

# 基于级联跃迁的 2.8 $\mu\text{m}$ 低掺铒氟化物光纤激光器数值分析与优化\*

夏文新# 付士杰# 张钧翔 张露 盛泉† 罗学文 史伟‡ 姚建铨

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2023 年 5 月 31 日收到; 2023 年 8 月 21 日收到修改稿)

2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联跃迁的工作方式, 可以有效解决低掺铒氟化物光纤中自终止效应导致的 2.8  $\mu\text{m}$  激光功率提升难题. 建立基于低掺铒氟化物光纤 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联跃迁的中红外光纤激光器数值模型, 系统分析了 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光波长对 2.8  $\mu\text{m}$  激光功率和转换效率的影响. 计算结果表明, 选取 1610 nm 作为级联激光工作波长, 能有效平衡 2.8  $\mu\text{m}$  激光下能级  $^4\text{I}_{13/2}$  粒子向基态  $^4\text{I}_{15/2}$  和激发态  $^4\text{I}_{9/2}$  的跃迁过程, 实现 2.8  $\mu\text{m}$  波段激光输出功率和效率的提升. 此外, 计算了 1.6  $\mu\text{m}$  激光腔反馈对 2.8  $\mu\text{m}$  激光功率和效率的影响, 结果表明, 仅通过光纤端面提供的弱反馈即可实现 1.6  $\mu\text{m}$  激光振荡, 从而获得高效率 2.8  $\mu\text{m}$  激光输出.

**关键词:** 中红外激光, 光纤激光器, 级联激光器, 掺铒氟化物光纤

**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.Lh, 78.45.+h

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230903

## 1 引言

2.8  $\mu\text{m}$  附近的中红外波段对应着包括水分子在内的多种有机和无机分子的吸收峰, 因此该波段的激光光源在光谱分析、生物医疗以及遥感等领域具有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>. 与光学参量振荡器<sup>[4]</sup>、掺铒固体激光器<sup>[5]</sup>、量子级联激光器<sup>[6]</sup>等中红外激光的产生方法相比, 基于稀土离子受激发射的掺铒氟化物光纤激光器具有光束质量优良、散热性良好以及柔性产生和传输等特点, 受到广泛关注.

掺铒氟化物 (ZBLAN) 光纤中 2.8  $\mu\text{m}$  激光跃迁对应的激光下能级  $^4\text{I}_{13/2}$  的寿命 (9.9 ms) 长于激光上能级  $^4\text{I}_{11/2}$  的寿命 (7.9 ms), 粒子会在激光下能级大量积累, 阻碍粒子数反转的形成、抑制 2.8  $\mu\text{m}$

激光的激射, 也即存在“自终止”效应. 当氟化物光纤中铒离子掺杂浓度较高时,  $^4\text{I}_{13/2}$  能级上的离子间能量传递过程增强<sup>[7]</sup>, 能量转移上转换 (energy transfer upconversion, ETU) 过程能够有效地消耗激光下能级积累的粒子, 从而缓解自终止效应<sup>[8]</sup>. 因此, 目前高功率 2.8  $\mu\text{m}$  中红外光纤激光器普遍采用掺杂浓度 6—7 mol% 的高掺铒氟化物光纤<sup>[9-12]</sup>, 已实现最高 41 W 的输出功率<sup>[11]</sup>. 然而, 高掺杂光纤中严重的热负载成为限制激光功率和效率进一步提升的主要障碍; 降低掺杂浓度虽然可以起到分散热负载的作用, 但是又面临 ETU 过程减弱、激光下能级粒子无法释放导致激光自终止的难题.

针对以上问题, 研究人员提出 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联跃迁的技术方案, 利用 1.6  $\mu\text{m}$  波段激光的级联发射 ( $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ) 加速释放  $^4\text{I}_{13/2}$  能级的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62375201, 62105240, 62075159, 61975146, 62275190)、天津大学自主创新基金 (批准号: 2023XPD-0020) 和山东省重点研发计划 (批准号: 2020CXGC010104, 2021CXGC010202) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: shengquan@tju.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: shiwei@tju.edu.cn

粒子, 缓解自终止效应<sup>[13]</sup>. 2016 年, Li 等<sup>[14]</sup>报道了基于掺杂浓度 1.5 mol% 的氟化物光纤的 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  级联跃迁激光器, 采用高反镀膜腔镜与平切的光纤输出端面构成激光谐振腔, 实现了 15.2 W 的 2.8  $\mu\text{m}$  激光输出, 相对 976 nm 泵浦光的斜率效率达到 26.7%. 2017 年, Aydin 等<sup>[15]</sup>指出发生级联跃迁时 1.6  $\mu\text{m}$  激光的激发态吸收 (excited state absorption, ESA,  $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$ ) 过程对 2.8  $\mu\text{m}$  激光的发射也具有贡献, 在低掺铒 (1 mol%) 氟化物光纤中分别刻写 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  的光栅, 结合光纤端面的镀膜实现了 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  级联激光的全光纤激光器, 将 2.8  $\mu\text{m}$  激光的斜率效率提升至 50%, 实现了 13 W 的激光输出. 在理论模型方面, 2014 年 Li 等<sup>[16]</sup>系统分析了谐振腔参数对 2.8  $\mu\text{m}$  与 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联跃迁功率和效率的影响; 2022 年 Guo 等<sup>[17]</sup>系统分析了 1.6  $\mu\text{m}$  ESA 过程对 2.8  $\mu\text{m}$  激光功率和效率的影响. 但是, 前述理论和实验分析均是针对 2.8  $\mu\text{m}$  与 1.6  $\mu\text{m}$  激光固定波长的研究. 1.6  $\mu\text{m}$  激光涉及激光受激发射和 ESA 两个过程, 二者对激光增益的贡献不同, 其速率也均随波长而变化; 2.8  $\mu\text{m}$  激光的工作波长对激光增益以及重吸收过程也有显著的影响. 因此, 研究级联跃迁方案中 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光具体工作波长对上述过程的作用, 对于优化中红外光纤激光器的功率和效率具有重要意义. 本文系统分析了掺铒氟化物光纤级联跃迁激光器中 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光波长对 2.8  $\mu\text{m}$  激光功率和效率的

影响, 结果表明, 选取 1610 nm 级联跃迁波长, 能够平衡 2.8  $\mu\text{m}$  激光下能级粒子向基态和激发态跃迁的过程, 最大程度地提升 2.8  $\mu\text{m}$  激光的转换效率. 此外, 理论计算发现, 利用平切光纤端面提供的弱反馈即可实现 1.6  $\mu\text{m}$  激光振荡, 从而提高粒子循环能力, 实现高效的 2.8  $\mu\text{m}$  激光输出.

