

文章编号: 1000-7032(2024)02-0334-09

## 中红外掺铒氟化物光纤连续激光器及其数值分析

杨雪莹<sup>1</sup>, 刘永岩<sup>1</sup>, 田颖<sup>1\*</sup>, 蔡恩林<sup>2,3,4</sup>,  
李兵朋<sup>1</sup>, 徐时清<sup>1</sup>, 张军杰<sup>1</sup>, 黄飞飞<sup>1</sup>

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 光电材料与器件研究院, 浙江 杭州 310018;  
2. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800;  
3. 中国科学院 上海高等研究院, 上海 201210; 4. 中国科学院大学, 北京 101408)

**摘要:** 基于产生 3  $\mu\text{m}$  中红外激光的  $\text{Er}^{3+}$  能量转换过程与能级体系, 建立了掺铒氟化物光纤激光器的速率方程和传输方程, 系统地研究了泵浦结构和光纤长度对输出功率、斜率效率以及腔内泵浦和激光功率分布的影响, 为后续的实验提供理论依据。仿真确定了小泵浦功率的光纤激光器理想的光纤长度为 4~8 m, 最终实验选择 4.7 m 光纤完成了中红外掺铒氟化物光纤激光器连续激光输出光路的搭建, 在泵浦功率为 5 W、中心波长为 2.797  $\mu\text{m}$  处实现了最大功率 1.038 W、斜率效率 20.4% 的连续激光输出。

**关键词:** 中红外; 氟化物光纤激光器; 速率方程; 连续激光

中图分类号: TN248 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20230246

## Mid-infrared Erbium Doped Fluoride Fiber Continuous Laser and Its Numerical Analysis

YANG Xueying<sup>1</sup>, LIU Yongyan<sup>1</sup>, TIAN Ying<sup>1\*</sup>, CAI Enlin<sup>2,3,4</sup>, LI Bingpeng<sup>1</sup>,  
XU Shiqing<sup>1</sup>, ZHANG Junjie<sup>1</sup>, HUANG Feifei<sup>1</sup>

(1. Institute of Optoelectronic Materials and Devices, Hangzhou College of Optics and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;  
2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;  
3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China;  
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

\* Corresponding Author, E-mail: tianyingcjl@163.com

**Abstract:** Based on the energy conversion and energy level system of  $\text{Er}^{3+}$  for generating 3  $\mu\text{m}$  mid-infrared laser, rate equations and transmission equations for erbium doped fluoride fiber laser were established. The study systematically investigated the effects of pump structure and fiber length on output power, slope efficiency, as well as the distribution of pump and laser power within the cavity, providing a theoretical foundation for subsequent experiments. The ideal fiber length for the fiber laser with low pump power was determined through simulations, falling in the range of 4–8 m. Ultimately, in the experimental setup, a 4.7 m fiber was chosen for the construction of a continuous-wave mid-infrared erbium-doped fluoride fiber laser. This setup achieved a maximum output power of 1.038 W at a pump power of 5 W and a central wavelength of 2.797  $\mu\text{m}$ , with a slope efficiency of 20.4%.

**Key words:** mid infrared; erbium-doped fluoride fiber laser; rate equation; CW laser

收稿日期: 2023-10-26; 修订日期: 2023-11-15

基金项目: 浙江省自然科学基金(LZ21F050002, LZ22E020001); 国家自然科学基金(62374153, 62075204, U190920054); 浙江省“高层次人才特殊支持计划”科技创新领军人才项目(2021R52032); 浙江省高校基本科研业务费(2023YW93)  
Supported by Zhejiang Natural Science Fund(LZ21F050002, LZ22E020001); National Natural Science Foundation of China(62374153, 62075204, U190920054); Zhejiang Province's "Special Support Plan for High Level Talents" Science and Technology Innovation Leading Talent Project(2021R52032); Fundamental Research Funds for the Provincial Universities of Zhejiang(2023YW93)

## 1 引言

中红外激光覆盖众多重要的分子振动的指纹区,同时位于大气最高透射窗口和热辐射能量集中波段,可应用于国防军事、医疗检测、基础科学、航空航天等领域<sup>[1-5]</sup>。产生中红外激光的主要途径有掺杂离子直接激发<sup>[6]</sup>、半导体激光器<sup>[7]</sup>、气体激光器<sup>[8]</sup>及非线性频率转换<sup>[9]</sup>,与其他方式相比,掺杂离子直接激发的方式产生的光束质量高、结构紧凑、对环境污染小。根据掺杂介质的不同,基于稀土离子掺杂的激光器可以分为固体激光器和光纤激光器。与固体相比,光纤表面积与体积比更大,使其具有良好的散热性能,大大减少了增益介质受到高功率激光泵浦带来的热损伤。此外,光纤具有特殊的波导结构,可以实现更高光光转换效率、输出功率以及更好光束质量的激光输出。尤其是双包层有源光纤,其特殊的双波导结构将泵浦光限制在大直径双包层内部传播,激光被限制在小直径纤芯中传播可以得到高光束质量和小光斑直径的激光,大大提升激光器的输出功率。常用的中红外光纤有重金属氧化物光纤<sup>[10]</sup>、硫化物光纤、氟化物光纤,与其他光纤相比,氟化物光纤具备多项优越特性,包括理论上的超低传输损耗、较低的声子能量以及较高的稀土离子溶解度。ZBLAN光纤作为氟化物光纤的一种,典型配比为 $ZrF_4$ (53%)、 $BaF_2$ (20%)、 $LaF_3$ (4%)、 $AlF_3$ (4%)和 $NaF$ (20%)。在中红外波段,常用的稀土掺杂离子有 $Ho^{3+}$ 、 $Dy^{3+}$ 、 $Er^{3+}$ 。 $Ho^{3+}$ :ZBLAN光纤可以实现最长的输出波长(3.92  $\mu m$ )<sup>[11]</sup>;  $Dy^{3+}$ :ZBLAN光纤可实现最宽的波长调谐范围(2.8~3.4  $\mu m$ )<sup>[12]</sup>;  $Er^{3+}$ :ZBLAN光纤可实现最高的输出功率(41 W)<sup>[13]</sup>。掺铒氟化物光纤激光器常用于产生3  $\mu m$ 激光,包括连续激光和脉冲激光,连续激光器能够实现稳定且高平均功率的激光输出。

