

# 3.5 $\mu\text{m}$ 双波长泵浦 Er:ZBLAN 光纤激光器 数值模拟

栾昆鹏, 沈炎龙\*, 陶蒙蒙, 湛鸿伟, 黄超, 易爱平, 黄珂

西北核技术研究院激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

**摘要** 数值模拟 975 nm 和 1975 nm 双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光器。计算给出激光功率和粒子数密度随时间和位置的二维分布, 计算结果与实验报道吻合较好。模拟双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光器实现稳定连续激光振荡的整个过程, 计算分析泵浦功率、1975 nm 泵浦光重叠因子、输出镜反射率、离子间相互作用等参数对 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率的影响, 分析 ESA<sub>2</sub> 产生显著影响的条件。数值模拟对深入理解双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光器的动力学过程和优化激光器设计有一定指导意义。

**关键词** 激光光学; 中红外双波长泵浦; 氟化物光纤; 有限差分法

**中图分类号** O432.1+2

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.1001008

## Numerical Simulation of 3.5 $\mu\text{m}$ Dual-Wavelength Pumped Er:ZBLAN Fiber Lasers

Luan Kunpeng, Shen Yanlong\*, Tao Mengmeng, Chen Hongwei,  
Huang Chao, Yi Aiping, Huang Ke

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

**Abstract** 975 nm and 1975 nm dual-wavelength pumped 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN fiber lasers have been numerically modeled. Laser power and particle density are estimated in both time and space dimensions and simulation results match well with the experimental reports. The whole process of stable continuous laser oscillation in a dual-wavelength pumped 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN fiber laser is showed by simulation. 3.5  $\mu\text{m}$  laser characteristics are estimated and studied with different fiber parameters, such as pump power, 1975 nm pump mode overlap factor, reflectivity of output lens, and interionic interaction. The condition in which ESA<sub>2</sub> process has great influence on laser power is also investigated. Simulation promotes the understanding of 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN laser dynamics and provides valuable insight for laser designing.

**Key words** laser optics; mid-infrared dual-wavelength pumping; fluoride fiber; finite difference method

**OCIS codes** 140.3510; 060.2390; 140.7010

## 1 引言

中红外光纤激光器因在遥感、气体成分检测和光谱学等领域的广泛应用而成为目前的研究热点<sup>[1-3]</sup>。在所有中红外光纤激光器中, 掺 Er<sup>3+</sup> 的氟化物光纤(Er:ZBLAN)激光器因具有输出功率最高、振荡波长丰富的优势而得到最广泛的研究<sup>[4-7]</sup>。

Er:ZBLAN 光纤激光器可以实现 2.7~3  $\mu\text{m}$  (<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 跃迁) 和 3.3~3.8  $\mu\text{m}$  (<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 跃迁) 两个中红外波段的激光输出。2.7~3  $\mu\text{m}$  波段的 Er:ZBLAN 激光器输出功率最高达 30.5 W<sup>[5]</sup>, 通过光纤光栅、闪耀光栅、体光栅等调谐元件可实现 2.69~2.98  $\mu\text{m}$  的宽调谐输出<sup>[4,6-7]</sup>。3.3~3.8  $\mu\text{m}$  波段的 Er:ZBLAN 激光器最先由 Többen 等<sup>[8]</sup> 在 1991 年

收稿日期: 2019-04-08; 修回日期: 2019-05-15; 录用日期: 2019-06-05

基金项目: 国家重点实验室基础研究课题(SKLLIM1811)

\* E-mail: shenyanlong@nint.ac.cn

报道,但在 2014 年后才随着光纤制作工艺的提升和双波长泵浦技术的引入而得到迅速发展。早期的研究人员以约 650 nm 的红光激光泵浦 Er:ZBLAN,将基态 $^4I_{15/2}$ 上的离子激发至 $^4F_{9/2}$ 能级,并通过 $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 间的能级跃迁实现 3.5  $\mu\text{m}$  的激光振荡,输出功率仅为 10 mW 左右<sup>[8-9]</sup>。2014 年,澳大利亚 Adelaide 大学的 Henderson-Sapir 等<sup>[10]</sup> 通过 985 nm/1973 nm 双波长泵浦低掺杂 Er:ZBLAN 光纤,实现 3.5  $\mu\text{m}$  260 mW 的激光输出,开启了 3.5  $\mu\text{m}$ 双波长泵浦 Er:ZBLAN 光纤激光器发展的新纪元。2016 年,Henderson-Sapir 等<sup>[4]</sup>通过闪耀光栅调谐实现 3.3~3.8  $\mu\text{m}$  的调谐输出,3.5  $\mu\text{m}$  处的输出功率达 1.45 W。2016 年,加拿大 Laval 大学的 Fortin 等<sup>[11]</sup>报道了全光纤结构的双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光器,输出功率提升至 1.5 W。2017 年,加拿大 Laval 大学的 Maes 等<sup>[12]</sup>采用双光纤光栅结构将 3.5  $\mu\text{m}$ 激光输出功率提升至 5.6 W。2017 年,上海交通大学的 Qin 等<sup>[13]</sup>发现双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光器输出波长会随 1975 nm 泵浦增大而发生红移。2018 年,Qin 等<sup>[14]</sup>利用可饱和吸收镜实现双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光器被动调 Q 和锁模输出。2019 年,成都电子科技大学的 Luo 等<sup>[15]</sup>实现双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 增益开关脉冲输出。

在理论和数值建模研究方面,2016 年,澳大利亚 Adelaide 大学的 Malouf 等<sup>[16]</sup>建立了双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 激光模型,并采用有限差分法对输出功率、粒子数密度等在时间和空间两个维度上进行计算。2017 年,加拿大 Laval 大学的 Maes 等<sup>[17]</sup>发现新的、可能造成激光淬灭的激发态吸收过程( $\text{ESA}_2: ^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{7/2}$ ),建立考虑  $\text{ESA}_2$  影响的模型,进行了理论计算。文献[16-17]对双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 激光器进行了深入的理论研究和计算,建模较为完善,模拟计算结果与实验结果吻合较好。但由于双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光振荡涉及能级结构多、谐振腔参数复杂,还有一些影响因素,如 975 nm 泵浦功率的变化对 3.5  $\mu\text{m}$ 输出特性的影响、1975 nm 泵浦的重叠因子和离子间作用等对输出功率的影响,还有对  $\text{ESA}_2$  过程影响的条件等,相关文献的分析尚不完善。

本文针对双波长泵浦的 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光器,建立包含时间和空间的二维模型并用有限差分法进行了数值计算。首先对文献报道的实验结果进行模拟计算,以验证模型的有效性;然后模拟