## 2 理论模型

图 1 为掺铒 ZBLAN 光纤中 2.8  $\mu\text{m}$  与 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联跃迁过程的能级示意图. 基态  $^4\text{I}_{15/2}$  上的粒子吸收 976 nm 泵浦光, 跃迁至激光上能级  $^4\text{I}_{11/2}$  (ground state absorption, GSA), 随后在  $^4\text{I}_{11/2}$  和  $^4\text{I}_{13/2}$  能级之间发生辐射跃迁, 产生 2.8  $\mu\text{m}$  激光. 由于  $^4\text{I}_{13/2}$  能级寿命长于  $^4\text{I}_{11/2}$  能级的寿命, 粒子在  $^4\text{I}_{13/2}$  能级大量积累, 发生自终止. 在低掺铒 ZBLAN 光纤中, ETU1 ( $^4\text{I}_{13/2}$ ,  $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{I}_{9/2}$ ) 系数较低, 难以有效地消耗  $^4\text{I}_{13/2}$  能级积累的粒子, 而级联跃迁方案通过增加 1.6  $\mu\text{m}$  激光跃迁 ( $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ) 过程, 能够快速消耗  $^4\text{I}_{13/2}$  上的粒子; 同时产生的 1.6  $\mu\text{m}$  激光可进一步通过 ESA2 过程将  $^4\text{I}_{13/2}$  的粒子激发到更高能级  $^4\text{I}_{9/2}$ , 并随后弛豫至激光上能级  $^4\text{I}_{11/2}$ , 促进了 2.8  $\mu\text{m}$  激光系统的粒子循环, 提高 2.8  $\mu\text{m}$  激光的转换效率.

根据能级跃迁过程 (图 1), 建立如下速率方程, 与文献<sup>[16]</sup>中模型相比, 本文模型中增加了 1.6  $\mu\text{m}$  激发态吸收 (ESA2,  $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$ ) 过程以及 ETU3 ( $^4\text{F}_{9/2}$ ,  $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{S}_{3/2}$ ,  $^4\text{I}_{13/2}$ ) 过程:

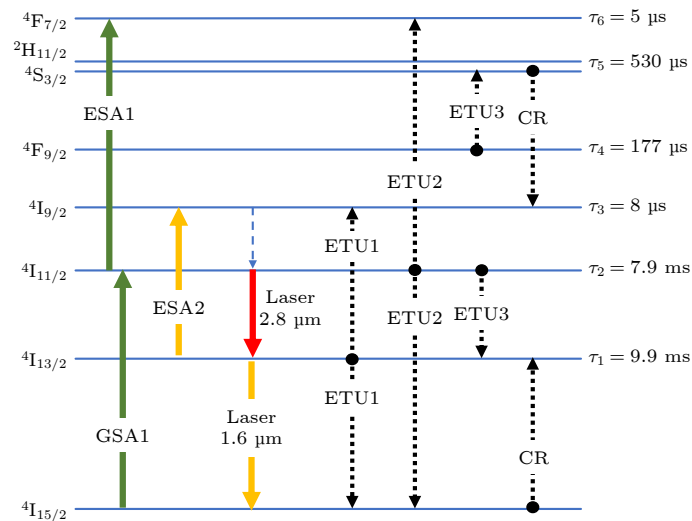


图 1 基于掺铒 ZBLAN 光纤的 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联跃迁能级示意图

Fig. 1. Energy level diagram of  $\text{Er}^{3+}$ -doped ZBLAN fiber lasers relevant to cascaded transitions of 2.8  $\mu\text{m}$  and 1.6  $\mu\text{m}$  lasers.

$$\begin{aligned}
 \frac{dN_6(z, t)}{dt} &= -\frac{N_6(z, t)}{\tau_6} + R_{\text{ESA1}} + R_{\text{ETU2}}, \\
 \frac{dN_5(z, t)}{dt} &= -\frac{N_5(z, t)}{\tau_5} + \beta_{65} \frac{N_6(z, t)}{\tau_6} + R_{\text{ETU3}} - R_{\text{CR}}, \\
 \frac{dN_4(z, t)}{dt} &= -\frac{N_4(z, t)}{\tau_4} + \sum_{i=5}^6 \beta_{i4} \frac{N_i(z, t)}{\tau_i} - R_{\text{ETU3}}, \\
 \frac{dN_3(z, t)}{dt} &= -\frac{N_3(z, t)}{\tau_3} + \sum_{i=4}^6 \beta_{i3} \frac{N_i(z, t)}{\tau_i} + R_{\text{ESA2}} + R_{\text{ETU1}} + R_{\text{CR}}, \\
 \frac{dN_2(z, t)}{dt} &= -\frac{N_2(z, t)}{\tau_2} + \sum_{i=3}^6 \beta_{i2} \frac{N_i(z, t)}{\tau_i} + R_{\text{GSA1}} - R_{\text{ESA1}} - R_{\text{SE1}} - 2R_{\text{ETU2}} - R_{\text{ETU3}}, \\
 \frac{dN_1(z, t)}{dt} &= -\frac{N_1(z, t)}{\tau_1} + \sum_{i=2}^6 \beta_{i1} \frac{N_i(z, t)}{\tau_i} + R_{\text{SE1}} - R_{\text{SE2}} - R_{\text{ESA2}} - 2R_{\text{ETU1}} + R_{\text{ETU3}} + R_{\text{CR}}, \\
 \frac{dN_0(z, t)}{dt} &= \frac{N_1(z, t)}{\tau_1} + \sum_{i=2}^6 \beta_{i0} \frac{N_i(z, t)}{\tau_i} - R_{\text{GSA1}} + R_{\text{SE2}} + R_{\text{ETU1}} + R_{\text{ETU2}} - R_{\text{CR}}, \\
 N &= \sum_{i=0}^6 N_i(z, t). \tag{1}
 \end{aligned}$$