随着泵浦源半导体激光器功率的不断加大、光束质量的不断优化以及双包层光纤的广泛使用,3  $\mu m$ 掺铒氟化物光纤激光器的输出功率也显著提升<sup>[14]</sup>,全光纤耦合和空间光耦合是实现连续掺铒氟化物光纤激光器的两种主要方式。2009年,日本的Tokita等<sup>[15]</sup>采用液体散热法对光纤散热,最终实现了24 W的连续激光输出,这也是目前空间耦合3  $\mu m$ 波段 $Er^{3+}$ :ZBLAN光纤激光器所

报道的最高输出功率。2018年,Aydin等<sup>[13]</sup>采用全光纤结构,用两个布拉格光栅(FBG)代替空间光结构中的反射镜,通过在增益光纤上刻蚀FBG的方式,在中心波长2.82  $\mu m$ 处实现了41.6 W的连续激光输出,这是目前3  $\mu m$ 波段 $Er^{3+}$ :ZBLAN光纤激光器所报道的最高输出功率。

随着光纤激光器在激光加工、测量等领域的广泛应用及人们对高功率输出和高光束质量的需求,激光器设计和优化变得越来越重要。激光速率方程是研究激光动力学过程的关键,可以根据速率方程分析激射阈值、输出功率、光纤长度及其之间的关系,并且还可以根据计算结果优化谐振腔结构,为激光器设计提供有力保障。2014年,电子科技大学李剑峰等<sup>[16]</sup>建立级联 $Er^{3+}/Ho^{3+}$ 共掺氟化物光纤激光器的理论模型,确定了氟化物光纤的最佳掺杂浓度及长度。2016年,南开大学王伟超等<sup>[17]</sup>根据速率方程和传输方程建立掺铒碲化物光纤激光器的理论模型,详细分析了泵浦结构和光纤长度对激光输出的影响。

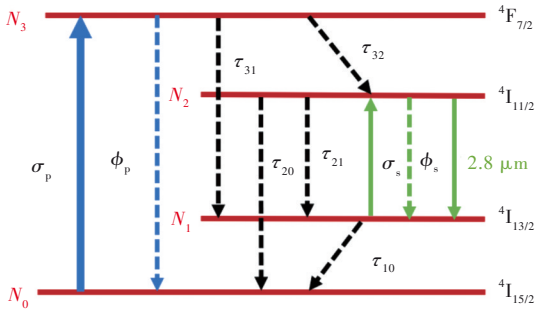
本文通过激光速率方程和传输方程建立数值模型并优化系统参数,探究谐振腔内的光功率分布、最佳光纤长度并对输出功率进行预测,根据优化后的参数搭建中红外掺铒氟化物连续光纤激光器。激光器的最大输出功率为1.038 W,斜率效率为20.4%。

## 2 实验仿真

激光速率方程是描述各能级上原子数以及腔内光子数随时间变化的微分方程,在光纤激光器的理论分析中具有重要作用。泵浦光和激光的吸收截面、发射截面、纤芯截面积、稀土离子的掺杂浓度以及能级寿命等参数是求解速率方程的关键参数,在复杂的激光模型中使用这些参数可以提前预测光纤激光器的性能。

当使用976 nm泵浦源,位于 $^4I_{15/2}$ 基态离子吸收泵浦光后跃迁至 $^4I_{11/2}$ 能级,通过受激辐射, $^4I_{11/2}$ 上的粒子跃迁至 $^4I_{13/2}$ 能级,产生3  $\mu m$ 激光。 $^4F_{7/2}$ 、 $^2H_{11/2}$ 、 $^4S_{3/2}$ 、 $^4F_{9/2}$ 、 $^4I_{9/2}$ 由于声子耦合而处于热平衡,因此简并为一个能级(由 $^4F_{7/2}$ 表示), $Er^{3+}$ 四能级结构如图1所示。

各个能级上的粒子数分别设定为 $N_0$ 、 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ ,对应的四能级速率方程如下<sup>[17]</sup>(忽略所有能级上转换):

图 1 Er<sup>3+</sup>四能级结构图Fig.1 Four-energy-level structure diagram of Er<sup>3+</sup>

$$\frac{dN_3}{dt} = I_p(N_0\sigma_p - N_3\sigma_s) - \frac{N_3}{\tau_3}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = I_s(N_0\phi_p + N_1\phi_s - N_2\phi_s) - \frac{N_2}{\tau_2} + \frac{N_3}{\tau_{32}}, \quad (2)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = I_s(N_2\phi_s - N_1\phi_p) - \frac{N_1}{\tau_1} + \frac{N_2}{\tau_{21}} + \frac{N_3}{\tau_{31}}, \quad (3)$$

$$N = N_0 + N_1 + N_2 + N_3, \quad (4)$$

其中  $\tau_i$  表示  $i$  能级的寿命,  $\tau_{ij}$  表示从  $i$  能级跃迁到  $j$  能级的辐射弛豫和非辐射弛豫,  $I_p$  和  $I_s$  表示泵浦

