处的泵浦光功率和激光功率可分别由  $(z_{k-1}, t_j)$  和  $(z_k, t_{j-1})$  处的泵浦光功率和激光功率表示,此时 FDTD 的差分方程表示为

$$\begin{aligned} P_p(k, j) = & \frac{1}{2} \Delta z \cdot [-\sigma_{ap} \gamma_p N_1(k-1, j) P_p(k-1, j) - \\ & \alpha_p P_p(k-1, j)] + \frac{1}{2} P_p(k-1, j) + \frac{1}{2} P_p(k, j-1), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} P_s^+(k, j) = & \frac{1}{2} \Delta z \cdot \{ \sigma_{es} \gamma_s P_s^+(k-1, j) N_1(k-1, j) - \sigma_{as} \gamma_s P_s^+(k-1, j) N_0(k-1, j) - \\ & \alpha_s P_s^+(k-1, j) + \frac{2hc^2 \sigma_{es} \gamma_s N_1(k-1, j) \Delta\lambda_s}{\lambda_s^3} \} + \frac{1}{2} P_s^+(k-1, j) + \frac{1}{2} P_s^+(k, j-1). \end{aligned} \quad (11)$$

结合边界条件,通过  $z$  和  $t$  两个方向上的迭代,即可得到不同时间激光腔内不同位置的泵浦光功率、粒子数密度和激光功率的数值解,最终得到不同时间输出到激光腔外的激光功率的数值解。

## 2.2 放大器数值模型

增益调制掺铯光纤放大器的典型结构如图 2 所示,这里采用 793 nm 的连续激光器作为泵浦源进行单向泵浦,增益光纤长度即为模拟的总长度。其中,由于掺铯光纤的铯离子在 793 nm 泵浦光下产生 2  $\mu\text{m}$  激光的过程是通过一个四能级系统实现的,其激光速率方程可以写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_3}{\partial t} = & \frac{N_0 \sigma_{ap} \lambda_p \gamma_p P_p}{hcA} - (R_{30} + R_{31} + \\ & R_{32}) N_3 - k_{3011} N_0 N_3 - \Gamma_3 N_3, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = R_{32} N_3 - (R_{20} + R_{21}) N_2 + \Gamma_3 N_3 - \Gamma_2 N_2, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial t} = & \frac{N_0 \sigma_{as} \lambda_s \gamma_s P_s}{hcA} - \frac{N_1 \sigma_{es} \lambda_s \gamma_s P_s}{hcA} + R_{31} N_3 + \\ & R_{21} N_2 - R_{10} N_1 + 2k_{3011} N_0 N_3 + \Gamma_2 N_2 - \Gamma_1 N_1, \end{aligned} \quad (14)$$

$$N = N_0 + N_1 + N_2 + N_3, \quad (15)$$

式中:  $k_{3011}$  是  ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  和  ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  的交叉弛豫系数;  $\Gamma_2$  和  $\Gamma_3$  分别是能级  ${}^3\text{H}_5$  和  ${}^3\text{H}_4$  的非辐射弛豫系数;  $N_2$  和  $N_3$  分别对应掺铯光纤中铯离子参与激光过程的能级  ${}^3\text{H}_5$  和  ${}^3\text{H}_4$  的粒子数密度;  $R_{30}$ ,  $R_{31}$  和  $R_{32}$  分别为能级  ${}^3\text{H}_4$  上的粒子向能级  ${}^3\text{H}_6$ 、 ${}^3\text{F}_4$ 、 ${}^3\text{H}_5$  自发辐射跃迁的概率;  $R_{20}$  和  $R_{21}$

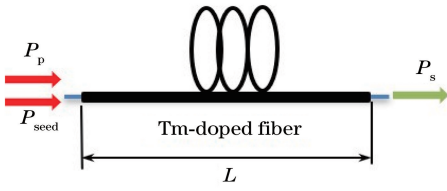


图 2 典型的放大器结构

Fig. 2 Typical amplifier configuration

分别为能级<sup>3</sup>H<sub>5</sub>上的粒子向能级<sup>3</sup>H<sub>6</sub>和<sup>3</sup>F<sub>4</sub>自发辐射跃迁的概率。