其中,  $N_i(z, t)$  为能级  $i$  上的粒子数,  $N$  为总粒子数,  $\tau_i$  为能级  $i$  的辐射寿命,  $\beta_{ij}$  表示离子从能级  $i$  衰减到低能级  $j$  的分支比例,  $\tau_i$  和  $\beta_{ij}$  参数均取自文献 [17].  $R_{\text{GSA1}}$ ,  $R_{\text{ESA1}}$  和  $R_{\text{ESA2}}$  分别表示 GSA, ESA1 和 ESA2 过程的速率,  $R_{\text{ETU1}}$ ,  $R_{\text{ETU2}}$  和  $R_{\text{ETU3}}$  分别表示 ETU1, ETU2 和 ETU3 过程的速率,  $R_{\text{CR}}$  表示交叉弛豫 (cross relaxation, CR) 过程的速率, 其表达式参照文献 [17]. 腔内泵浦光和信号光的功率传输方程如 (2) 式:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_{\text{p}}^{\pm}(z, t)}{dz} &= \pm [-\Gamma_{\text{p}}(\sigma_{02}N_0(z, t) + \sigma_{26}N_2(z, t)) - \alpha_{\text{p}}]P_{\text{p}}^{\pm}(z, t), \\
 \frac{dP_{\text{s1}}^{\pm}(z, t)}{dz} &= \pm [\Gamma_{\text{s1}}(\sigma_{21}N_2(z, t) - \sigma_{12}N_1(z, t)) - \alpha_{\text{s1}}]P_{\text{s1}}^{\pm}(z, t), \\
 \frac{dP_{\text{s2}}^{\pm}(z, t)}{dz} &= \pm [\Gamma_{\text{s2}}(\sigma_{10}N_1(z, t) - \sigma_{01}N_0(z, t) + \sigma_{31}N_3(z, t) - \sigma_{13}N_1(z, t)) - \alpha_{\text{s2}}]P_{\text{s2}}^{\pm}(z, t), \tag{2}
 \end{aligned}$$

其中,  $\alpha_{\text{p}}$ ,  $\alpha_{\text{s1}}$  和  $\alpha_{\text{s2}}$  分别表示 976 nm 泵浦光以及 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光在光纤中传输的背景损耗系数. 泵浦光功率和所产生的激光功率在光纤端面的边界条件如 (3) 式:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{p}}^{+}(0) &= P_{\text{p}}^{-}(0)R_{\text{p}} + P_{1, \text{launch}}, \\
 P_{\text{p}}^{-}(L) &= P_{\text{p}}^{+}(L)R_{\text{pL}}, \\
 P_{\text{s1}}^{+}(0) &= P_{\text{s1}}^{-}(0)R_{\text{s1}}, \quad P_{\text{s1}}^{-}(L) = P_{\text{s1}}^{+}(L)R_{\text{s1L}}, \\
 P_{\text{s2}}^{+}(0) &= P_{\text{s2}}^{-}(0)R_{\text{s2}}, \quad P_{\text{s2}}^{-}(L) = P_{\text{s2}}^{+}(L)R_{\text{s2L}}, \tag{3}
 \end{aligned}$$

其中,  $P_{1, \text{launch}}$  表示实际耦合进入增益光纤中的泵浦光功率,  $R$  和  $R_{\text{L}}$  分别表示光纤输入和输出端面的反射率, 其中下标 p, s1 和 s2 分别代表 976 nm

泵浦光、2.8  $\mu\text{m}$  信号光和 1.6  $\mu\text{m}$  信号光.

### 3 分析与讨论

#### 3.1 单谐振腔下 2.8 $\mu\text{m}$ 激光的自终止效应

图 2 为基于单谐振腔的 2.8  $\mu\text{m}$  中红外光纤激光器结构示意图, 泵浦源为 976 nm 多模半导体激光器; 增益光纤为掺铒 ZBLAN 双包层光纤, 掺杂浓度为 1% (摩尔分数), 内包层直径  $240 \times 260 \mu\text{m}$ 、数值孔径  $NA > 0.46$ ; 纤芯直径 16.5  $\mu\text{m}$ 、 $NA = 0.12$ ; 激光谐振腔由高反 ( $R > 99\%$ ) 的光纤布拉格光栅 (FBG) 和光纤端面构成; 光纤末端采用包层光滤除器 (CPS) 将剩余泵浦光滤除.

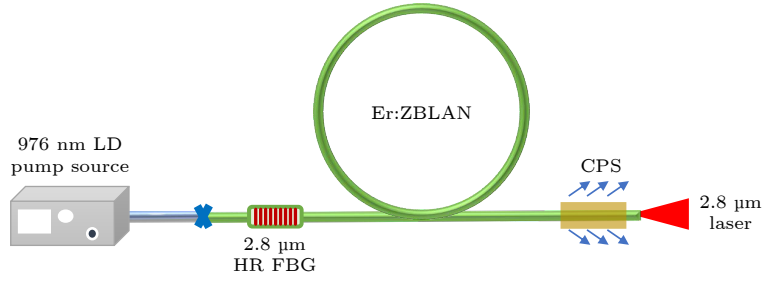


图 2 基于单谐振腔的 2.8 μm 中红外光纤激光器结构示意图

Fig. 2. Schematic of mid-infrared fiber laser with a single 2.8 μm laser cavity.

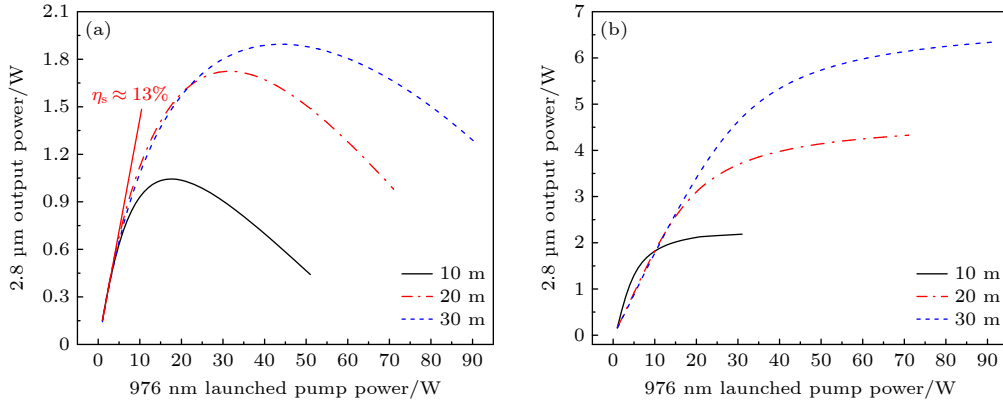


图 3 10 m/20 m/30 m 光纤长度下激光输出功率随泵浦功率的变化 (a) 考虑 ESA1; (b) 不考虑 ESA1

Fig. 3. Calculation results of 2.8 μm output power as a function of 976 nm launched pump power with 10 m/20 m/30 m fiber lengths: (a) With ESA1; (b) without ESA1.