光和激光的光强,  $\sigma_p$  和  $\sigma_s$ <sup>[18]</sup> 表示泵浦光和输出激光的吸收截面,  $\phi_p$  和  $\phi_s$  表示泵浦光和输出激光的发射截面,  $N$  为 Er<sup>3+</sup> 的掺杂浓度。

为了求得更为简单准确的解析解, 学者们对激光速率方程进行了各种近似。对于腔长比较短的单包层光纤, 忽略泵浦光损耗系数<sup>[19]</sup>; 对于腔长比较长的双包层光纤, 忽略上能级粒子与泵浦光作用的再发射项<sup>[20-21]</sup>。然而, 在谐振腔腔长比较短或再发射项远大于泵浦光损耗系数的情况下, 这种完全舍去的做法是不精确的。保留再发射项的主要部分, 忽略更高阶的量, 可以有效提高微分方程的精度。同时, 简化双包层光纤激光器激光速率方程的求解, 对泵浦功率、输出激光功率及光纤长度三者之间的关系进行数值分析<sup>[22]</sup>。

对于一个简单的光纤激光器, 以靠近泵浦源的光纤一端为原点, 泵浦光传递方向为  $z$  轴正方向建立模型。泵浦在  $z = 0$  处, 输出信号在光纤的另一端  $z = L_{fb}$  收集, 如图 2 所示。泵浦功率和输出功率分别用  $P_p$  和  $P_s$  表示。

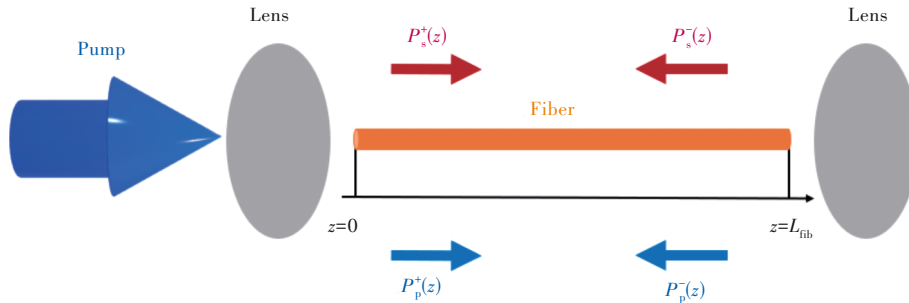


图 2 光纤激光器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of fiber laser structure

简化后的速率传输方程组如下:

$$\frac{dP_p^+(z)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_p N - (\sigma_p + \sigma_s)N_2(z)]P_p^+(z) - \alpha_p P_p^+(z), \quad (5)$$

$$\frac{dP_p^-(z)}{dz} = \Gamma_p[\sigma_p N - (\sigma_p + \sigma_s)N_2(z)]P_p^-(z) + \alpha_p P_p^-(z), \quad (6)$$

$$\frac{dP_s^+(z)}{dz} = \Gamma_s[(\phi_p + \phi_s)N_2(z) - \phi_p N]P_s^+(z) + \Gamma_s \phi_s N_2(z)P_0 - \alpha_s P_s^+(z), \quad (7)$$

$$\frac{dP_s^-(z)}{dz} = -\Gamma_s[(\phi_p + \phi_s)N_2(z) - \phi_p N]P_s^-(z) - \Gamma_s \phi_s N_2(z)P_0 - \alpha_s P_s^-(z), \quad (8)$$

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_p \Gamma_p}{h\nu_p A_c} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]\phi_p \Gamma_s}{h\nu_s A_c}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_p + \sigma_s)\Gamma_p}{h\nu_p A_c} + \frac{1}{\tau} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)](\phi_p + \phi_s)\Gamma_s}{h\nu_s A_c}}, \quad (9)$$

其中  $P_p^\pm(z)$  分别表示前向和后向泵浦光功率,  $P_s^\pm(z)$  分别表示前向和后向激光功率,  $\Gamma_p$  和  $\Gamma_s$  分别表示泵浦光和发射光吸收系数,  $\nu_p$  和  $\nu_s$  分别表

示泵浦光和激光频率,  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  分别表示泵浦光和激光的传输损耗,  $P_0$  表示假定的泵浦光功率,  $A_c$  表示纤芯的截面积,  $h$  为普朗克常量。

偏微分方程由以下边界条件求解:

$$P_p^+(z=0) = R_p(z=0)P_p^-(z=0) + (1 - R_p(z=0))P_{\text{pump}}, \quad (10)$$

$$P_p^-(z=L_{\text{fib}}) = R_p(z=L_{\text{fib}})P_p^+(z=L_{\text{fib}}), \quad (11)$$

$$P_s^+(z=0) = R_s(z=0)P_s^-(z=0), \quad (12)$$

$$P_s^-(z=L_{\text{fib}}) = R_s(z=L_{\text{fib}})P_s^+(z=L_{\text{fib}}), \quad (13)$$

其中  $L_{\text{fib}}$  是指光纤长度,  $R_p$  和  $R_s$  分别指泵浦光和信号光的反射率,  $P_{\text{pump}}$  代表泵浦功率。具体计算参数如表 1~2 所示<sup>[23-27]</sup>。