放大器传输方程与(3)式和(4)式相似,即

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} + \frac{\partial P_p}{v_g \partial t} = -\alpha_p P_p - \sigma_{ap} \gamma_p P_p N_0, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_s}{\partial z} + \frac{\partial P_s}{v_g \partial t} = & -\alpha_s P_s + \sigma_{es} \gamma_s P_s N_1 - \\ & \sigma_{as} \gamma_s P_s N_0 + \frac{2hc^2 \sigma_{es} \gamma_s N_1 \Delta \lambda_s}{\lambda_s^3}. \end{aligned} \quad (17)$$

由于放大器缺少 FBG,而在放大级中增益光纤末端对激光和泵浦光的反射率都较小,只需考虑激光和泵浦光沿正向的传输,其边界条件为

$$\begin{cases} P_p^+(0) = P_p^L \\ P_s^+(0) = P_{seed} \end{cases}, \quad (18)$$

式中: $P_{seed}$ 为种子光功率。

对于激光放大器,同样利用 FDTD 法对脉冲式的输入激光进行了模拟。反转粒子数的差分方程为

$$\begin{aligned} N_1(k, j) = & N_1(k, j-1) + \Delta t \cdot \{ [N_0(k, j-1) \sigma_{as} \lambda_s \gamma_s P_s(k, j-1) - N_1(k, j-1) \sigma_{es} \lambda_s \gamma_s P_s(k, j-1)] \cdot \\ & (hcA)^{-1} + 2k_{3011} N_0(k, j-1) N_3(k, j-1) - (R_{10} + \Gamma_1) N_1(k, j-1) + \\ & (R_{21} + \Gamma_2) N_2(k, j-1) + R_{31} N_3(k, j-1) \}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} N_2(k, j) = & N_2(k, j-1) + \Delta t \cdot [R_{32} N_3(k, j-1) - (R_{20} + R_{21}) N_2(k, j-1) + \\ & \Gamma_3 N_3(k, j-1) - \Gamma_2 N_2(k, j-1)], \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} N_3(k, j) = & N_3(k, j-1) + \Delta t \cdot \left[ \frac{N_0(k, j-1) \sigma_{ap} \lambda_p \gamma_p P_p(k, j-1)}{hcA} - k_{3011} N_0(k, j-1) N_3(k, j-1) - \right. \\ & \left. (R_{31} + R_{30} + R_{32}) N_3(k, j-1) \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

激光放大器与振荡器相比在能级结构、泵浦波长以及边界条件方面略有差异,而其传输方程组的求解方法与 2.1 节中(10)式和(11)式所描述的增益光纤的传输方程的求解方法相同。

### 3 实验结果

为了验证数值模型的准确性并探究泵浦光和激光腔结构参数对输出激光特性的影响,采用了全光纤式 MOPA 结构来构建增益调制掺铥光纤激光器。如图 3 所示,主振荡器利用中心输出波长为 1550.1 nm 的掺铥光纤激光器作为泵浦源,函数信号发生器控制泵浦光的脉宽与重复频率。谐振腔由一对保偏的 FBG 与掺铥光纤构成,采用光纤熔接的方法将 FBG 与掺铥光纤连接在一起。输入、输出 FBG 的反射率分别为 99.2% 和 26.5%,利用温控装置将温度控制在 18.35 °C。激光通过纤芯直径为 9 μm、包层直径为 125 μm 的单模保偏光纤输出。功率放大器的种子源和泵浦源分别为主振荡器和 793 nm 半导体激光器。光隔离器置于主振荡器与合束器之间,起到隔离反向激光的作用。合束器用来耦合主振荡器输出的 2 μm 种子光与泵浦源输出

的 793 nm 激光,其对种子光的损耗为 0.21 dB,对泵浦光的耦合效率为 92%。泵浦剥离器用于剥离在双包层光纤中内包层部分传输的多模激光以及剩余的泵浦光,其对 2 μm 激光的透过率为 88%。

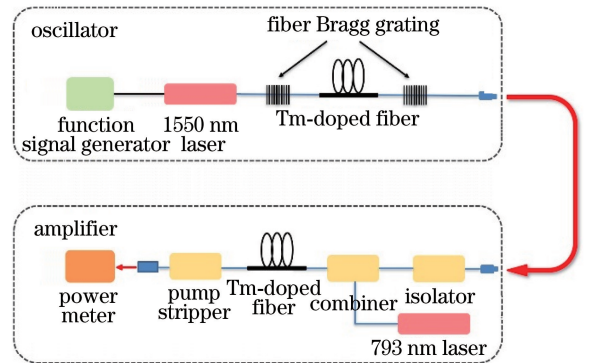


图 3 增益调制掺铥光纤 MOPA 结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of MOPA based on gain-switched thulium-doped fiber