计算了双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光器实现稳定连续激光振荡的整个过程,分析激光功率和粒子数密度随时间和位置的变化;计算分析 1975 nm 泵浦重叠因子、输出镜反射率、离子间相互作用等对 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率的影响;研究 975 nm 和 1975 nm 泵浦光功率对 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率的影响规律,分析影响  $\text{ESA}_2$  过程的条件。

## 2 理论模型

图 1 为 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光器的能级结构图。在  $P_1$ (~975 nm) 泵浦光激发下,基态 $^4I_{15/2}$ 的  $\text{Er}^{3+}$  离子跃迁到 $^4I_{11/2}$ 能级,同时, $^4I_{11/2}$ 能级的离子会通过激发态吸收( $\text{ESA}_{1a}$ 和  $\text{ESA}_{1b}$ )过程,吸收 975 nm 泵浦光继续向上跃迁到 $^4F_{7/2}$ 能级。2.8  $\mu\text{m}$ 激光跃迁发生在 $^4I_{11/2}$ 能级至 $^4I_{13/2}$ 能级。在  $P_2$ (~1975 nm) 泵浦光激发下, $^4I_{11/2}$ 能级的粒子继续向上跃迁至 $^4F_{9/2}$ 能级。3.5  $\mu\text{m}$  激光跃迁发生在 $^4F_{9/2}$ 能级至 $^4I_{9/2}$ 能级。存在 4 种主要的离子间作用—— $W_{1103}$ ,  $W_{2206}$ ,  $W_{5031}$ 和  $W_{4251}$ ,影响 3.5  $\mu\text{m}$  激光振荡。离子间作用参数  $W_{ijmn}$  下脚标的含义是在  $i$  能级和  $j$  能级的两个粒子,受离子间作用而分别跃迁至  $m$  能级和  $n$  能级。 $W_{1103}$  过程使得 $^4I_{13/2}$ 能级的粒子一部分跃迁到 3.5  $\mu\text{m}$  激光跃迁的下能级 $^4I_{9/2}$ 。 $W_{2206}$  过程使得 $^4I_{11/2}$ 能级的粒子减少从而减弱 1975 nm 泵浦的类基态吸收(VGSA)。  $W_{5031}$  过程增大了 3.5  $\mu\text{m}$  激光跃迁的下能级 $^4I_{9/2}$ 的粒子数。而  $W_{4251}$  过程降低了 3.5  $\mu\text{m}$  激光跃迁的上能级 $^4F_{9/2}$ 的粒子数。文献[16]建立了较为完善的模型,本文采用其模型,并引入文献[17]中描述的对  $\text{ESA}_2$  影响的条件。基于图 1 的  $\text{Er}^{3+}$  能级跃迁过程,各能级粒子数密度  $N_i(z, t)$  变化的速率方程表示为

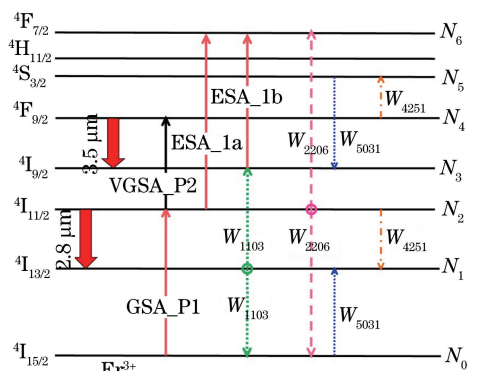


图 1 3.5  $\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤激光器能级结构图  
Fig. 1 Schematic of the energy levels relevant to the 3.5  $\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN fiber laser

$$\frac{dN_6(z,t)}{dt} = -\frac{N_6(z,t)}{\tau_6} + R_{ab26} + R_{ab36} + R_{ab46} + W_{2206} N_2^2(z,t), \quad (1)$$

$$\frac{dN_5(z,t)}{dt} = \beta_{65} \frac{N_6(z,t)}{\tau_6} - \frac{N_5(z,t)}{\tau_5} - W_{5031} N_5(z,t) N_0(z,t) + W_{4251} N_4(z,t) N_2(z,t), \quad (2)$$

$$\frac{dN_4(z,t)}{dt} = \sum_{i=5,6} \beta_{i4} \frac{N_i(z,t)}{\tau_i} - \frac{N_4(z,t)}{\tau_4} - W_{4251} N_4(z,t) N_2(z,t) - R_{SE43}(z,t) + R_{ab24}, \quad (3)$$

$$\frac{dN_3(z,t)}{dt} = \sum_{i=4 \sim 6} \beta_{i3} \frac{N_i(z,t)}{\tau_i} - \frac{N_3(z,t)}{\tau_3} + W_{5031} N_5(z,t) N_0(z,t) + W_{1103} N_1^2(z,t) + R_{SE43}(z,t) - R_{ab36}, \quad (4)$$

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \sum_{i=3 \sim 6} \beta_{i2} \frac{N_i(z,t)}{\tau_i} - \frac{N_2(z,t)}{\tau_2} - 2W_{2206} N_2^2(z,t) - R_{SE21}(z,t) - W_{4251} N_4(z,t) N_2(z,t) + R_{ab02} - R_{ab24} - R_{ab26}, \quad (5)$$

$$\frac{dN_1(z,t)}{dt} = \sum_{i=2 \sim 6} \beta_{i1} \frac{N_i(z,t)}{\tau_i} - \frac{N_1(z,t)}{\tau_1} + W_{5031} N_5(z,t) N_0(z,t) - 2W_{1103} N_1^2(z,t) + R_{SE21}(z,t) + W_{4251} N_4(z,t) N_2(z,t), \quad (6)$$

$$N_{Er} = \sum_{i=0 \sim 6} N_i(z,t), \quad (7)$$

式中:  $z, t$  分别为位置和时间坐标;  $\tau_i$  为包括辐射跃迁和声子弛豫过程的  $i$  能级固有寿命;  $\beta_{ij}$  为  $i$  能级跃迁到  $j$  能级的分支比;  $W_{1103}, W_{2206}, W_{4251}$  和  $W_{5031}$  分别为离子间作用过程参数;  $N_i$  为各能级的粒子数密度;  $N_{Er}$  为  $Er^{3+}$  的掺杂浓度(粒子数浓度);  $R_{abij}$  为在吸收泵浦光  $P_{k(k=1,2)}$  后由  $i$  能级至  $j$  能级的跃迁速率, 表达式为

$$R_{abij} = \frac{\lambda_p \Gamma_p}{hcA_{eff}} [P_{p,k}^+(z,t) + P_{p,k}^-(z,t)] \cdot [\sigma_{abij} N_i(z,t) - \sigma_{emji} N_j(z,t)], \quad (8)$$