表 1 模拟参数

Tab. 1 Modeling Parameters

$\lambda_p/\text{nm}$	$\lambda_s/\mu\text{m}$	$\sigma_p/(10^{-25} \text{ m}^2)$	$\sigma_s/(10^{-25} \text{ m}^2)$	$\phi_p/(10^{-27} \text{ m}^2)$	$\phi_s/(10^{-25} \text{ m}^2)$	$\nu_p/\text{Hz}$	$\nu_s/\text{Hz}$	$A_c/(10^{-8} \text{ m}^2)$
976	2.8	1.69	1.69	1.76	7.6	3.073 8	107.14	4.71
$N/(10^{24} \text{ m}^{-3})$	$L_{\text{fib}}/\text{m}$	$\alpha_p/(10^{-4} \text{ m}^{-1})$	$\alpha_s/(10^{-4} \text{ m}^{-1})$	$\Gamma_p$	$\Gamma_s$	$R_1$	$R_2$	
8	4.7	1.38	1.08	0.1	0.1	0.99	0.04	

表 2 能级寿命和分支比<sup>[28]</sup>

Tab. 2 Level lifetime and branching ratios<sup>[28]</sup>

$\tau_0/\text{ms}$	$\tau_1/\text{ms}$	$\tau_2/\mu\text{s}$	$\tau_3/\mu\text{s}$	$\beta_{21}, \beta_{20}$	$\beta_{32}, \beta_{31}, \beta_{30}$
9	6.9	10	120	0.37, 0.63	0.99, 0.0, 0.01

常用的求解微分方程的方法主要有欧拉法、bvp4c 边界函数、梯形法、四阶龙格库塔等方法。四阶龙格库塔法具有精度高、计算量适中的优点, 适用于一些需要高精度求解的微分方程组。四阶龙格库塔解微分方程采用区间内 4 个点的平均斜率来近似  $[x_n, x_{n+1}]$  之间点的导数, 计算公式如下:

$$k_1 = f(x_n, y_n), \quad (14)$$

$$k_2 = f\left(x_{n+\frac{1}{2}}, y_n + \frac{a}{2}k_1\right), \quad (15)$$

$$k_3 = f\left(x_{n+\frac{1}{2}}, y_n + \frac{a}{2}k_2\right), \quad (16)$$

$$k_4 = f\left(x_{n+1}, y_n + \frac{a}{2}k_3\right), \quad (17)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{a}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \quad (18)$$

其中  $k_1, k_2, k_3, k_4$  指的是区间内 4 个点的平均斜率,  $a$  为步长。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 不同泵浦结构下光纤内光功率分布

根据泵浦光和激光的传播方向, 泵浦方式可以分为前向泵浦、后向泵浦及双向泵浦<sup>[29]</sup>。泵浦光与输出激光的传播方向相同为前向泵浦, 传播方向相反为后向泵浦, 当泵浦光分别从谐振腔的两个方向注入时为双向泵浦<sup>[27]</sup>。

在仿真过程中, 假定泵浦光的功率为  $P_p^+, P_p^-$

(10 W), 光纤长度为  $Z(8 \text{ m})$ , 并且在不同的泵浦配置中, 前腔和后腔反射镜的功率反射率保持不变。

图 3 描述了前向泵浦光纤时泵浦光和激光功率分布。从图中可以看出, 随着光纤长度的增加, 泵浦功率逐渐衰减, 这是腔内散射和吸收损耗增强的影响。正向传播的激光功率逐渐增加并在光纤末端附近达到最大值, 反向传播的激光和泵浦光在整个光纤中可以忽略不计。

后向泵浦的泵浦光功率也假定为 10 W。图 4 描述了后向泵浦光纤时泵浦光和激光功率分布。

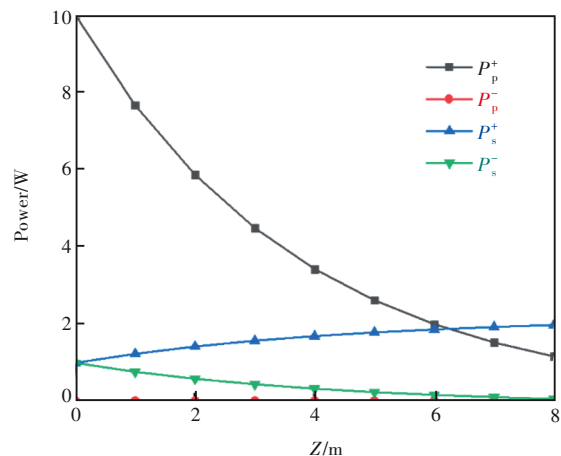


图 3 前向泵浦时光纤内泵浦光和激光功率分布

Fig.3 Forward pumping in optical fiber results in the distribution of pump light and laser power



从图中可以看出,随着泵浦功率和光纤长度的增加,输出激光的功率逐渐增加。与前向泵浦(1.973 W)相比,后向泵浦的最大激光输出功率(1.976 W)略高于前向泵浦,反向激光的变化趋势与前向泵浦中正向激光变化趋势一致。

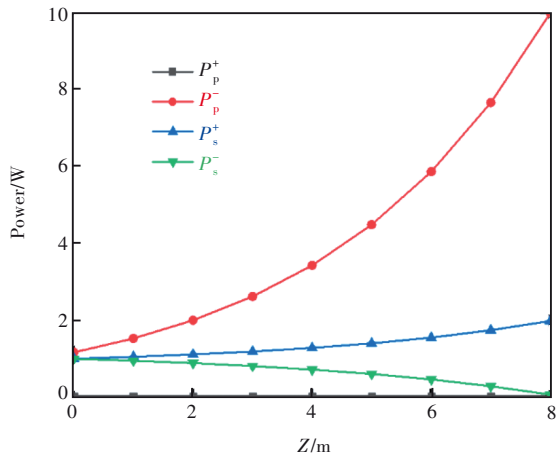


图 4 后向泵浦时光纤内泵浦光和激光功率分布

Fig.4 Backward pumping in optical fiber results in the distribution of pump light and laser power