#### 3.1 振荡器数值模型的验证

在所搭建的振荡器数值模型和实验模型基础上,通过改变 1550 nm 泵浦激光的参数(脉宽、重复频率),探究振荡器输出激光特性(脉宽、功率)

的变化。理论模拟中所用的参数数值如表 1 所示,其中  $\tau$  和  $f$  分别为泵浦激光脉宽和重复频率,  $l_{\text{cavity}}$  为腔长,  $l_{\text{gain}}$  为增益光纤长度。

表 1 理论模拟参数

Parameter	Value
$N / \text{m}^{-3}$	$1.5 \times 10^{26}$
$\sigma_{\text{ap}} / \text{m}^2$	$1.5 \times 10^{-25}$
$\sigma_{\text{as}} / \text{m}^2$	$0.42 \times 10^{-25}$
$\sigma_{\text{es}} / \text{m}^2$	$4.5 \times 10^{-25}$
$\gamma_{\text{p}}$	0.836
$\gamma_{\text{s}}$	0.931
$A / \text{m}^2$	$7.85 \times 10^{-11}$
$\alpha_{\text{p}} / \text{m}^{-1}$	$2.3 \times 10^{-3}$
$\alpha_{\text{s}} / \text{m}^{-1}$	$1.9 \times 10^{-1}$
$\Delta\lambda_{\text{s}} / \text{nm}$	300
$R_1 / \%$	99
$R_2 / \%$	27
$\tau / \text{ns}$	100
$f / \text{kHz}$	100
$l_{\text{cavity}} / \text{cm}$	126
$l_{\text{gain}} / \text{cm}$	8.5

首先探究泵浦光脉宽的影响,不失一般性,设定泵浦激光的重复频率为 100 kHz,平均功率约为 800 mW,掺铥光纤长度为 24 cm,谐振腔长度为 150 cm。此时泵浦光脉宽对输出激光特性的影响如图 4 所示。数值仿真结果与实验结果均表明,在一定范围内(100~300 ns)调节泵浦光的脉宽,对激光输出功率和脉宽的影响不大。出现该现象的原因如下:在不改变泵浦光的重复频率及平均功率的情况下,脉宽的改变并不会影响泵浦脉冲能量的大小;由于腔内光子寿命较长,当泵浦光功率超过阈值后,反转粒子数的构建主要依赖于泵浦脉冲能量大小,因此在不改变泵浦光的平均功率和重复频率的条件下,在一定范围内改变泵浦光的脉宽不会影响每个周期的反转粒子数构建,从而不会影响激光脉冲的建立,其表现为输出的脉宽和功率并不明显受到泵浦光脉宽的影响。从图 4 可以看出,仿真结果和实验结果的变化趋势基本吻合,而在具体数值上存在一定偏差。该偏差是由于数值模拟中忽略了放大自发辐射、上能级转换和各类热效应等降低激光转换效率的因素,因此相对实验值而言,数值模拟得到的输出脉宽更窄、脉冲能量更高。