式中:  $\lambda_p$  为泵浦光波长;  $\Gamma_p$  为泵浦光的重叠因子, 等于纤芯横截面积与内包层横截面积的比值;  $\sigma_{abij}$  和  $\sigma_{emji}$  分别为  $i$  能级至  $j$  能级的吸收截面和  $j$  能级至  $i$  能级的发射截面;  $h$  为普朗克常量;  $c$  为光速;  $A_{eff}$  为纤芯的有效横截面积;  $P_{p,1}^+(z,t), P_{p,1}^-(z,t)$  分别为 975 nm 泵浦光的前向和后向传输功率;  $P_{p,2}^+(z,t), P_{p,2}^-(z,t)$  分别为 1975 nm 泵浦光的前向和后向传输功率。  $R_{SE21}$  为  $^4I_{11/2}$  能级到  $^4I_{13/2}$  能级的激光跃迁

速率,  $R_{SE43}$  为  $^4F_{9/2}$  能级至  $^4I_{9/2}$  能级的激光跃迁速率, 表达式分别为

$$R_{SE21} = \frac{\lambda_{s21} \Gamma_{s21}}{hcA_{eff}} [P_{s21}^+(z,t) + P_{s21}^-(z,t)] \cdot [\sigma_{em21} N_2(z,t) - \sigma_{ab12} N_1(z,t)], \quad (9)$$

$$R_{SE43} = \frac{\lambda_{s43} \Gamma_{s43}}{hcA_{eff}} [P_{s43}^+(z,t) + P_{s43}^-(z,t)] \cdot [\sigma_{em43} N_4(z,t) - \sigma_{ab34} N_3(z,t)], \quad (10)$$

式中:  $\lambda_{s21}$  和  $\lambda_{s43}$  为信号光波长;  $\Gamma_{s21}$  和  $\Gamma_{s43}$  分别为 2.8  $\mu\text{m}$  和 3.5  $\mu\text{m}$  信号光的重叠因子, 在信号光为高斯光束时, 高斯半径为  $\omega_0 = r_{core} (0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.876V^{-6})$ ,  $V$  为归一化频率,  $r_{core}$  为纤芯半径, 则有  $\Gamma_s = 1 - \exp[-2(r_{core}/\omega_0)^2]$ ;  $P_{s21}^+(z,t), P_{s21}^-(z,t)$  分别为 2.8  $\mu\text{m}$  信号光的前向和后向传输功率;  $P_{s43}^+(z,t), P_{s43}^-(z,t)$  分别为 3.5  $\mu\text{m}$  信号光的前向和后向传输功率。泵浦光功率和信号光功率随距离和时间的偏微分表达式为<sup>[18]</sup>

$$\pm \frac{\partial P_{p,1}^\pm(z,t)}{\partial z} + \frac{\partial P_{p,1}^\pm(z,t)}{v_g \partial t} = -\Gamma_{p,1} P_{p,1}^\pm(z,t) (R_{ab02} + R_{ab26} + R_{ab36}) - \alpha_{p,1} P_{p,1}^\pm(z,t), \quad (11)$$

$$\pm \frac{\partial P_{p,2}^\pm(z,t)}{\partial z} + \frac{\partial P_{p,2}^\pm(z,t)}{v_g \partial t} = -\Gamma_{p,2} P_{p,2}^\pm(z,t) (R_{ab24} + R_{ab46}) - \alpha_{p,2} P_{p,2}^\pm(z,t), \quad (12)$$

$$\pm \frac{\partial P_{s21}^\pm(z,t)}{\partial z} + \frac{\partial P_{s21}^\pm(z,t)}{v_g \partial t} = \Gamma_{s21} P_{s21}^\pm(z,t) R_{SE21} - \alpha_{s21} P_{s21}^\pm(z,t) + \Gamma_{s21} \frac{2hc^2}{\lambda_{s21}^3} N_2(z,t) \sigma_{SE21} (\lambda_{s21}) \Delta_{ASE}, \quad (13)$$

$$\pm \frac{\partial P_{s43}^\pm(z,t)}{\partial z} + \frac{\partial P_{s43}^\pm(z,t)}{v_g \partial t} = \Gamma_{s43} P_{s43}^\pm(z,t) R_{SE43} - \alpha_{s43} P_{s43}^\pm(z,t) + \Gamma_{s43} \frac{2hc^2}{\lambda_{s43}^3} N_4(z,t) \sigma_{SE43} (\lambda_{s43}) \Delta_{ASE}, \quad (14)$$

式中： $\alpha_{s21}$ 、 $\alpha_{s43}$  和  $\alpha_{p1}$ 、 $\alpha_{p2}$  分别为信号光和泵浦光在光纤中传输的背景损耗系数； $\Delta_{ASE}$  为放大自发辐射带宽； $\nu_g$  为光纤中的光速，认为信号光与泵浦光速度相同。泵浦光和信号光在谐振腔的两个端面处遵循的边界条件为

$$P_{p-1}^+(0, t) = P_{p-1}^-(0, t)R_{p10} + P_{pin0}, \quad (15)$$

$$P_{p-1}^-(L, t) = P_{p-1}^+(L, t)R_{p1L} + P_{pinL}, \quad (16)$$

$$P_{p-2}^+(0, t) = P_{p-2}^-(0, t)R_{p20} + P_{p2in0}, \quad (17)$$

$$P_{p-2}^-(L, t) = P_{p-2}^+(L, t)R_{p2L} + P_{p2inL}, \quad (18)$$

$$P_{s21}^+(0, t) = P_{s21}^-(0, t)R_{s210}, \quad (19)$$

$$P_{s21}^-(L, t) = P_{s21}^+(L, t)R_{s21L}, \quad (20)$$

$$P_{s43}^+(0, t) = P_{s43}^-(0, t)R_{s430}, \quad (21)$$

$$P_{s43}^-(L, t) = P_{s43}^+(L, t)R_{s43L}, \quad (22)$$

式中：0 和  $L$  分别对应谐振腔的两端， $L$  为腔长； $R_{p0}$ 、 $R_{pL}$ 、 $R_{s0}$ 、 $R_{sL}$  分别为两个边界处的腔镜对泵浦光和信号光的反射率； $P_{pin0}$  和  $P_{pinL}$  分别为两个边界处的注入泵浦功率。