双向泵浦光纤时泵浦光和激光功率分布如图 5 所示,双向泵浦的泵浦光功率假定为 5 W,双向泵浦的输出功率(1.978 W)略高于前向泵浦和后向泵浦。

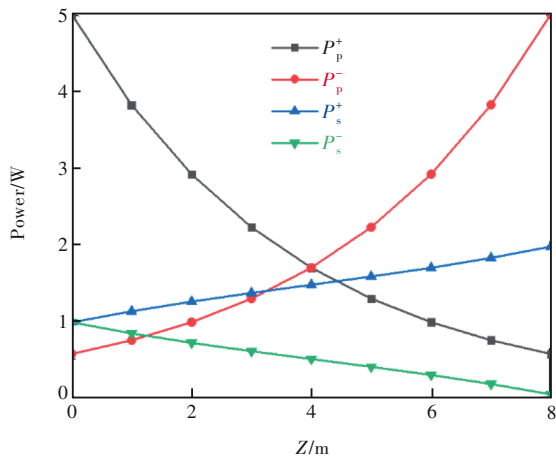


图 5 双向泵浦时光纤内泵浦光和激光功率分布

Fig.5 Bidirectional pumping in optical fiber results in the distribution of pump light and laser power

### 3.2 输出功率随光纤长度的变化

对光纤激光器来说,光纤参数的选择至关重要。以前向泵浦为例,输出功率随光纤长度的变化趋势如图 6 所示。

图 6 描述了不同正向泵浦功率下光纤长度对输出功率的影响。从整体可以看出,随着光纤长

度的增加,输出功率增加。光纤长度小于 4 m 时,输出功率随光纤长度的变化趋势比较明显,这表明短长度的光纤对泵浦功率的吸收较强;4~8 m 时,变化趋势相对平缓;8 m 以后,增加速度非常缓慢。因此对于小泵浦功率的光纤激光器来说,理想的光纤长度为 4~8 m,既得到了比较高的输出功率,又可以避免较长的光纤带来的损耗以及光纤处理上的不便<sup>[30]</sup>。根据图 6 的变化趋势,最佳光纤长度随着泵浦功率的增加而增加,因此可以推测,如果泵浦功率进一步增加,最佳光纤长度将向更大的值移动。

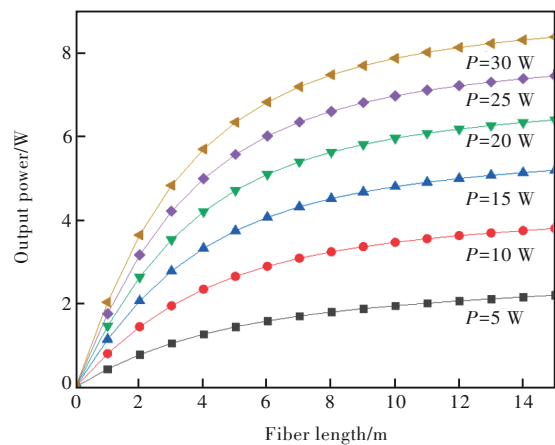


图 6 不同泵浦功率下输出功率随光纤长度的变化曲线

Fig.6 Variation curve of output power with fiber length under different pump power

因此本实验选择 4.7 m 的光纤,采用后向泵浦的方式,假定泵浦光功率为 5 W。由图 6 可知,当泵浦功率为 5 W、光纤长度 4.7 m 时,输出功率为 1.346 W,斜率效率为 26.9%。因此对于光纤激光器的输出功率而言,泵浦功率的大小和输出功率的变化情况决定着最佳光纤长度。根据确定的光纤长度和预测的输出功率来搭建掺铒氟化物连续光纤激光器光路。

### 3.3 最优光纤长度下的实验结构

根据仿真结果,为了获得更高输出功率,本实验选取 4.7 m 的氟化物光纤。当泵浦功率为 5 W 时,可以实现 1.346 W 的连续激光输出。掺铒氟化物光纤激光器光路图如图 7 所示。泵浦源为带尾纤中心波长为 976 nm 的半导体激光器,最大输出功率为 30 W,尾纤的芯径和数值孔径为 105  $\mu\text{m}$  和 0.22。泵浦源输出的发散光经过耦合聚焦系统(DAHENG OPTICS, GCO-2901,耦合效率大于 92%)准直和聚焦后汇聚进光纤,相比于采用

非球面透镜组耦合聚焦的方式,这种集成的系统精度更高,光纤耦合效率也更高。实验所用的增益介质是法国 Le Verre Fluore 公司生产的一根长度为 4.7 m、Er<sup>3+</sup>掺杂浓度为 7% 的氟化物双包层光纤,型号为 ZFG SMDC。光纤纤芯的直径为 15  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.12,D 型内包层长短方向的直径分别为 240  $\mu\text{m}$  和 260  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.4,外包层的尺寸为 290  $\mu\text{m}$ 。由于氟化物光纤熔点低,随着泵浦功率的增加,热量在光纤端面堆积,因此本实验将光纤放置在刻有光纤槽的光纤水冷板上,水冷板的两侧为紫铜刻制的 U 型槽,用来对靠近光纤端面的部分进行散热。光纤两端被光纤卡头(BOCIC, PFA102)夹持,可以调节入射光角度,提高耦合效率。双包层氟化物光纤具有易碎易潮解等特性<sup>[31-32]</sup>,本实验采用化学腐蚀法对端面进行