接着探究泵浦光的重复频率的影响,不失一般性,设定泵浦光的脉宽为 100 ns,平均功率约为 800 mW,掺铥光纤长度为 24 cm,谐振腔长度为

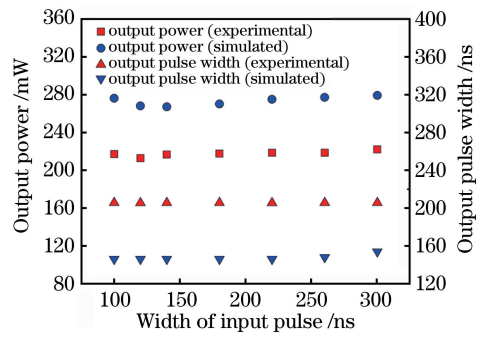


图 4 泵浦光脉宽对输出激光特性的影响

Fig. 4 Influence of pump laser pulse width on output laser characteristics

150 cm。泵浦光的重复频率对输出激光特性的影响如图 5 所示。仿真结果与实验结果均表明,在一定范围内调节泵浦光的重复频率时,激光输出功率基本保持不变;当重复频率超过 100 kHz 时输出激光脉冲变得极不稳定,脉宽和峰值功率存在跳变,难以测量。出现该现象的原因如下:在不改变泵浦光脉宽及平均功率的情况下,泵浦光的重复频率越高,其峰值功率越低,激光上能级粒子数积累越慢,导致需要更长的时间构建和终止激光脉冲,最终使得脉宽变宽;当重复频率较高时,泵浦脉冲的峰值功率较低,反转粒子数积累过慢,造成激光脉冲可能在不同周期中形成或者在同一周期中不同位置形成,最终导致激光脉冲序列紊乱,如图 5 中插图所示,图中虚线右边部分为输出激光脉冲不稳定区域,插图为泵浦光功率为 826 mW、重复频率为 200 kHz 条件下的输出激光序列图。

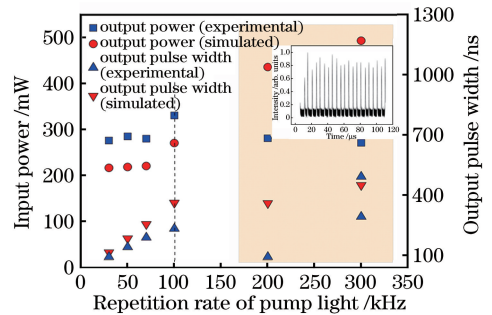


图 5 泵浦光的重复频率对输出激光特性的影响

Fig. 5 Influence of pump laser repetition rate on output laser characteristics

除了研究泵浦光的参数外,也探究了振荡器结构参数(谐振腔腔长、增益光纤长度)对输出激光特性的影响。首先探究谐振腔腔长的影响,不失一般性,设定泵浦激光的脉宽为 100 ns,重复频率为 100 kHz,泵浦光功率约为 1 W,掺铥光纤长

度为 8.5 cm。此时腔长对输出激光特性的影响如图 6 所示。仿真结果表明:1)腔长增大,则输出激光脉宽将会增大,这与实验结果较好地吻合,这是由于腔长增大延长了光子在腔内的平均寿命,而脉宽正比于光子寿命,因此脉冲随腔长的增大而变宽;2)输出激光功率会随着腔长的增大而降低,出现该现象的原因是:随着腔长的增大,无源光纤变长,传输损耗增大,最终使得输出光功率略有下降。实验中泵浦光功率存在一定浮动,造成仿真与实验结果略不相符。

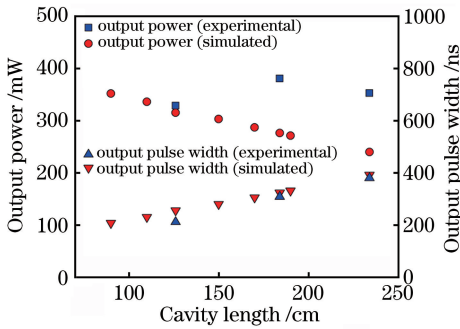


图 6 腔长对输出激光特性的影响

Fig. 6 Influence of cavity length on output laser characteristics

接着探究激光腔增益光纤长度的影响,不失一般性,设定泵浦激光的脉宽为 100 ns,重复频率为 100 kHz,泵浦光功率约为 1 W,除增益光纤以外的谐振腔腔长为 126 cm。此时增益光纤长度对输出激光特性的影响如图 7 所示。当增益光纤长度小于 10 cm 时,随着增益光纤长度变长,输出脉宽变窄,而输出功率有显著的提升;当增益光纤长度继续变长时,输出脉宽开始呈线性增大趋势,输出功率增加趋势开始变缓。该现象可以通过泵浦光吸收量进行解释:在第一阶段,随着增益光纤长度的增加,激光器对泵浦光的吸收量大幅增加,此时激光上能级粒子数的积累速度随掺铥光纤长度的增加而迅速加快,这缩短了激光脉冲的建立时间,使得输出脉宽迅速变窄,输出功率迅速上升;在第二阶段,增益光纤的前端部分已经将大部分泵浦光吸收,因此随着增益光纤长度的增加,激光器对泵浦光的吸收减小,较小的泵浦光变化减缓了输出脉冲能量的上升速度,且增益光纤长度变长导致总腔长变长,因此随着增益光纤长度的增加,输出脉宽呈线性增大趋势。

