中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 12 期: 124211
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

全光纤化中红外钬镨共掺3.9-μm氟化铟光纤激光器数值分析

梁晓琳, 包本刚, 王林惠*, 周松青

湖南科技学院, 智能制造学院, 永州 425199
*联系人, E-mail: wlh3362@huse.edu.cn

收稿日期: 2025-12-23; 接受日期: 2026-03-17; 网络出版日期: 2026-09-03
湖南省自然科学基金区域联合项目(编号: 2025JJ70506)、湖南省自然科学基金青年基金(编号: 2024JJ622)和湖南省教育厅重点科研项目(编号: 23A0581)资助

摘要 基于钬离子与镨离子之间高效能量转移机制, 提出了一种实现中红外3.9 μm全光纤激光器高效运转的方法. 通过在氟化铟光纤中同时掺杂钬离子与镨离子, 并在光纤两端刻写一定反射比例的布拉格光纤光栅, 设计了全光纤结构钬镨共掺氟化铟3.9 μm光纤激光器. 基于该结构建立了激光器速率方程模型, 仿真计算了掺杂浓度、泵浦功率、光纤长度、谐振腔耦合输出率和上能级粒子寿命对激光器输出特性的影响规律. 结果表明, 通过引入镨离子的能量转移机制, 可以消除下能级粒子, 实现高效率中红外3.9 μm激光连续输出, 在高掺杂条件下的斜率效率为17.8%, 接近理论极限Stokes效率(22.7%), 可有效解决单掺钬离子时效率低的问题.

关键词 中红外, 全光纤激光器, 能量转移, 数值分析, Ho^{3+}/Pr^{3+}共掺杂, 连续波

PACS: 42.55.-f, 42.55.Ah, 42.55.Rz, 42.60.Lh

1 引言

中红外3.9 μm波段激光器因其波长特殊、大气透过率高等特点, 在红外遥感、激光医疗、光谱学以及量子材料相关前沿技术等领域有广泛应用前景和应用价值[1–4], 目前, 产生3.9 μm波段激光的方式主要有DF气体激光器[5]、Fe:ZnSe/Fe:ZnS固体激光器[6–8]、稀土掺杂光纤激光器[2,9–12]、光学参量振荡器(如基于PPLN晶体[13]和ZGP晶体[14])和光学参量放大过程(如基于$BaGa_4Se_7$晶体获得3–5 μm[15]以及利用GaSe晶体获得更长波长输出[16])等. 相比较固体激光器和传统的气体激光器, 光纤激光器具有效率高、光束质量好、结构紧凑、便携性好等优点, 因而中红外3.9 μm波段光纤激光器成为国内外研究热点. 近年来, 随着空芯光纤技术快速发展, 通过在空芯光纤中充入不同气体以实现不同波长激光输出成为研究热点[17], 并在基于HBr气体获得中红外3.9 μm波段激光输出[18], 基于CO_2气体获得的最长激射波长达到近5 μm[19]. 然而, 中红外空芯光纤激光器存在输出功率较低、效率不高、充放气装置导致结构复杂等问题. 相比较而言, 基于稀土

引用格式: 梁晓琳, 包本刚, 王林惠, 等. 全光纤化中红外钬镨共掺3.9-μm氟化铟光纤激光器数值分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 124211
Liang X L, Bao B G, Wang L H, et al. Numerical analysis of mid-infrared 3.9-μm Ho^{3+}/Pr^{3+} co-doped InF all-fiber laser (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 124211, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0641