处理。首先用无尘纸轻轻擦拭氟化物光纤两端,随后将其浸入二氯甲烷溶液 5 min,最后用无尘纸蘸取酒精将涂覆层剥掉。处理好的端面用光纤切割刀(PHOTON KINETICS, FK11)进行 0°角切割,切割后的端面具有 4% 的非涅耳反射率<sup>[33]</sup>。光学谐振腔由镀有介质膜(HT 976 nm( $T>90\%$ ), AR 2 700~2 940 nm( $R\geq 99.5\%$ ),  $\emptyset 1$ 英寸, AOI 为 45°)的二向色镜和平面镜(HT 976 nm( $T>90\%$ ), AR 2 700~2 940 nm( $R\geq 99.5\%$ ),  $\emptyset 1$ 英寸)以及光纤组成。泵浦光通过二向色镜进入光纤,在谐振腔中不断振荡。光纤末端紧贴平面镜,为激光振荡提供反馈;光纤始端作为输出端,输出的光由二向色镜接至功率计(OPHIR PHOTONICS, X13-12056)测量输出功率,接至中红外光谱仪(YOKOGAWA, AQ6377)测量输出光谱。

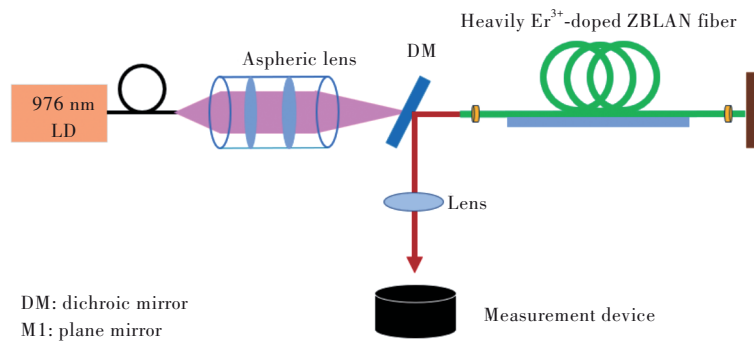


图7 掺铒氟化物连续光纤激光器结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of erbium doped fluoride continuous fiber laser structure

采用 OPHIR PHOTONICS 功率计测量了不同泵浦功率下的输出功率,激光的输出功率和斜率效率随泵浦功率的变化如图 8 所示。

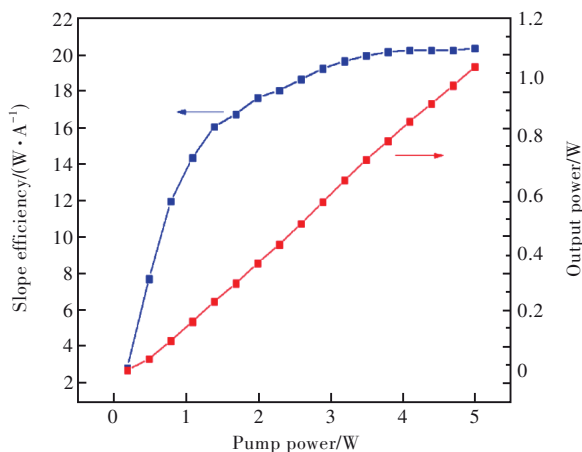


图8 输出功率和斜率效率随泵浦功率的变化关系

Fig.8 The relationship between output power and slope efficiency with pump power

调节泵浦功率,当泵浦功率为 0.6 W 时,可以得到不稳定的中红外连续激光输出,此时激光强度较低,输出激光功率为 46.6 mW。当泵浦功率为 0.9 W 时,获得了 108 mW 的中红外连续激光输出。继续增加泵浦功率,输出功率也逐渐增大。当泵浦功率为 5 W 时,激光器最大输出功率可以达到 1.038 W,此时激光器工作的斜率效率为 20.4%。当泵浦功率小于 3.6 W,斜率效率随着泵浦功率的增加呈上升趋势;当泵浦功率大于 3.6 W,斜率效率基本稳定在 20% 左右。后续实验将进一步提升泵浦功率。由于氟化物光纤熔点低,端面极易受损,当泵浦功率过高时,光纤中将会出现一定的热效应,此时输出功率达到饱和,斜率效率将会降低,甚至出现光纤受损影响使用的情况<sup>[34]</sup>。因此,实验水冷装置的优化是后续提高氟化物光纤的抗损伤阈值、提升输出功率的重要手段。

采用 YOKOGAWA 光谱仪测得了泵浦功率为

5 W 时的输出光谱,结果如图 9 所示。在泵浦功率为 0.6 W 时,观测到中心波长为 2 774.4 nm 的连续激光输出;而当泵浦功率增加至 1.5 W 时,中心波长变为 2 784.4 nm。由此发现,随着泵浦功率的增加,激光器的中心波长发生红移现象,即向长波方向移动。产生这种现象的原因是泵浦功率的增加导致腔内温度升高,进而影响激光器的工作特性。当泵浦功率为 3 W 时,输出光谱存在两个峰,其中心波长分别为 2 784.4 nm 和 2 795.6 nm,并且光谱有一定程度的展宽;继续增加泵浦功率,2 784.4 nm 的峰强度逐渐减弱,2 795.6 nm