上述针对振荡器的实验中探究了增益调制掺铥光纤激光器的泵浦光和谐振腔结构参数对输出激光特性的影响。通过对比数值模型的仿真结果和实验

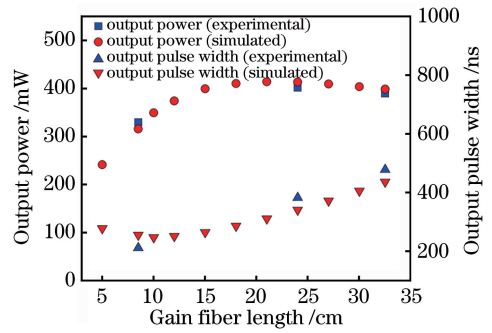


图 7 振荡器中的增益光纤长度对输出激光特性的影响

Fig. 7 Influence of gain fiber length in oscillator on output laser characteristics

结果可以发现,两者较好地吻合,两者的变化趋势几乎一致,而二者在数值上存在的偏差通常是由数值模型中的适当简化造成的。实验结果验证了这个基于 FDTD 法的增益调制掺铥光纤激光器的数值模型的有效性和准确性。

### 3.2 放大器数值模型的验证

对于放大器,探究了其增益光纤长度对激光输出功率的影响。不失一般性,设定种子源输出功率为 683 mW,选取长度为 0.8, 2.0, 2.8, 4.9, 6.9 m 的掺铥光纤作为放大器增益介质来进行实验与仿真结果的对照,如图 8 所示。从图 8 中可以发现,在展示的这三种光纤长度中,相同泵浦光功率下,掺铥光纤长度为 2.8 m 时输出功率最高,而且从整体上来看,该掺铥光纤长度下激光转换效率也更高。这是因为过短的光纤会导致泵浦光吸收效率较低,而过长光纤会带来较强的重吸收效应,降低了激光转换效率。从整体的模拟结果来看,该数值模型得到的模拟值与实验值比较接近,数据总体的相对误差在 20% 以内。得到这样的结果在很大程度上是由于数值模拟中忽略了能量传递上转换以及其他各类热效应等对激光转换效率的影响。因此如果可以在数值模型中补充这些效应的相关参数,可以得到更为准确的模拟结果。

### 3.3 优化的实验结果

在增益调制掺铥光纤振荡器方面,设置泵浦光的脉宽为 100 ns,重复频率为 100 kHz,增益光纤长度为 24 cm,谐振腔长度为 126 cm。得到的 2  $\mu\text{m}$  激光的输出功率随泵浦光功率的变化曲线如图 9 所示,激光的输出功率随泵浦光功率的增加呈线性增加,斜效率为 54.4%。当泵浦光功率达到最大 (1758 mW) 时,获得的最大输出功率为 796 mW,输出激光脉冲的形貌如图 10 所示,激光脉冲的脉宽为

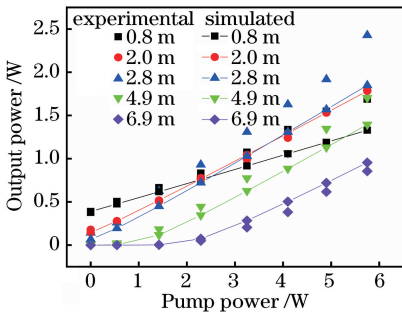


图 8 放大器中的增益光纤长度对激光输出功率的影响

Fig. 8 Influence of gain fiber length in amplifier on laser output power

67.9 ns。通过计算可得光-光转换效率为 45.3%，输出激光峰值功率为 117.2 W。通过与文献[9]中输出脉宽为 120 ns、峰值功率为 25.6 W、斜效率为 46% 的 2 μm 掺铥光纤振荡器进行对比可以发现，在仿真结果的指导下构建的增益调制掺铥光纤振荡器具有高功率、窄脉宽、高效率的特性。