© 2026《中国科学》杂志社

掺杂(Ho^{3+})氟化物中红外光纤激光器结构简单，有望实现全光纤结构的3.9 μm波段激光输出，因而受到研究人员青睐. 1995年，Schneider等人利用640 nm染料激光器泵浦掺Ho^{3+}离子的氟化锆光纤(ZBLAN)，并通过液氮对光纤进行冷却，基于3.9和1.2 μm级联激射机制，首次获得3.9 μm波段光纤激光连续输出，功率为1 mW[9]; 随后，他将泵浦源更换为890 nm钛宝石激光器, 将3.9 μm波段激光输出功率提升至11 mW[10], 并揭示了激光输出功率随光纤冷却温度升高而降低的变化关系. 进入21世纪后, 随着材料工艺的不断进步, 研究人员围绕稀土掺杂的氟化锆(ZBLAN)光纤开展了大量研究工作，在室温下获得功率达4.5 W、最长波长为3.78 μm的连续光纤激光输出[12]. 由于氟化锆光纤的声子能量偏高，且在3.5 μm以上波段损耗增加，不利于3.9 μm波段高效产生. 为此, 研究人员开发出长波传输损耗和声子能量更低的氟化铟(InF)光纤，并研究了Ho^{3+}离子在该类光纤中的光谱参数[20,21]. 2018年, Maes等人[2]报道了在室温下基于高掺Ho^{3}+离子的InF光纤获得波长为3.92 μm的连续激光输出, 功率达到近200 mW, 泵浦阈值超过4 W, 斜率效率较低, 约为10%. 近年来，利用飞秒激光在氟化物光纤上刻写光栅的技术越来越成熟，以及石英光纤与氟化物光纤异质焊接技术取得突破. 2024年，Boilard等人[22]实现全光纤结构3.9 μm激光输出，激光功率达到1.7 W，斜率效率为9.2%. Ho^{3+}离子$^5I_5$能级的粒子向下跃迁至$^5I_6$能级, 产生3.92 μm光子，由于下能级$^5I_6$的寿命(6.2 ms)远远大于上能级$^5I_5$寿命(0.14 ms), 在连续运转条件下, 激光上能级粒子数不断消耗, 而激光下能级粒子数持续累积, 这将不利于达到激光运转的必要条件, 即粒子数反转, 通常导致激光运转效率较低，甚至发生自终止现象[23]. 通过离子间的相互作用，包括级联激射、能量转移或能量上转换等机制，或采用多波长泵浦方式，可以有效解决自终止问题, 并提高激光运转效率[24]. 比如, 在掺Er^{3+}氟化物光纤中共掺Pr^{3+}, 通过Er^{3+}与Pr^{3+}间相互作用来消耗Er^{3+}的激光下能级粒子，实现激光高效运转[25]. Ho^{3+}与Pr^{3+}之间也存在能量转移过程, 前期研究人员在利用掺Ho^{3+}氟化物光纤获得2.9 μm激光输出时, 通过共掺Pr^{3+}，以提高激光器工作效率[26]. 2018年, Quimby[27]提出采用波长为910和2120 nm激光器同时泵浦Ho:InF光纤获得4 μm激光输出，并进行了数值模拟. 2021年，Zhou等人[28]数值模拟并分析了888和962 nm双波长激光器泵浦高掺Ho^{3+}氟化铟光纤激光器工作特性. 相对单波长泵浦, 双波长泵浦激光器结构更为复杂. 2022年, Cao等人[29]提出利用级联激射机制获得3.9 μm激光输出，对激光器工作特性进行了模拟计算，并分别提出了优化建议. 然而，目前尚未见通过Ho^{3+}氟化物光纤中共掺Pr^{3+}，即利用Ho^{3+}与Pr^{3+}能量转移机制以实现3.9 μm激光输出的相关数值模拟与实验报道.

本文提出在氟化铟光纤中共掺钬离子(Ho^{3+})和镨离子(Pr^{3+})，设计布拉格光纤光栅构成谐振腔的全光纤化结构，通过Pr^{3+}引入的能量转移机制提升激光运转效率. 建立了全光纤化中红外3.9 μm钬镨共掺激光器速率方程模型，模拟计算了激光器相关参数对激光器输出特性的影响规律. 结果表明，该激光器结构可以获得高效3.9 μm激光输出，与全光纤单掺Ho^{3+}激光器相比, 斜率效率提升将近1倍.