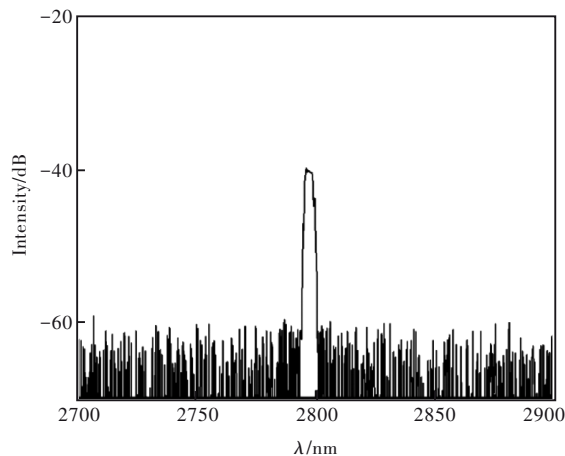


图 9 泵浦功率为 5 W 时的输出光谱

Fig.9 Output spectrum at pump power of 5 W

的峰强度逐渐增强;当泵浦功率为 4.2 W 时,2 784.4 nm 的峰完全消失,此时中心波长红移至 2 795.4 nm;中心波长在泵浦功率为 5 W 时变为 2 796.6 nm,谱宽约为 6 nm。

## 4 结 论

本文以激光速率方程和传输方程为基础,分析了正向泵浦、反向泵浦和双向泵浦时,腔内的光功率分布。并通过泵浦功率、输出功率、光纤长度三者间的变化情况确定了最佳光纤长度。实验通过 MATLAB 仿真确定了泵浦功率最高为 5 W 时,实验的最佳光纤长度为 4.7 m,预测输出功率为 1.346 W,斜率效率为 26.9%。根据仿真结果搭建光路,使用 976 nm 半导体激光器作为泵浦源,增益介质为高浓度掺铒氟化物光纤,采用平-平谐振腔结构,在中心波长 2.797  $\mu\text{m}$  处实现了 1.038 W 的连续激光输出,斜率效率为 20.4%。实验输出光谱宽度为 6 nm,约为 23 GHz。实验选取的光纤长度与测得的输出功率基本一致,根据仿真结果,继续增大泵浦功率,输出功率也会继续增加。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230246>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] JACKSON S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser [J]. *Nat. Photonics*, 2012, 6(7): 423-431.
- [ 2 ] 王瑞凤,张彦朴,许志艳. 激光技术军事应用的现状及发展趋势 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S1): 308-311.  
WANG R F, ZHANG Y P, XU Z Y. Present situation and developing trend of application of laser technique to military [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2007, 36(S1): 308-311. (in Chinese)
- [ 3 ] POPMINTCHEV T, CHEN M C, POPMINTCHEV D, *et al.* Bright coherent ultrahigh harmonics in the keV X-ray regime from mid-infrared femtosecond lasers [J]. *Science*, 2012, 336(6086): 1287-1291.
- [ 4 ] SEREBRYAKOV V A, BOĪKO Ě V, PETRISHCHEV N N, *et al.* Medical applications of mid-IR lasers. Problems and prospects [J]. *J. Opt. Technol.*, 2010, 77(1): 6-17.
- [ 5 ] 陈昊,李剑峰,欧中华,等. 中红外光纤激光器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(11): 111402.  
CHEN H, LI J F, OU Z H, *et al.* Progress of mid-infrared fiber lasers [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2011, 48(11): 111402. (in Chinese)
- [ 6 ] ROBINSON M, DEVOR D P. Thermal switching of laser emission of  $\text{Er}^{3+}$  at 2.69  $\mu\text{m}$  and  $\text{Tm}^{3+}$  at 1.86  $\mu\text{m}$  in mixed crystals of  $\text{CaF}_2:\text{ErF}_3:\text{TmF}_3$  [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, 10(5): 167-170.
- [ 7 ] BECK M, HOFSTETTER D, AELLEN T, *et al.* Continuous wave operation of a mid-infrared semiconductor laser at room temperature [J]. *Science*, 2002, 295(5553): 301-305.
- [ 8 ] CHALUS O, BATES P K, SMOLARSKI M, *et al.* Mid-IR short-pulse OPCPA with micro-Joule energy at 100 kHz [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(5): 3587-3594.