基于单谐振腔的 2.8 μm 中红外激光系统中不存在  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  的 1.6 μm 激光跃迁过程以及相应的 ESA2 过程, 表 1 列出了计算中所采用各参数取值. 图 3(a) 为数值计算得到的单谐振腔 2.8 μm 激光功率输出特性. 随着泵浦功率的增大, 2.8 μm 激光输出功率很快趋于饱和, 进一步增大泵浦功率, 激光功率发生下降. 以 10 m 长增益光纤为例, 输出功率在泵浦功率为 18 W 时达到极大值 1.04 W. 当光纤长度增大时, 激光最大输出功率有所提升, 在光纤长度 20 m 和 30 m 时分别能够获得 1.72 W 和 1.89 W 的最高输出功率. 不存在 1.6 μm 级联激光时 2.8 μm 中红外光纤激光器的效率较低, 斜率效率和光光效率最大分别仅为 13% 和 5.8%. 一方面自终止效应抑制了 2.8 μm 激光的发射, 另一方面, 激光下能级  $^4I_{13/2}$  上粒子的积累也会导致激光上能级  $^4I_{11/2}$  上粒子数更多, 而  $^4I_{11/2}$  上的粒子会吸收 976 nm 泵浦光向更高能级跃迁 ( $^4I_{11/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$ , ESA1), 造成上能级粒子数的消耗和泵浦光能量的浪费. 与之对比, 图 3(b) 给出不考虑 ESA1 过程时的计算结果, 虽然激光输出功率也随着泵浦功率的

增加逐渐饱和, 但并未出现下降的趋势. 由此可知, 自终止效应和 ESA1 过程共同限制了基于低掺铒光纤的单谐振腔 2.8 μm 激光器的功率和效率.

表 1 仿真中使用的参数 [7,18,19]

Table 1. Parameters used in the simulation [7,18,19].

Parameter	Value	Parameter	Value
$\lambda_p/\text{nm}$	976	$R_p$	0.04
$\lambda_{s1}/\text{nm}$	2800	$R_{pL}$	0.04
$\sigma_{02}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	2.00	$W_{1103}/(10^{-24} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.40
$\sigma_{26}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	1.10	$W_{2206}/(10^{-24} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.08
$\sigma_{12}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	2.50	$W_{4251}/(10^{-24} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	15.0
$\sigma_{21}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	4.22	$W_{5031}/(10^{-24} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.10
$R_{s1}$	0.99	$\alpha_p/\text{m}^{-1}$	0.023
$R_{s1L}$	0.04	$\alpha_{s1}/\text{m}^{-1}$	0.00345

### 3.2 基于双谐振腔结构的 2.8 μm 激光效率优化

图 4 为 2.8 μm 和 1.6 μm 激光级联跃迁的中红外光纤激光器结构示意图, 与图 2 单谐振腔结构相比增加了对 1.6 μm 激光的反馈, 构成实现级联跃迁的双谐振腔系统. 图 5 给出级联跃迁的双谐振

腔系统与单谐振腔系统的输出特性对比, 计算中相对表 1 增加的各项参数取值见表 2<sup>[15,17-20]</sup>.

如图 5(a) 所示, 当存在 1.6  $\mu\text{m}$  激光振荡时, 1.6  $\mu\text{m}$  激光发射和 ESA2 过程都能够有效消耗  $^4\text{I}_{13/2}$  能级的粒子, 缓解自终止效应, 因此级联跃迁系统中 2.8  $\mu\text{m}$  激光输出功率和效率 (蓝色方块) 与单腔情况 (黑色三角) 相比得到显著提升. 图中红色和绿色离散点为文献 [15] 中基于级联跃迁结

构获得的 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光功率的实验数据, 可以看出, 理论模拟结果与相关文献报道的实验结果相符, 验证了本文理论模型的可靠性. 图 5(b) 和图 5(c) 给出入射泵浦功率 35 W 时, 976 nm 泵浦光与 1.6  $\mu\text{m}$  激光功率以及级联跃迁过程所涉及能级的粒子数沿光纤纵向的分布情况. 当存在 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联跃迁时, 1.6  $\mu\text{m}$  激光功率沿光纤长度方向呈现出先上升后下降的趋势 (图 5(b) 粉色虚线),

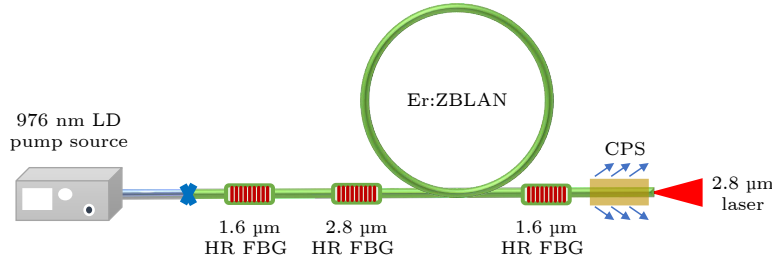


图 4 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联跃迁的中红外光纤激光器结构

Fig. 4. Schematic of mid-infrared fiber lasers with cascaded 2.8  $\mu\text{m}$  and 1.6  $\mu\text{m}$  laser transitions.