用有限差分算法求解以上方程组。在计算中将光纤分为  $n$  段，每一段光纤长  $\Delta L = L/n$ ，时域步长  $\Delta t = \Delta L \cdot n_{core}/c$ ， $n_{core}$  为纤芯折射率， $\Delta t$  为激光通过单个光纤分段  $\Delta L$  的时间。首先求解每一个时刻、每一个光纤段上的粒子数密度，再求解对应的信号光功率和泵浦光功率。

表 1 为  $Er^{3+}$  离子的光谱常数，表 2 为计算中采用的光谱变量值和光纤参数，其中  $d_{core}$  和  $d_{clad}$  分别为光纤纤芯和包层的直径。其中参数来源于文献[16]和文献[17]。文献[17]考虑了1975 nm泵浦的激发态吸收过程  $ESA_2$ ，而文献[16]没有考虑， $ESA_2$  过程对输出特性影响的分析见后文。对激光输出特性影响较大的参数，如  $GSA\_P1$ 、 $VGSA\_P2$ 、 $R_{s43}$ ，

表 1  $Er^{3+}$  离子的光谱常数<sup>[16-17]</sup>

Table 1 Spectroscopic constant parameters of  $Er^{3+}$  <sup>[16-17]</sup>

Parameters	Value
$\tau_1/\text{ms}$	9.9
$\tau_2/\text{ms}$	7.9
$\tau_3/\mu\text{s}$	8.0
$\tau_4/\mu\text{s}$	177.0
$\tau_5/\mu\text{s}$	530.0
$\tau_6/\mu\text{s}$	5.0
$\beta_{10}$	1.0
$\beta_{21}, \beta_{20}$	0.182, 0.818
$\beta_{32}, \beta_{31}, \beta_{30}$	0.999, 0, 0.001
$\beta_{43}, \beta_{42}, \beta_{41}, \beta_{40}$	0.808, 0.008, 0.009, 0.175
$\beta_{54}, \beta_{53}, \beta_{52}, \beta_{51}, \beta_{50}$	0.285, 0.029, 0.014, 0.193, 0.479
$\beta_{65}, \beta_{60}$	0.990, 0.010

$R_{s21}$ ，基本一致或处于同一量级，但是在离子间作用转换参量  $W_{2206}$ 、 $W_{1103}$  和  $W_{5031}$  上两篇文献有量级上的差别，但是经离子间作用转换参量计算后对  $3.5 \mu\text{m}$  激光功率影响不明显，具体分析见后文。计算中设定两个泵浦波长为 975 nm 和 1975 nm，未考虑泵浦吸收截面随波长可能发生的变化及其对激光输出功率的影响。

表 2 可变光谱参数和光纤参数<sup>[4,16-17]</sup>

Table 2 Variable spectroscopic parameters and fiber parameters<sup>[4,16-17]</sup>

Parameters	Value	
$N_{Er}/(10^{26} \text{ m}^{-3})$	1.6	
$L/\text{m}$	2.8	3.4
$d_{core}/(10^{-6} \text{ m})$	16.5	16.5
$d_{clad}/(10^{-6} \text{ m})$	250	170
$\lambda_{p1}/(10^{-9} \text{ m})$	977	964.8
$\lambda_{p2}/(10^{-9} \text{ m})$	1973	1976
$\lambda_{s1}/(10^{-6} \text{ m})$	2.8	—
$\lambda_{s2}/(10^{-6} \text{ m})$	3.47	3.44
$\sigma_{ab\ 02}/(10^{-26} \text{ m}^2)$	19.5	3.77
$\sigma_{ab\ 26}/(10^{-26} \text{ m}^2)$	9.3	26.4
$\sigma_{ab\ 34}/(10^{-26} \text{ m}^2)$	—	15
$\sigma_{ab\ 36}/(10^{-26} \text{ m}^2)$	13.5	21
$\sigma_{ab\ 46}/(10^{-26} \text{ m}^2)$	—	7
$\sigma_{ab\ 24}/(10^{-26} \text{ m}^2)$		30
$\sigma_{em20}/(10^{-26} \text{ m}^2)$	16.1	1.64
$\sigma_{em62}/(10^{-26} \text{ m}^2)$	21.1	31.9
$\sigma_{em63}/(10^{-26} \text{ m}^2)$	17.4	—
$\sigma_{em42}/(10^{-26} \text{ m}^2)$		36.1
$\sigma_{em21}/(10^{-26} \text{ m}^2)$	45	—
$\sigma_{em43}/(10^{-26} \text{ m}^2)$		12
$\alpha_{s2}/\text{m}^{-1}$		0.035
$W_{1103}/(10^{-24} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.4	13
$W_{2206}/(10^{-24} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.08	1.6
$W_{5031}/(10^{-24} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.1	4.8
$W_{4251}/(10^{-24} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	17	25

为验证模型的有效性，对 Henderson2016 (H2016) 和 Maes2017 (M2017) 的实验结果进行模拟计算<sup>[4,17]</sup>，如图 2 所示。两篇文献的模拟结果均较好地吻合了实验结果，表明模型参数选取合理、计算准确性较高。

### 3 计算结果与分析

图 3 为一个典型的  $3.5 \mu\text{m}$  激光振荡形成过程的计算结果。参数来源于 Malouf 2016-Table II，考虑了  $ESA_2$  过程。有限差分计算中将光纤分为 10 段。泵浦功率和谐振腔镜反射率设定为  $P_1 =$

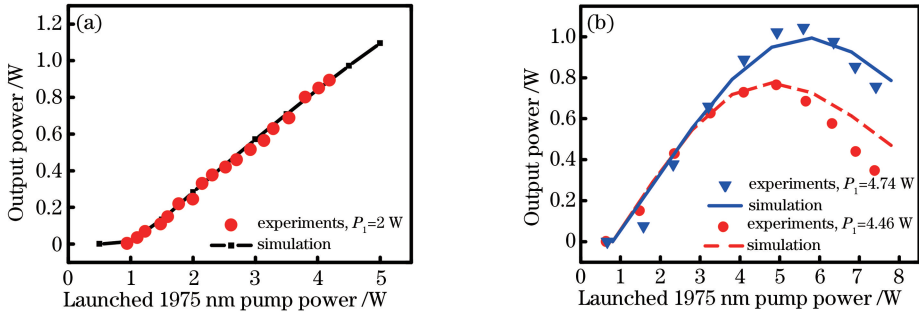


图 2 实验结果和模拟结果对比。(a) H2016 实验结果和本文模拟结果;(b) M2017 实验结果和本文模拟结果  
Fig. 2 Comparison between experimental results and simulations. (a) H2016 experimental results and simulations in this paper; (b) M2017 experimental results and simulations in this paper