- [ 9 ] 陈育斌,王红岩,陆启生,等. 光抽运中红外气体激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 010005.  
CHEN Y B, WANG H Y, LU Q S, *et al.* Optically pumped mid-infrared gas lasers [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2015, 52(1): 010005. (in Chinese)
- [ 10 ] 孟祥伟,姚传飞,王善德,等.  $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺碲酸盐微结构光纤激光器[J]. 发光学报, 2015, 36(1): 94-98.  
MENG X W, YAO C F, WANG S D, *et al.*  $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  co-doped tellurite microstructure fiber lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1): 94-98. (in Chinese)
- [ 11 ] MAES F, FORTIN V, POULAIN S, *et al.* Room-temperature fiber laser at 3.92  $\mu\text{m}$  [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 761-764.
- [ 12 ] MAJEWSKI M R, WOODWARD R I, JACKSON S D. Dysprosium-doped ZBLAN fiber laser tunable from 2.8  $\mu\text{m}$  to 3.4  $\mu\text{m}$ , pumped at 1.7  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(5): 971-974.
- [ 13 ] AYDIN Y O, FORTIN V, VALLÉE R, *et al.* Towards power scaling of 2.8  $\mu\text{m}$  fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [ 14 ] 张新,舒世立,佟存柱. 3  $\mu\text{m}$ 波长Er:ZBLAN光纤激光器研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(8): 190070.  
ZHANG X, SHU S L, DONG C Z. Research progress of Er:ZBLAN fiber lasers at the wavelength of 3  $\mu\text{m}$  [J]. *Opto-Electron. Eng.*, 2019, 46(8): 190070. (in Chinese)
- [ 15 ] TOKITA S, MURAKAMI M, SHIMIZU S, *et al.* Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(20): 3062-3064.
- [ 16 ] LI J F, LUO H Y, LIU Y, *et al.* Modeling and optimization of cascaded erbium and holmium doped fluoride fiber lasers [J]. *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.*, 2014, 20(5): 15-28.
- [ 17 ] WANG W C, LI L X, CHEN D D, *et al.* Numerical analysis of 2.7  $\mu\text{m}$  lasing in  $\text{Er}^{3+}$ -doped tellurite fiber lasers [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 31761.
- [ 18 ] WANG B, CHENG L H, ZHONG H Y, *et al.* Excited state absorption cross sections of  $^4\text{I}_{13/2}$  of  $\text{Er}^{3+}$  in ZBLAN [J]. *Opt. Mater.*, 2009, 31(11): 1658-1662.
- [ 19 ] CHEN J, ZHU X, SIBBETT W. Rate-equation studies of erbium-doped fiber lasers with common pump and laser energy bands [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, 9(10): 1876-1882.
- [ 20 ] KELSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, 34(9): 1570-1577.
- [ 21 ] XIAO L M, YAN P, GONG M L, *et al.* An approximate analytic solution of strongly pumped Yb-doped double-clad fiber lasers without neglecting the scattering loss [J]. *Opt. Commun.*, 2004, 230(4-6): 401-410.
- [ 22 ] 段志春,陈建国,张利平,等. 双包层光纤激光器速率方程的解析求解问题[J]. 激光技术, 2007, 31(3): 274-276.  
DUAN Z C, CHEN J G, ZHANG L P, *et al.* Solution to rate equations of a double-clad fiber laser [J]. *Laser Technol.*, 2007, 31(3): 274-276. (in Chinese)
- [ 23 ] HUANG F F, LIU X Q, HU L L, *et al.* Spectroscopic properties and energy transfer parameters of  $\text{Er}^{3+}$ -doped fluorozirconate and oxyfluoroaluminate glasses [J]. *Sci. Rep.*, 2014, 4: 5053.
- [ 24 ] ZHANG F J, YAN W Y, LIANG S N, *et al.* Numerical study on the soliton mode-locking of the  $\text{Er}^{3+}$ -doped fluoride fiber laser at  $\sim 3 \mu\text{m}$  with nonlinear polarization rotation [J]. *Photonics*, 2019, 6(1): 25.
- [ 25 ] DUVAL S, OLIVIER M, ROBICHAUD L R, *et al.* Numerical modeling of mid-infrared ultrashort pulse propagation in  $\text{Er}^{3+}$ : fluoride fiber amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2018, 35(6): 1450-1462.
- [ 26 ] SUJECKI S. Simple and efficient method of lines based algorithm for modeling of erbium doped Q-switched fluoride fiber lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2016, 33(11): 2288-2295.
- [ 27 ] OLADEJI A, PHILLIPS A, LAMRINI S, *et al.* Design of erbium doped double clad ZBLAN fibre laser [J]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2015, 619(1): 012044.
- [ 28 ] POLLNAU M, JACKSON S D. Energy recycling versus lifetime quenching in erbium-doped 3- $\mu\text{m}$  fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, 38(2): 162-169.
- [ 29 ] 王建军,刘琦,李敏,等. 光纤激光模式不稳定研究十年回顾与展望[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121003.  
WANG J J, LIU Y, LI M, *et al.* Ten-year review and prospect on mode instability research of fiber lasers [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2020, 32(12): 121003. (in Chinese)



- [ 30 ] 张新. 基于氟化物光纤的中红外脉冲激光器及其泵浦技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.  
ZHANG X. *Research on Mid-infrared Pulse Laser and Its Pump Technology Based on Fluoride Fiber* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [ 31 ] 黄园芳, 彭跃峰, 魏星斌, 等. 瓦级连续波 2.8  $\mu\text{m}$  中红外 Er:ZBLAN 光纤激光器 [J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502007.  
HUANG Y F, PENG Y F, WEI X B, *et al.* Watt-level mid-infrared 2.8  $\mu\text{m}$  mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2012, 39(5): 0502007. (in Chinese)
- [ 32 ] ZHU X S, JAIN R. 10-W-level diode-pumped compact 2.78  $\mu\text{m}$  ZBLAN fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(1): 26-28.
- [ 33 ] JACKSON S D, KING T A, POLLNAU M. Diode-pumped 1.7-W erbium 3- $\mu\text{m}$  fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(16): 1133-1135.
- [ 34 ] 彭跃峰, 魏星斌, 黄园芳, 等. 数瓦级中红外 2.8  $\mu\text{m}$  光纤激光器 [C]. 第十届全国光电技术学术交流会论文集, 北京, 2012: 195.  
PENG Y F, WEI X B, HUANG Y F, *et al.* Multi-watt-level mid-infrared 2.8  $\mu\text{m}$  fiber laser [C]. *The Opto-Electronics Technology, Beijing*, 2012: 195. (in Chinese)



杨雪莹(1999-),女,山东临沂人,硕士研究生,2021年于临沂大学获得学士学位,主要从事光纤激光器的研究。  
E-mail: Y15163917869@163.com



田颖(1984-),女,山东济南人,博士,教授,2012年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事红外光学玻璃、红外光纤器件应用基础和关键技术的研究。  
E-mail: tianying@cjlu.edu.cn