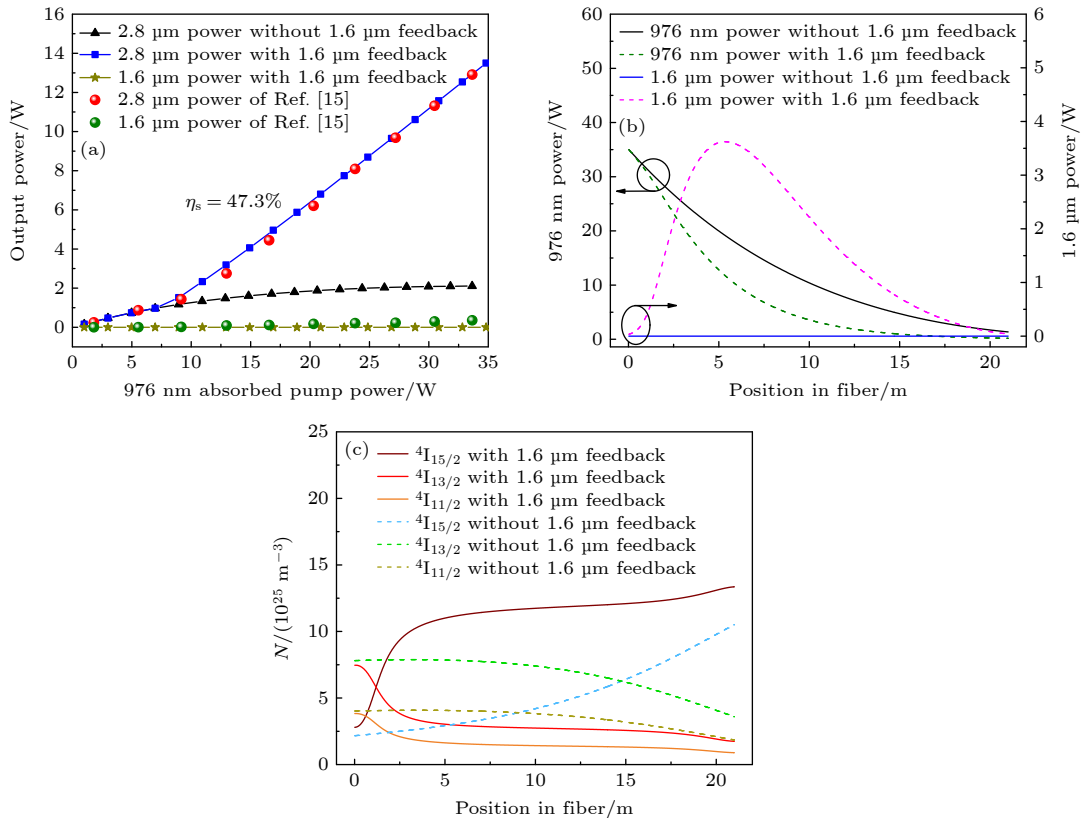


图 5 2.8  $\mu\text{m}$  激光单谐振腔系统 (无 1.6  $\mu\text{m}$  腔反馈) 与 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联跃迁双谐振腔系统 (有 1.6  $\mu\text{m}$  腔反馈) 激光特性对比 (a) 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光输出功率随泵浦功率的变化; (b) 35 W 泵浦功率下泵浦光与 1.6  $\mu\text{m}$  级联激光沿光纤的功率分布; (c) 35 W 泵浦功率下  $^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{I}_{13/2}$  和  $^4\text{I}_{11/2}$  能级的粒子数沿光纤的分布情况

Fig. 5. 2.8  $\mu\text{m}$  laser characteristics of the 2.8  $\mu\text{m}$  laser single-cavity system (without 1.6  $\mu\text{m}$  feedback) and the dual-cavity system based on cascaded 2.8  $\mu\text{m}$  and 1.6  $\mu\text{m}$  lasers (with 1.6  $\mu\text{m}$  feedback): (a) Output power of 2.8  $\mu\text{m}$  and 1.6  $\mu\text{m}$  laser as a function of 976 nm launched pump power; (b) power distribution of pump light and 1.6  $\mu\text{m}$  cascade laser along fiber under 35 W of launched pump power; (c) population distribution of  $^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{I}_{13/2}$  and  $^4\text{I}_{11/2}$  energy levels along active fiber under 35 W of launched pump power.



$^4I_{13/2}$  能级粒子数随着 1.6  $\mu\text{m}$  激光功率的增大而迅速下降 (图 5(c) 红色实线), 同时, 1.6  $\mu\text{m}$  激光受激发射过程使得  $^4I_{13/2}$  能级的粒子跃迁至基态  $^4I_{15/2}$  能级,  $^4I_{15/2}$  能级粒子数迅速上升 (图 5(c) 棕色实线), 因而其泵浦吸收 (图 5(b) 绿色虚线) 相对不存在 1.6  $\mu\text{m}$  激光振荡的情况 (图 5(b) 黑色实线) 更为充分.

表 2 级联跃迁系统的模拟参数 [15,17-20]

Table 2. Parameters used in cascaded transition system [15,17-20].

参数	数值	参数	数值
$\lambda_{s1}/\text{nm}$	2825	$\sigma_{10}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	0.55
$\lambda_{s2}/\text{nm}$	1614	$\sigma_{01}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	0.12
$R_{s2}$	0.80	$\sigma_{13}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	0.127
$R_{s2L}$	0.995	$\sigma_{31}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	0.133
$\sigma_{12}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	1.37	$\alpha_{s2}/\text{m}^{-1}$	0.0048
$\sigma_{21}/(10^{-25} \text{ m}^2)$	2.67	—	—

然而, 级联跃迁技术方案利用 1.6  $\mu\text{m}$  激光消耗 2.8  $\mu\text{m}$  激光下能级粒子、提高粒子循环能力的同时, 向激光系统中引入了额外的 1.6  $\mu\text{m}$  激光谐振腔. 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光的跃迁速率存在差异, 导致 2.8  $\mu\text{m}$  激光跃迁积累  $^4I_{13/2}$  能级粒子、1.6  $\mu\text{m}$  激光跃迁消耗  $^4I_{13/2}$  能级粒子的速率不同, 两个激光跃迁的过程相互影响制约, 因此, 需要对两个激光谐振腔的腔参数、激光工作波长进行系统优化, 以保证 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联跃迁对于 2.8  $\mu\text{m}$  激光功率、效率提升的效果最大化. 2.8  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联跃迁方案中两激光相互影响的现象在其他文献中也有报道, 如文献 [15] 中, 观察到在 1.6  $\mu\text{m}$  激光阈值附近 2.8  $\mu\text{m}$  激光的自脉冲现象, 这可能是由于掺铒光纤尾端泵浦功率较低, 掺铒光纤作为 1.6  $\mu\text{m}$  激光的饱和吸收体, 导致 1.6  $\mu\text{m}$  激光的脉冲运转, 进而通过级联跃迁和激发态吸收过程影响 2.8  $\mu\text{m}$  激光跃迁, 导致 2.8  $\mu\text{m}$  激光的自脉冲现象.