2 W,  $P_2 = 6$  W,  $R_{s210} = 0.99$ ,  $R_{s21L} = 0.5$ ,  $R_{s430} = 0.99$ ,  $R_{s43L} = 0.5$ , 不考虑反向传输的泵浦光,  $P_2$  的重叠因子设为  $\Gamma_{p2} = 0.75$ 。图中标明了  $3.5 \mu\text{m}$  激光功率和  $2.8 \mu\text{m}$  激光功率的曲线。可见,在连续泵浦下,激光振荡产生初始会出现幅度剧烈变化的高频脉冲信号,随后发展成连续波谐振。在 10 ms 前,  $3.5 \mu\text{m}$  激光功率随时间迅速增大,而在 10 ms 后激光功率趋于稳定,至 15 ms 后功率基本不随时间变化。计算时改变泵浦功率、腔镜反射率等外部输入条件会影响功率达到稳定的时间,但功率均在 20 ms 内达到稳定状态,这与  $N_1 \sim N_6$  能级中最长的能级寿命约为 10 ms 相关。图 3 中  $2.8 \mu\text{m}$  激光先于  $3.5 \mu\text{m}$  激光出现,在  $3.5 \mu\text{m}$  激光振荡出现时,  $2.8 \mu\text{m}$  激光受其影响发生第二次脉冲振荡。计算发现,  $2.8 \mu\text{m}$  和  $3.5 \mu\text{m}$  激光振荡发生的先后顺序与腔镜反射率相关,提高  $2.8 \mu\text{m}$  激光的腔镜反射率能使  $2.8 \mu\text{m}$  振荡的出现时间提前,降低  $2.8 \mu\text{m}$  激光的腔镜反射率能使  $2.8 \mu\text{m}$  激光的出现时间晚于  $3.5 \mu\text{m}$  激光或者不发生振荡。

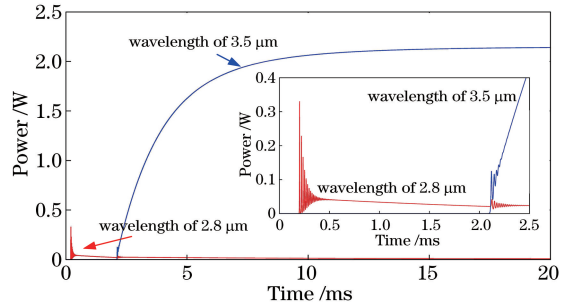


图 3 典型的  $3.5 \mu\text{m}$  激光振荡形成过程的计算结果  
Fig. 3 Simulation results of a typical  $3.5 \mu\text{m}$  laser oscillating generation process

能级粒子数密度和信号光功率、泵浦光功率。图 4 中横坐标表示所在光纤分段,  $S_{43}$  为  $3.5 \mu\text{m}$  激光。由图 4(a)可知,  $N_4$  和  $N_3$  之间、 $N_2$  和  $N_1$  之间有粒子数反转,这两组粒子数反转形成  $3.5 \mu\text{m}$  和  $2.8 \mu\text{m}$  的激光振荡。由图 4(b)可知,  $1975 \text{ nm}$  泵浦光在经过光纤后绝大部分被吸收,而  $975 \text{ nm}$  泵浦光只有  $1/4$  左右被吸收,这是因为  $1975 \text{ nm}$  泵浦光被耦合进 Er:ZBLAN 光纤的纤芯,而  $975 \text{ nm}$  泵浦光被耦合到包层,导致  $1975 \text{ nm}$  泵浦光的重叠因子较高,吸收较强。

图 4 为达到稳定状态后,光纤内不同位置的各

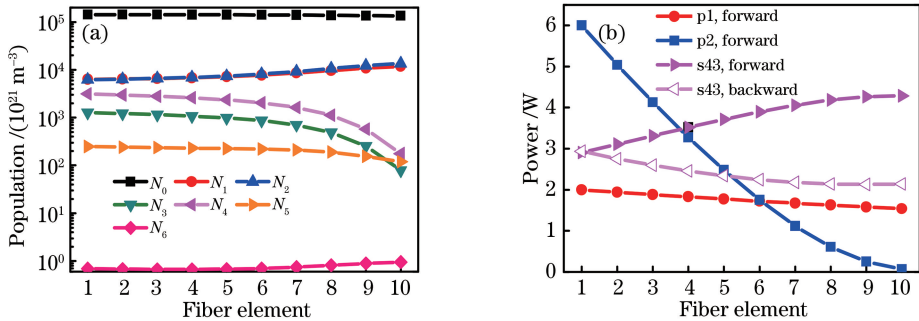


图 4 光纤不同位置处粒子数密度和信号光、泵浦光功率。

(a) 稳定连续振荡时各能级粒子数密度;(b) 信号光、泵浦光功率随位置的变化

Fig. 4 Particle density, signal and pump power at different fiber positions. (a) Particle density of each energy level when continuous oscillation is steady; (b) signal and pump power at each fiber element

图 5 为泵浦光的重叠因子对 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率的影响。泵浦功率和谐振腔镜反射率设定为  $P_1 = 2 \text{ W}$ ,  $P_2 = 6 \text{ W}$ ,  $R_{s210} = 0$ ,  $R_{s21L} = 0$ ,  $R_{s430} = 0.99$ ,  $R_{s43L} = 0.8$ , 其他计算参数源于 MALOUF2016-table II。计算  $\Gamma_{p1}$  的影响时, 认为纤芯半径保持不变为 8.25  $\mu\text{m}$ , 通过改变包层半径以改变 975 nm 的重叠因子。计算  $\Gamma_{p2}$  的影响时, 纤芯半径保持不变为 8.25  $\mu\text{m}$ , 包层保持不变为 125  $\mu\text{m}$ , 假定通过改变耦合光路可以改变 1975 nm 泵浦光的功率填充因子。因为 975 nm 泵浦光被耦合进包层, 而 1975 nm 泵浦光大部分被耦合进纤芯, 所以计算中  $\Gamma_{p1}$  的最大值 (0.018) 比  $\Gamma_{p2}$  的最大值 (0.9) 小。由图 5(a) 可知, 975 nm 泵浦吸收率低于 50%, 由 (8) 式和后文分析可知, 即便大部分 975 nm 泵浦光未被吸收, 但是较高的