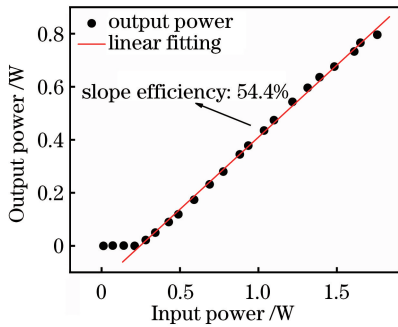


图 9 激光振荡器输出功率随 1550 nm 激光器输入功率的变化

Fig. 9 Output power of laser oscillator versus input power of 1550 nm laser

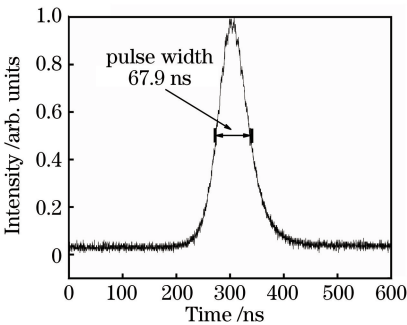


图 10 激光振荡器的输出激光脉冲形貌图

Fig. 10 Output laser pulse shape of laser oscillator

在增益调制掺铥光纤放大器方面，当种子源（振荡器）的输出功率为 758 mW、增益光纤长度为 2.8 m 时，得到 2 μm 激光器的输出功率随泵浦光

功率的变化曲线如图 11 所示，激光的输出功率随泵浦光功率的增加呈线性增加。当 793 nm 半导体激光器的泵浦电流达到最大(31.1 A)时，泵浦光功率达到 19.9 W，此时获得的激光最高输出功率为 9.13 W，放大级的光-光转换效率达到 41.9%。因此考虑整个 MOPA 系统，泵浦光转化为 2 μm 激光的转换效率为 42.2%。从图 11 中放大的激光功率的变化趋势可以看出，该放大级在目前的最高泵浦光功率下仍未出现增益饱和效应，因此若能继续增加泵浦光功率，放大的激光功率将可以得到进一步提高。同时，针对激光器长时间工作可能存在的功率衰退现象，进行了约 90 min 的功率稳定性测试，当种子源输出功率为 735 mW、泵浦光功率为 17 W 时，放大器功率稳定性测试结果如图 11 中插图所示。经计算可得，功率的标准差为 0.09，这说明该放大器在较高输出功率的情况下也能保持较好的功率稳定性。

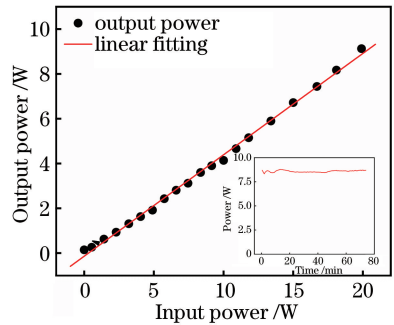


图 11 激光放大器输出功率随 793 nm 泵浦源输入功率的变化。插图为放大器输出功率的长时间稳定性测试结果

Fig. 11 Output power of laser amplifier versus input power of 793 nm pump source. Inset is long-term stability test result of amplifier output power

当泵浦光功率达到最大(19.9 W)时，输出激光的脉冲形貌如图 12 所示，此时输出激光的脉宽为 50.5 ns，比种子源的输出脉宽(67.9 ns)窄，出现这种脉宽窄化现象的原因是：激光放大过程中脉冲上升沿消耗了较多泵浦光能量，使激光脉冲前沿变陡，导致脉宽减小。2016 年 Tiess 等<sup>[14]</sup>搭建了光-光转换效率为 58% 的 2 μm 掺铥光纤放大器，获得了功率为 28 W、脉宽为 11 ns 的输出激光。因此实验方面仍有一定的改善空间，例如可以通过加入掺铥光纤液冷装置来优化增益光纤长度，提高泵浦光功率。