与 1.6  $\mu\text{m}$  级联跃迁过程相比, ESA2 过程在消耗  $^4I_{13/2}$  能级积累的粒子同时又将其激发至  $^4I_{9/2}$  能级并弛豫到激光上能级  $^4I_{11/2}$ , 起到一举两得的作用. 1.6  $\mu\text{m}$  级联跃迁和 ESA2 两个过程的中心波长存在一定偏离, 分别为 1535 nm 和 1675 nm, 因此我们进一步计算了 1.6  $\mu\text{m}$  激光波长对 2.8  $\mu\text{m}$  激光输出功率的影响. 计算中 1.6  $\mu\text{m}$  波段的发射

和吸收截面采用文献 [17, 20] 中的数值, 表 3 列出了 2.8  $\mu\text{m}$  波段 3 个典型波长所对应的吸收和发射截面 [18]. 2.8  $\mu\text{m}$  激光谐振腔两端反射率分别为 99% 和 4%, 1.6  $\mu\text{m}$  激光谐振腔两端反射率均为 99%, 其余参数均与图 5 计算过程中采用的参数相同. 如图 6(a) 所示, 在 50 W 泵浦功率下, 2.8  $\mu\text{m}$  波段不同波长的激光输出功率极大值均出现在级联发射波长 1610 nm 处, 说明此时 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联发射和 ESA2 过程达到优化平衡. 在短波长一侧级联发射过程较强, 但 ESA2 过程较弱, 尽管能够有效消耗  $^4I_{13/2}$  能级的粒子, 但对  $^4I_{9/2}$  能级粒子数的贡献较小, 难以实现粒子高效循环; 而在长波长一侧 ESA2 过程较强, 但不足以弥补 1.6  $\mu\text{m}$  激光级联发射强度降低对  $^4I_{13/2}$  能级粒子消耗作用的负面影响. 图 6(b) 给出级联激光波长固定为 1610 nm 时, 2.8  $\mu\text{m}$  波段激光输出功率与激光波长的关系. 以增益光纤长度 15 m 和泵浦功率 50 W 为例, 随着激光波长的增大, 2.8  $\mu\text{m}$  激光功率逐渐增大, 并在 2880 nm 处达到峰值. 随着增益光纤长度的增加, 由于重吸收过程对长波长提供更高的增益, 输出功率峰值所对应的激光波长逐渐红移. 增加增益光纤长度在一定程度上有助于获得长波长的高功率输出, 但掺铒氟化物光纤自身对信号光的损耗也较为明显, 实际光纤长度的选取需要综合考虑. 经以上数值计算可知, 在光纤长度为 15 m 时, 最优的级联波长组合为 2880 nm 和 1610 nm, 优化后的激光输出功率随泵浦功率的变化关系如图 6(c) 所示, 在泵浦功率达到 1.6  $\mu\text{m}$  激光阈值 (~5 W LD 泵浦功率) 之前, 2.8  $\mu\text{m}$  激光的斜率效率仅为 16.8%, 而 1.6  $\mu\text{m}$  级联激光起振后 2.8  $\mu\text{m}$  激光的斜率效率增大到 49.5%.

表 3 ZBLAN 玻璃中铒离子在 2.8  $\mu\text{m}$  波段典型波长的吸收和发射截面 [18]Table 3. Absorption and emission cross sections of erbium ions at three selected wavelength of 2.8  $\mu\text{m}$  regime in ZBLAN glass [18].

$\lambda_{s1}/\text{nm}$	Cross-section	Value/ $(10^{-24} \text{ m}^2)$
2700	$\sigma_{21}$	0.235
	$\sigma_{12}$	0.262
2800	$\sigma_{21}$	0.422
	$\sigma_{12}$	0.249
2900	$\sigma_{21}$	0.066
	$\sigma_{12}$	0.022

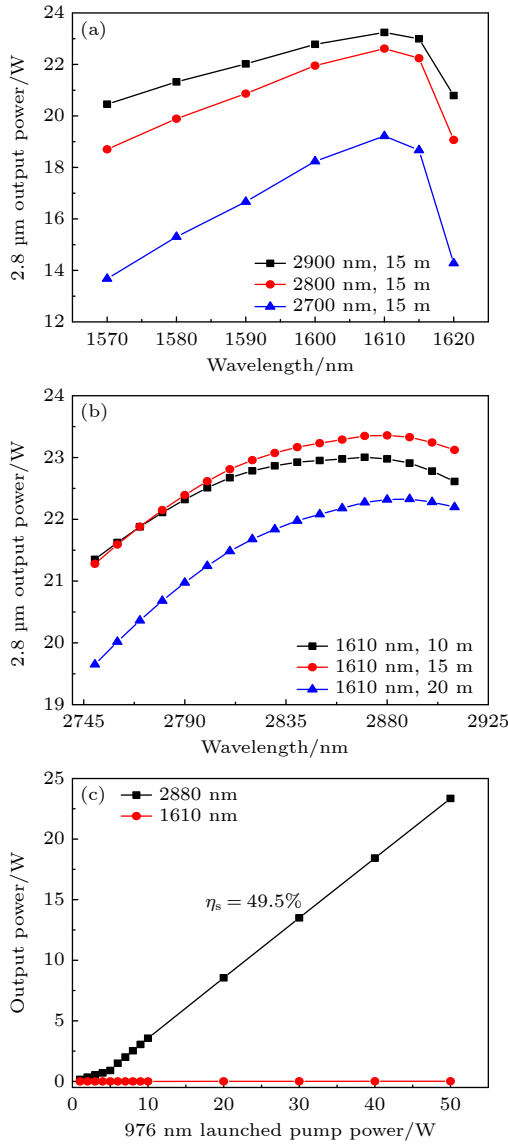


图6 泵浦功率为50 W时 (a) 2.8  $\mu\text{m}$  波段不同激光波长输出功率随1.6  $\mu\text{m}$  级联激光波长的变化情况; (b) 固定级联激光波长为1610 nm, 2.8  $\mu\text{m}$  波段不同激光波长输出功率变化情况; (c) 2880 nm和1610 nm激光级联跃迁输出功率随泵浦功率的变化关系. 图中2.8  $\mu\text{m}$  谐振腔反射率为99%和4%, 1.6  $\mu\text{m}$  谐振腔反射率均为99%

Fig. 6. Under 50 W of launched pump power at 976 nm: (a) 2.8  $\mu\text{m}$  output power as a function of cascaded wavelength at 1.6  $\mu\text{m}$ ; (b) 2.8  $\mu\text{m}$  output power as a function of laser wavelength at 2.8  $\mu\text{m}$ , the value of cascaded wavelength was fixed at 1610 nm; (c) output power of 2880 nm and 1610 nm laser as a function of 976 nm launched pump power. 2.8  $\mu\text{m}$  cavity feedbacks:  $R_{s1} = 99\%$ ,  $R_{s1L} = 4\%$ , 1.6  $\mu\text{m}$  cavity feedbacks:  $R_{s2} = 99\%$ ,  $R_{s2L} = 99\%$ .