975 nm 泵浦功率有利于形成 3.5  $\mu\text{m}$  激光振荡。1975 nm 残余泵浦功率曲线在  $\Gamma_{p1}$  小于 0.004 的区间内迅速降低, 表明在  $\Gamma_{p1}$  较小时, 尽管 975 nm 泵浦吸收变化较缓慢, 但是较小的 975 nm 泵浦吸收变化仍会对 1975 nm 泵浦吸收产生明显影响。由图 5(a) 和 5(b) 可知, 在  $\Gamma_{p1}$  和  $\Gamma_{p2}$  较小时, 激光功率随  $\Gamma_{p1}/\Gamma_{p2}$  增大迅速增大至最大值, 而后激光功率随  $\Gamma_{p1}/\Gamma_{p2}$  的继续增大略有下降, 其原因是在  $\Gamma_{p1}/\Gamma_{p2}$  较小时, 大量的 1975 nm 泵浦光没有被吸收, 使得 3.5  $\mu\text{m}$  激光输出功率较弱; 而随着  $\Gamma_{p1}/\Gamma_{p2}$  的增大, 1975 nm 泵浦光的吸收增强使得 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率增强; 继续增大  $\Gamma_{p1}/\Gamma_{p2}$  直至绝大部分 1975 nm 泵浦均被吸收, 反而会使得大部分泵浦光被前半段光纤吸收而后半段光纤中泵浦光较弱, 造成 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率下降。

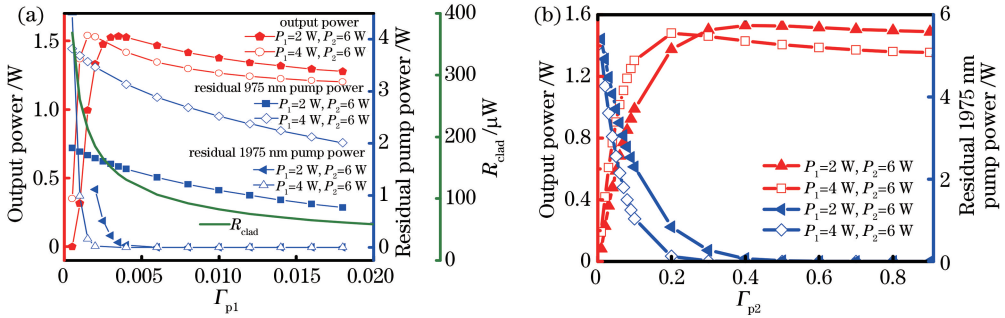


图 5 泵浦光的重叠因子对 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率的影响。(a)  $\Gamma_{p1}$ ; (b)  $\Gamma_{p2}$

Fig. 5 Influence of overlap factor on the 3.5  $\mu\text{m}$  laser power. (a)  $\Gamma_{p1}$ ; (b)  $\Gamma_{p2}$

图 6 为在不同 1975 nm 泵浦功率下, 改变 975 nm 泵浦光功率对 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率的影响。泵浦功率和谐振腔镜反射率设定为  $R_{s210} = 0$ ,  $R_{s21L} = 0$ ,  $R_{s430} = 0.99$ ,  $R_{s43L} = 0.4$ ,  $P_2$  的重叠因子  $\Gamma_{p2}$  设为 0.3, 其他计算参数源于 MALOUF2016-table II。由图 6(a) 可知, 达到阈值后, 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率最初随 975 nm 泵浦功率增大而迅速增大; 继续增大 975 nm 泵浦功率, 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率在达到最大值后基本保持稳定, 因为 975 nm 泵浦功率增大到一定

程度后, 1975 nm 泵浦功率保持不变, VGSA 达到饱和后, 不能将更多的粒子运输到  $^4F_{9/2}$  能级。对比图 6(a) 和 (b) 的结果可知, 在考虑  $\text{ESA}_2$  过程后, 1975 nm 泵浦功率越大, 则 975 nm 泵浦功率的阈值越高, 这是因为 1975 nm 泵浦光的增强使得  $\text{ESA}_2$  过程更强, 通过两级泵浦到激光能级  $^4F_{9/2}$  的粒子会被激发至  $^4F_{7/2}$  能级, 使得在  $^4F_{9/2}$  和  $^4I_{9/2}$  能级间不能产生足够的粒子数反转而形成 3.5  $\mu\text{m}$  激光振荡。而不考虑  $\text{ESA}_2$  时, 975 nm 的泵浦阈值与 1975 nm 泵浦功率强

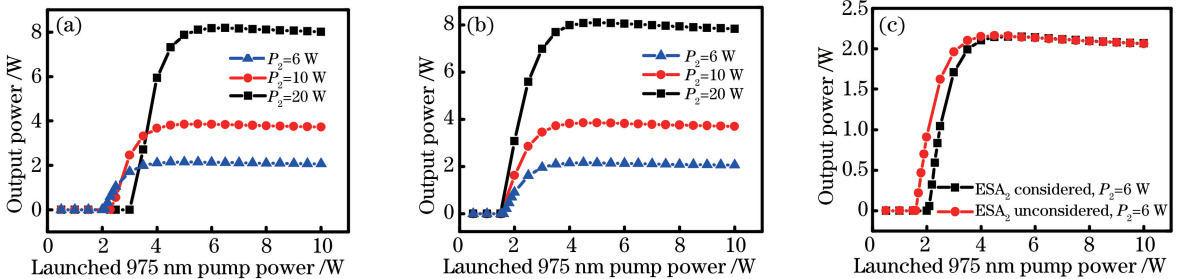


图 6 3.5  $\mu\text{m}$  输出功率随 975 nm 泵浦功率变化曲线。(a) 有  $\text{ESA}_2$  影响; (b) 无  $\text{ESA}_2$  影响; (c)  $P_2 = 6 \text{ W}$  时有/无  $\text{ESA}_2$  对比

Fig. 6 3.5  $\mu\text{m}$  laser power as a function of 975 nm pump power. (a) With  $\text{ESA}_2$ ; (b) without  $\text{ESA}_2$ ; (c) comparison between with and without  $\text{ESA}_2$  when  $P_2 = 6 \text{ W}$

弱无关。由图 6(c)可知,当 975 nm 泵浦功率高于泵浦阈值但是未达到饱和状态时,两条曲线的差值最大,说明在此区间  $ESA_2$  的影响最明显。

图 7 为在不同 975 nm 泵浦功率下,改变 1975 nm 泵浦功率对 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率的影响。除耦合率和泵浦功率外其他计算条件同上文,计算中考虑  $ESA_2$  作用。可见,在 1975 nm 泵浦功率超过阈值后,3.5  $\mu\text{m}$  激光功率最初随 1975 nm 泵浦功率的增大呈近似线性增大;当 1975 nm 泵浦光继续增强,明显强于 975 nm 泵浦光时, $ESA_2$  立即产生显著影响,大量  $^4F_{9/2}$  能级的粒子被激发到更高能级,功率曲线出现拐点,至 VGSA 和  $ESA_2$  相对均衡时,3.5  $\mu\text{m}$  激光功率达到最大;1975 nm 泵浦功率继续增大,3.5  $\mu\text{m}$  激光功率降低直至熄灭,出现淬灭现象,如图 7 中  $P_1=2\text{ W}$  和  $P_1=2.5\text{ W}$  曲线。对比不同 975 nm 泵浦功率的曲线,曲线线性段斜率随 975 nm 泵浦光功率的增大呈现先增大后平稳的趋势。