## 4 结 论

从数值仿真与实验两个方面研究了增益调制掺

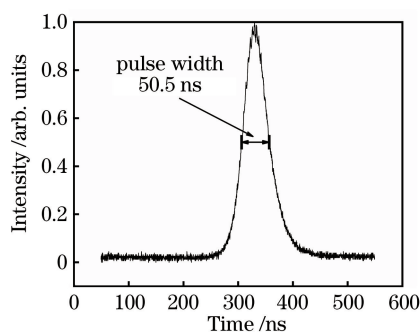


图 12 激光放大器的输出激光脉冲形貌图

Fig. 12 Output laser pulse shape of laser amplifier

铥光纤振荡器与放大器的输出特性。基于激光速率方程与传输方程,分别构建了振荡器与放大器的数值模型,通过 FDTD 法进行求解,模拟得到激光器的输出情况。实验中构建了全光纤式 MOPA 结构的增益调制掺铥光纤激光器,通过改变泵浦光及谐振腔结构的参数,验证了所构建的数值模型的准确性,并探究了这些参数对激光器输出特性的影响。最后根据模拟与实验结果,选取合适的参数对激光器进行优化,获得了高转换效率、窄线宽、单一偏振的  $2\ \mu\text{m}$  波段纳秒级激光输出。其中,采用主振荡器得到了最大功率为 796 mW、脉宽为 67.9 ns 的  $2\ \mu\text{m}$  脉冲激光输出,采用功率放大器得到了最大功率为 9.13 W、脉宽为 50.5 ns 的  $2\ \mu\text{m}$  脉冲激光输出。基于 FDTD 法的数值模型可有效应用于增益调制掺铥光纤激光器的实验和工程设计中,从而完成满足相关应用需求的激光器的构建。

### 参 考 文 献

[1] Yu T, Ye X S, Chen W B, et al. Output characteristics of all fiber doped thulium fiber laser with different wavelength [C] // The 14<sup>th</sup> National Conference on Physical Mechanics, September 27, 2016, Mianyang, Sichuan, China. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2016: 227.  
余婷, 叶锡生, 陈卫标, 等. 全光纤掺铥光纤激光器不同波长的输出特性[C]//第十四届全国物理力学学术会议缩编文集, 2016-09-27, 绵阳, 四川, 中国. 北京: 中国理论与应用力学学会, 2016: 227.

[2] Yang K, Ren Q S, Wei S G, et al. Application of  $2\ \mu\text{m}$  Tm laser on biomedicine [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(9): 52-56.  
杨昆, 任秋实, 魏石刚, 等.  $2\ \mu\text{m}$  铥(Tm)激光器在生物医学中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(9): 52-56.

[3] Ghosh A, Pal D, Sen R, et al. Fiber laser at  $2\ \mu\text{m}$  for soft tissue surgery [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9266: 92660E.

[4] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, et al.  $2\ \mu\text{m}$  laser sources and their possible applications [M] // Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics. Vukovar: InTech, 2010: 471-499.

[5] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, et al. Welding of polymers using a  $2\ \mu\text{m}$  thulium fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(7): 2095-2099.

[6] Liu M Q, Ouyang D Q, Li C B, et al. Experimental study on transparent PET/pure white PP welding with two-micron laser without absorbent[J]. Applied Laser, 2018, 38(4): 610-617.  
刘敏秋, 欧阳德钦, 李春波, 等. 两微米激光无吸收剂焊接透明 PET/纯白 PP 实验研究[J]. 应用激光, 2018, 38(4): 610-617.

[7] Zhou R L, Ren J C, Yang C, et al. An all fiber  $1.94\ \mu\text{m}$  nanosecond pulse laser amplified by highly  $\text{Tm}^{3+}$ -doped silicon fibers [J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(5): 054208.

[8] Li L, Zhang B, Yin K, et al. 1 mJ nanosecond all-fiber thulium-doped fiber laser at  $2.05\ \mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18098-18105.

[9] Wang F, Shen D Y, Chen H, et al. Modeling and optimization of stable gain-switched Tm-doped fiber lasers[J]. Optical Review, 2011, 18(4): 360-364.

[10] Peterka P, Faure B, Blanc W, et al. Theoretical modelling of S-band thulium-doped silica fibre amplifiers [J]. Optical and Quantum Electronics, 2004, 36(1/2/3): 201-212.

[11] Zhou R L, Ju Y L, Zhao J, et al. A theoretical and experimental investigation of an in-band pumped gain-switched thulium-doped fiber laser [J]. Chinese Physics B, 2013, 22(6): 064208.

[12] Eichhorn M. Numerical modeling of Tm-doped double-clad fluoride fiber amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(12): 1574-1581.

[13] Pedersen B, Bjarklev A, Povlsen J H, et al. The design of erbium-doped fiber amplifiers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(9): 1105-1112.

[14] Tiess T, Junaid S, Becker M, et al. Discretely tunable Tm-doped fiber-based MOPA using FBG arrays as spectral filters [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9728: 97280N.