图7(a)为不同1610 nm腔反馈下, 2880 nm激光输出功率随泵浦功率的变化关系. 当1.6  $\mu\text{m}$ 谐振腔两端的反射率均为99%时, 2.8  $\mu\text{m}$ 激光的斜率效率高达49.5%; 而1.6  $\mu\text{m}$ 谐振腔两端反射率分别为99%和4%时, 2.8  $\mu\text{m}$ 激光的斜率效率

为46.4%, 与两端均对1.6  $\mu\text{m}$ 高反的情况相比, 激光输出功率和效率并没有明显的降低; 即使进一步降低1.6  $\mu\text{m}$ 激光的腔反馈至两端均为4%, 也就是光纤端面的菲涅尔反射水平时, 2.8  $\mu\text{m}$ 激光的斜率效率仍达到43.4%, 可实现高功率、高效率2.8  $\mu\text{m}$ 激光输出. 图7(b)给出不同腔反馈条件下泵浦光和1610 nm激光沿光纤纵向的功率分布. 基于端面反射同样能够产生充分的1.6  $\mu\text{m}$ 激光振荡, 从而大幅提高激光效率; 同时避免了光纤光栅带来的散射损耗与微纳缺陷<sup>[21]</sup>, 降低了激光系统的搭建难度, 有利于提高系统稳定性, 是实现高功率、高效率2.8  $\mu\text{m}$ 激光输出的有效手段.

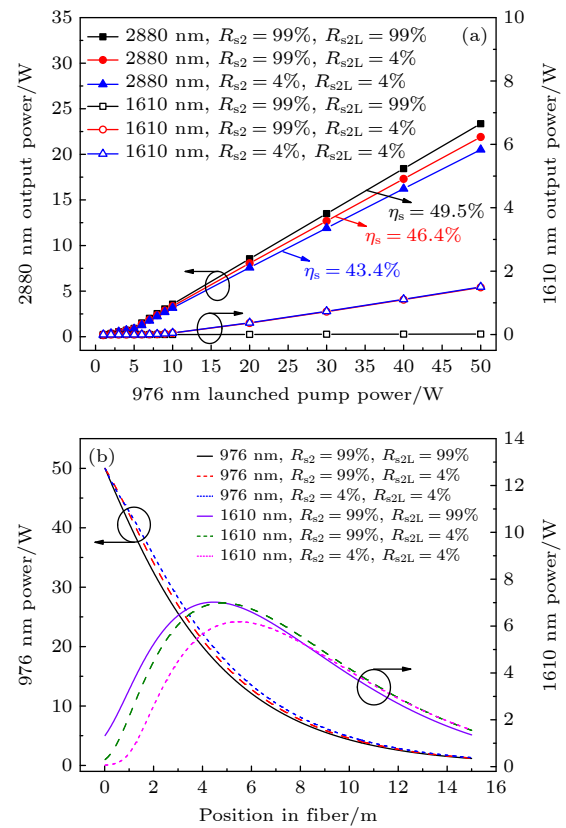


图7 不同1610 nm腔反馈( $R_{s2}/R_{s2L}$ )下 (a) 2880 nm和1610 nm激光输出功率随泵浦功率的变化关系; (b) 泵浦功率为50 W时, 泵浦光和1610 nm激光沿光纤的功率分布

Fig. 7. With the different 1610 nm feedbacks ( $R_{s2}/R_{s2L}$ ): (a) Output power of 2880 nm and 1610 nm laser as a function of 976 nm launched pump power; (b) 976 nm and 1.6  $\mu\text{m}$  laser power distribution along active fiber under 50 W of launched pump power.

## 4 结 论

本文建立了基于低掺铒氟化物光纤级联跃迁的2.8  $\mu\text{m}$ 中红外光纤激光器理论模型, 数值计算

分析了级联跃迁系统的工作波长对 2.8  $\mu\text{m}$  激光功率和效率的影响. 结果表明, 级联跃迁系统存在最优级联激光波长, 能够平衡 2.8  $\mu\text{m}$  激光下能级  $^4\text{I}_{13/2}$  上的粒子向基态和激发态跃迁的过程, 在保证对激光下能级粒子消耗作用的基础上, 提高粒子循环能力、促进 2.8  $\mu\text{m}$  激光的激射. 此外, 计算发现仅靠光纤端面提供的弱反馈即可获得 1.6  $\mu\text{m}$  激光振荡, 实现上述级联发射过程、提高激光器效率, 能够规避在氟化物光纤中刻写多段不同周期的光栅带来的潜在问题, 在实验实现高功率、高效率的 2.8  $\mu\text{m}$  中红外光纤激光输出方面存在巨大的潜力.

## 参考文献

- [1] Picqué N, Hänsch T W 2019 *Opt. Photonics News* **30** 26
- [2] Jackson S D, Lauto A 2002 *Lasers Surg. Med.* **30** 184
- [3] Mahulikar S P, Sonawane H R, Arvind Rao G 2007 *Prog. Aerosp. Sci.* **43** 218
- [4] Wu Y, Liang S, Fu Q, Bradley T D, Poletti F, Richardson D J, Xu L 2022 *Opt. Lett.* **47** 3600
- [5] Su L B, Guo X S, Jiang D P, Wu Q H, Qin Z P, Xie G Q 2018 *Opt. Express* **26** 5558
- [6] Yao Y, Hoffman A J, Gmachl C F 2012 *Nature Photon.* **6** 432
- [7] Henderson-Sapir O, Munch J, Ottaway D J 2016 *Opt. Express* **24** 6869
- [8] Quimby R S, Miniscalco W J 1989 *Appl. Opt.* **28** 14
- [9] Fortin V, Bernier M, Bah S T, Vallée R 2015 *Opt. Lett.* **40** 2882
- [10] Goya K, Uehara H, Konishi D, Sahara R, Murakami M, Tokita S 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 102007
- [11] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, Bernier M 2018 *Opt. Lett.* **43** 4542
- [12] Zhang J X, Fu S J, Sheng Q, Xia W X, Zhang L, Shi W, Yao J Q 2023 *Chin. J. Lasers* **50** 0715001 (in Chinese) [张钧翔, 付士杰, 盛泉, 夏文新, 张露, 史伟, 姚建铨 2023 *中国激光* **50** 0715001]
- [13] Jackson S D, Pollnau M, Li J F 2011 *IEEE J. Quantum Electron.* **47** 471
- [14] Li J F, Wang L L, Luo H Y, Xie J T, Liu Y 2016 *IEEE Photonic. Tech. L.* **28** 673
- [15] Aydin Y O, Fortin V, Maes F, Jobin F, Jackson S D, Vallée R, Bernier M 2017 *Optica* **4** 235
- [16] Li J F, Luo H Y, Liu Y, Zhang L, Jackson S D 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20** 15
- [17] Guo C Y, Lin J P, Tang Z Y, Li K Y, Tu L S, Wang J C, Liu X, Ruan S C 2022 *J. Light. Technol.* **40** 4397
- [18] Wang B, Cheng L H, Zhong H Y, Sun J S, Tian Y, Zhang X Q, Chen B J 2009 *Opt. Mater.* **31** 1658
- [19] Quimby R S, Miniscalco W J, Thompson B 1992 *Proc. SPIE Fiber Laser Sources and Amplifiers III* **17** WE3
- [20] Ivanova S, PelléF 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 1930
- [21] Zhou K M, Zhang L, Chen X F, Mezentssev V, Bennion I 2010 *Int. J. Smart Nano Mater.* **1** 237