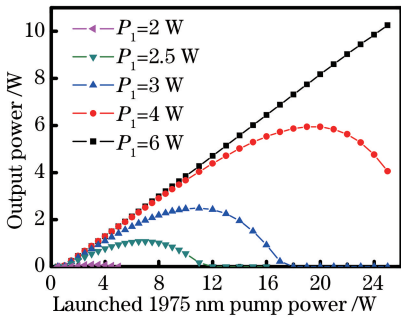


图 7 3.5  $\mu\text{m}$  输出功率随 1975 nm 泵浦功率变化曲线

Fig. 7 3.5  $\mu\text{m}$  laser power as a function of 1975 nm pump power

图 8 为输出镜反射率对 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率的影响。除耦合率和泵浦功率外其他计算参数同上文。可见,耦合率对输出功率有较大影响,在 975 nm 泵浦较弱时,输出镜反射率较低难以起振。存在最佳输出镜反射率使得输出功率最大,增大 975 nm 和 1975 nm 的泵浦功率都会使最佳输出镜反射率减小。

图 9 为不同光纤长度和输出镜反射率时 3.5  $\mu\text{m}$  激光的输出功率和效率。975 nm 泵浦功率设为  $P_1=6\text{ W}$ ,其他计算参数同图 6。可见,在光纤长度较短和输出镜反射率较低时,在 1975 nm 泵浦功率较低时会发生由  $ESA_2$  导致的淬灭现象,而当光纤较长或输出镜反射率较高时, $ESA_2$  的影响在 1975 nm 泵浦功率较大时才会出现。在  $ESA_2$  影响不显著时,输出镜反射率和光纤长度的变化对

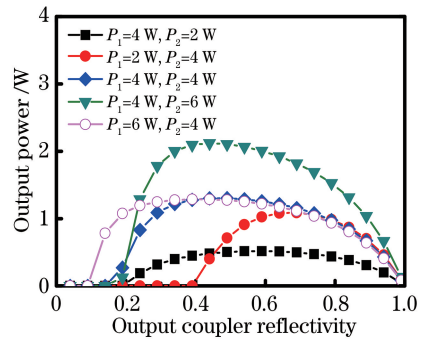


图 8 输出镜反射率对 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率的影响

Fig. 8 Impact of output coupler reflectivity on 3.5  $\mu\text{m}$  laser power

1975 nm 泵浦阈值和 3.5  $\mu\text{m}$  激光斜效率的影响较小,由图 9(d)可见,输出镜反射率从 20% 提升至 40%、光纤长度从 2.8 m 增加至 4.5 m 时,泵浦阈值的变化仅为 0.2~0.4 W,斜效率的变化小于 5%,这说明输出镜反射率和光纤长度在较大范围内变化时,激光器均能保持较高的激光效率。在本实验条件下,光纤长度约为 3 m,输出镜反射率约为 30% 时,激光器效率最高。

H2016 和 M2017 两篇文献在离子间相互作用参数上差别较大。H2016 中为弱相互作用值, M2017 中为强相互作用值<sup>[19]</sup>,二者取值所决定的区间基本涵盖离子间相互作用参数可能的变化范围。图 10 为离子间相互作用参数对 3.5  $\mu\text{m}$  激光功率的影响。泵浦功率和谐振腔镜反射率设定为  $P_1=4\text{ W}, P_2=6\text{ W}, R_{s210}=0, R_{s21L}=0, R_{s430}=0.99, R_{s43L}=0.8$ ,除  $W_{1103}, W_{2206}, W_{4251}$  和  $W_{5031}$  外,其他计算参数同上文。图 10 中最左侧的点的横坐标值源于 H2016,最右侧点的横坐标值源于 M2017。可见,两篇文献的离子间相互作用参数尽管有量级上的差异,但是对输出功率影响较小。在本文计算条件下, $W_{2206}$  参数对输出功率影响最大,但也仅有约 0.05 W 的影响。

## 4 结 论

基于双波长泵浦的 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光器建立包含时间和空间的二维模型,并用有限差分法进行了数值模拟。模型计算结果与文献报道的实验结果吻合较好,表明模型准确有效。研究了 975 nm 和 1975 nm 泵浦功率变化对输出功率的影响,获得了最佳输出镜反射率。本文的数值模拟对深入理解双波长泵浦 3.5  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN 光纤激光器的动力学过程、优化激光器设计有意义。该模拟

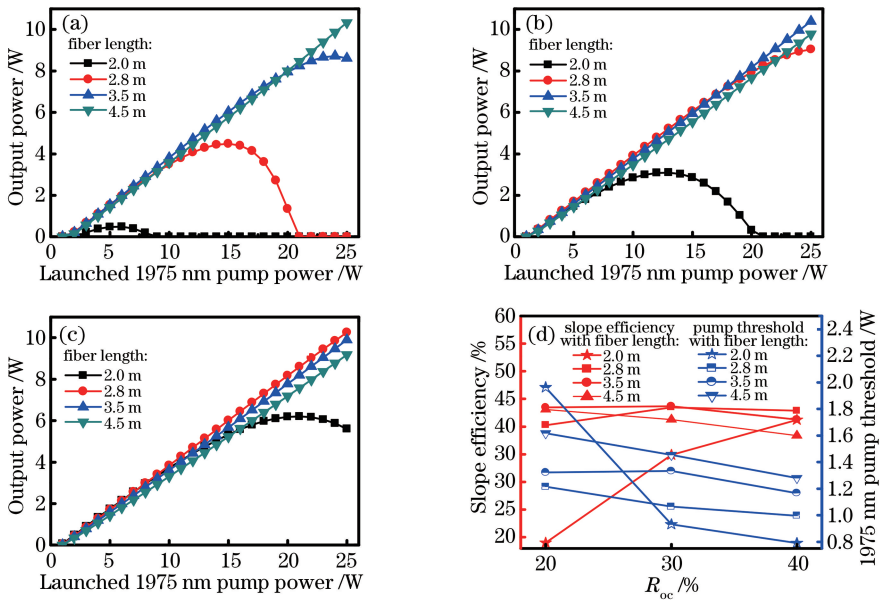


图 9 不同光纤长度和输出镜反射率时 3.5 μm 激光的输出功率和效率。

(a)  $R_{oc} = 20\%$ ; (b)  $R_{oc} = 30\%$ ; (c)  $R_{oc} = 40\%$ ; (d) 斜率和阈值

Fig. 9 3.5 μm laser output power and efficiencies with different fiber lengths and output coupler reflectivities.

(a)  $R_{oc} = 20\%$ ; (b)  $R_{oc} = 30\%$ ; (c)  $R_{oc} = 40\%$ ; (d) slope efficiencies and pump thresholds

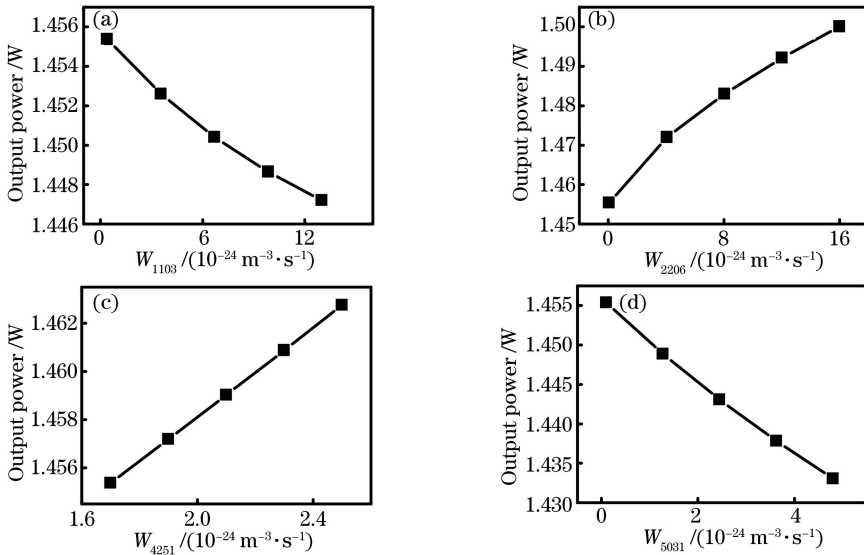


图 10 离子间相互作用参数对 3.5 μm 激光功率的影响。(a)  $W_{1103}$ ; (b)  $W_{2206}$ ; (c)  $W_{4251}$ ; (d)  $W_{5031}$

Fig. 10 Impacts of interionic interaction on 3.5 μm laser power. (a)  $W_{1103}$ ; (b)  $W_{2206}$ ; (c)  $W_{4251}$ ; (d)  $W_{5031}$

结果引出了若干值得进一步研究的问题,如 3.5 μm 和 2.8 μm 同时振荡的条件、是否能实现 3.5 μm 和 2.8 μm 激光功率比例的控制,泵浦波长改变对输出特性的影响,信号光波长在 3.5 μm 波段调谐时输出特性的变化等。

参 考 文 献

[1] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser [J]. Nature Photonics,

2012, 6(7): 423-431.

[2] Petersen C R, Miller U, Kubat I, *et al.* Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4-13.3 μm molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre [J]. Nature Photonics, 2014, 8(11): 830-834.

[3] Shen Y L, Wang Y S, Chen H W, *et al.* High average power continuous wave mode-locked mid-infrared fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0615001.

沈炎龙, 王屹山, 湛鸿伟, 等. 高平均功率连续锁模



- 中红外光纤激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0615001.
- [4] Henderson-Sapir O, Jackson S D, Ottaway D J. Versatile and widely tunable mid-infrared erbium doped ZBLAN fiber laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1676-1679.
- [5] Fortin V, Bernier M, Bah S T, *et al.* 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2882-2885.
- [6] Tokita S, Hirokane M, Murakami M, *et al.* Stable 10 W Er: ZBLAN fiber laser operating at 2.71-2.88  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 3943-3945.
- [7] Liu J, Wu M, Huang B, *et al.* Widely wavelength-tunable mid-infrared fluoride fiber lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1-7.
- [8] Többen H. CW lasing at 3.45  $\mu\text{m}$  in erbium-doped fluorozirconate fibres [J]. Frequenz, 1991, 45 (9/10): 250-253.
- [9] Többen H. Room temperature CW fibre laser at 3.5  $\mu\text{m}$  in Er<sup>3+</sup>-doped ZBLAN glass[J]. Electronics Letters, 1992, 28(14): 1361-1362.
- [10] Henderson-Sapir O, Munch J, Ottaway D J. Mid-infrared fiber lasers at and beyond 3.5  $\mu\text{m}$  using dual-wavelength pumping[J]. Optics Letters, 2014, 39 (3): 493-496.
- [11] Fortin V, Maes F, Bernier M, *et al.* Watt-level erbium-doped all-fiber laser at 3.44  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 559-562.
- [12] Maes F, Fortin V, Bernier M, *et al.* 5.6 W monolithic fiber laser at 3.55  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2017, 42(11): 2054-2057.
- [13] Qin Z P, Xie G Q, Ma J G, *et al.* Mid-infrared Er: ZBLAN fiber laser reaching 3.68  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(11): 111402.
- [14] Qin Z P, Hai T, Xie G Q, *et al.* Black phosphorus Q-switched and mode-locked mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser at 3.5  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. Optics Express, 2018, 26(7): 8224-8231.
- [15] Luo H Y, Yang J, Liu F, *et al.* Watt-level gain-switched fiber laser at 3.46  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1367-1375.
- [16] Malouf A, Henderson-Sapir O, Gorjan M, *et al.* Numerical modeling of 3.5  $\mu\text{m}$  dual-wavelength pumped erbium-doped mid-infrared fiber lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2016, 52 (11): 1100412.
- [17] Maes F, Fortin V, Bernier M, *et al.* Quenching of 3.4  $\mu\text{m}$  dual-wavelength pumped erbium doped fiber lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017, 53(2): 1600208.
- [18] Cai R X. Theoretical and experimental research of the high energy actively Q-switched pulsed fiber lasers [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 31.  
蔡润轩. 高能量主动调 QZBLAN 脉冲光纤激光器的理论和实验研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017: 31.
- [19] Henderson-Sapir O, Munch J, Ottaway D J. New energy-transfer upconversion process in Er<sup>3+</sup>: ZBLAN mid-infrared fiber lasers [J]. Optics Express, 2016, 24(7): 6869-6883.