# Numerical analysis and optimization of 2.8 $\mu\text{m}$ lightly-erbium-doped fluoride fiber laser based on cascaded transition\*

Xia Wen-Xin<sup>#</sup>   Fu Shi-Jie<sup>#</sup>   Zhang Jun-Xiang   Zhang Lu   Sheng Quan<sup>†</sup>  
 Luo Xue-Wen   Shi Wei<sup>‡</sup>   Yao Jian-Quan

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instrument  
 and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

( Received 31 May 2023; revised manuscript received 21 August 2023 )

## Abstract

Er<sup>3+</sup>-doped ZBLAN fiber laser is a promising approach to producing 2.8  $\mu\text{m}$  mid-infrared (MIR) laser. The long lifetime of the lower-laser-level  $^4\text{I}_{13/2}$  often results in serious self-terminating effect which harms the laser power and efficiency significantly, especially for the active fiber with low dopant concentration which is preferred for weak thermal issues but cannot depopulate the lower-laser-level effectively via the up-conversion process. The 1.6  $\mu\text{m}$  lasing ( $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ) in Er-ZBLAN fiber could deplete the population on  $^4\text{I}_{13/2}$ . Therefore, cascaded 2.8  $\mu\text{m}$  and 1.6  $\mu\text{m}$  lasing in Er<sup>3+</sup>-doped ZBLAN fiber provides a promising solution to the self-termination effects on laser power scaling. Moreover, the  $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$  1.6  $\mu\text{m}$  laser also has some overlap with the  $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$  excited state absorption (ESA) spectrum. The ions on the  $^4\text{I}_{9/2}$  level would then relax to the upper-laser-level of 2.8  $\mu\text{m}$  lasing ( $^4\text{I}_{11/2}$ ), and results in enhanced laser efficiency. In general, the 1.6  $\mu\text{m}$  cascaded lasing in 2.8  $\mu\text{m}$  Er-ZBLAN fiber laser involves both lasing and ESA. The two processes have different spectra and different influences on the 2.8  $\mu\text{m}$  laser gain. Therefore, there should exist an optimal wavelength of the 1.6  $\mu\text{m}$  laser, which would balance the two processes, ensuring the lower-laser-level depopulation while maximizing the ion recycling. Therefore, we develop a comprehensive numerical model of cascaded 2.8  $\mu\text{m}$  and 1.6  $\mu\text{m}$  lasers based on Er-ZBLAN fiber. After the numerical model is verified by the previous experimental results, the effects of MIR and 1.6  $\mu\text{m}$  lasing wavelengths on the power and conversion efficiency of 2.8  $\mu\text{m}$  laser are investigated in depth. The results show that a suitable trade-off between the two processes can be reached with the cascaded lasing wavelength of 1610 nm, for the optimized 2.8  $\mu\text{m}$  laser power/efficiency. Moreover, the influence of 1.6  $\mu\text{m}$  laser cavity feedback on the power/efficiency characteristics of the 2.8  $\mu\text{m}$  laser is also investigated. It is found that the feedback at 1.6  $\mu\text{m}$  is very low, even only 4% is provided by the Fresnel reflection of the fiber facet, which can effectively generate 1.6  $\mu\text{m}$  laser and significantly improve the efficiency of 2.8  $\mu\text{m}$  laser.

**Keywords:** mid-infrared laser, fiber laser, cascaded laser, erbium-doped fluoride fiber

**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.Lh, 78.45.+h

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230903

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62375201, 62105240, 62075159, 61975146, 62275190), the Seed Foundation of Tianjin University, China (Grant No. 2023XPD-0020), and the Key R&D Program of Shandong Province, China (Grant Nos. 2020CXGC010104, 2021CXGC010202).

<sup>#</sup> These authors contributed equally.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [shengquan@tju.edu.cn](mailto:shengquan@tju.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [shiwei@tju.edu.cn](mailto:shiwei@tju.edu.cn)



## 基于级联跃迁的2.8 $\mu\text{m}$ 低掺铒氟化物光纤激光器数值分析与优化

夏文新 付士杰 张钧翔 张露 盛泉 罗学文 史伟 姚建铨

## Numerical analysis and optimization of 2.8 $\mu\text{m}$ lightly-erbium-doped fluoride fiber laser based on cascaded transition

Xia Wen-Xin Fu Shi-Jie Zhang Jun-Xiang Zhang Lu Sheng Quan Luo Xue-Wen Shi Wei Yao Jian-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 224205 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230903

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230903>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于二维纳米材料可饱和吸收体的中红外超快光纤激光器

Two-dimensional material as a saturable absorber for mid-infrared ultrafast fiber laser

物理学报. 2020, 69(18): 188101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200472>

#### 基于铋纳米片可饱和吸收被动调Q中红外单晶光纤激光器

Bismuth nanosheets based saturable-absorption passively Q-switching mid-infrared single-crystal fiber laser

物理学报. 2020, 69(18): 184205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200337>

#### 基于偏振依赖多模-单模-多模光纤滤波器的波长间隔可调谐双波长掺铒光纤激光器

Continuously spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on polarization-dependent in-line multimode-single-mode-multimode fiber filter

物理学报. 2019, 68(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190297>

#### 530 W全光纤结构连续掺铥光纤激光器

530 W all-fiber continuous-wave Tm-doped fiber laser

物理学报. 2020, 69(18): 184209 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200466>

#### 光纤激光器中包层功率剥离器散热性能的优化

Optimization of thermal performance of cladding power stripper in fiber laser

物理学报. 2020, 69(1): 014204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191093>

#### 基于1556 nm光纤激光器频率分裂效应的应力测量

Stress measurement based on 1556 nm fiber laser frequency splitting effect

物理学报. 2019, 68(10): 104201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182171>