2　理论建模

全光纤化中红外3.9 μm钬镨共掺氟化铟光纤激光器结构设计如图1所示，泵浦光源采用中心波长为888 nm的带尾纤输出的半导体激光器，尾纤纤芯直径为220 μm，数值孔径(Numerical Aperture, NA)为0.22, 增益光纤为钬镨共掺氟化铟光纤(Ho^{3+}/Pr^{3+}:InF)，其纤芯直径为16 μm，包层直径为100 μm. 泵浦源尾纤和增益光纤通过异质熔接技术进行熔接处理. 增益光纤掺杂浓度主要考虑高掺杂和低掺杂两种情况，高掺杂光纤中Ho^{3+}离子浓度为10 mol%，Pr^{3+}离子浓度为1 mol%, 低掺杂光纤中Ho^{3+}离子浓度为2 mol%, Pr^{3+}离子浓度为0.2 mol%. 在增益光纤两端刻写光纤布拉格光栅(FBG1和FBG2)以构成谐振腔. 其中, FBG1为高反光栅，888 nm和3.92 μm处反射率分别为0.5%和99%, FBG2为部分反射光栅，888 nm处反射率为99%，在3.92 μm处反射率根据需要进行设置. 图2为Ho^{3+}/Pr^{3+}共掺InF光纤中部分能级及跃迁过程示意图，基态Ho^{3+}离子通过吸收888 nm泵浦光子，向上跃迁至$^5I_5$能级，该能级粒子向下跃迁至$^5I_6$能级，同时产生3.92 μm光子，处于$^5I_6$能级的粒子将参与以下三个过程[22]: (1) 通过能量转移机制将能量转移给Pr^{3+}离子, 该粒子向下跃迁到基态，这个过程起到的关键作用是消耗激光下能级粒子数，促成粒子数反转，提高激光运转效

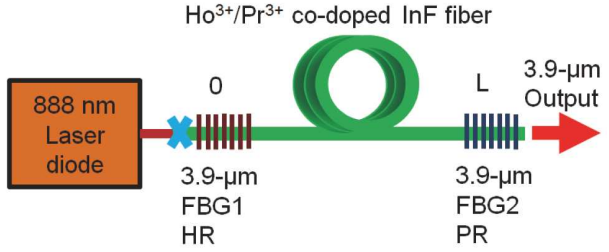


图 1　(网络版彩图)全光纤化中红外3.9-μm　Ho^{3+}/Pr^{3+}共掺InF激光器结构示意图

Figure 1　(Color online) Schematic layout of mid-infrared 3.9-μm Ho^{3+}/Pr^{3+} co-doped InF all-fiber laser.

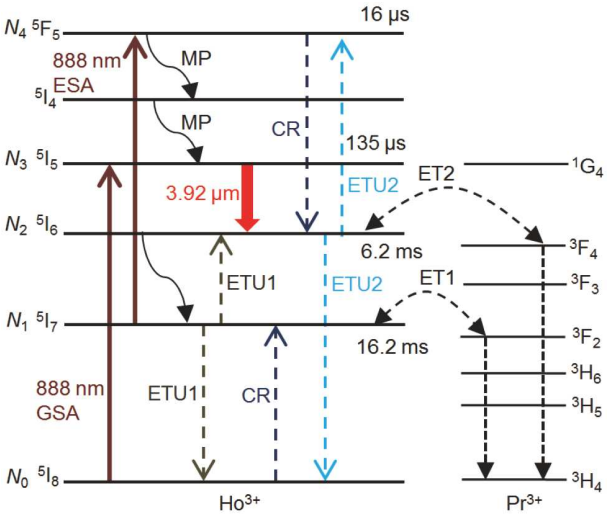


图 2　(网络版彩图)　Ho^{3+}/Pr^{3+}共掺InF全光纤激光器部分能级及跃迁过程示意图

Figure 2　(Color online) Schematic diagram of partial energy levels relevant and transition processes of the Ho^{3+}/Pr^{3+} co-doped InF all-fiber laser.

率[30]，这也是掺入Pr^{3+}的主要目的; (2) 通过能量转移上转换, 分别向上能级$^5F_5$能级和基态跃迁; (3) 向下弛豫到下能级$^5I_7$能级. $^5I_7$能级的粒子也参与三个过程[31]: (1) 通过吸收888 nm泵浦光子, 向上跃迁至$^5F_5$能级, 这也就是激发态吸收; (2) 通过能量转移机制将能量转移给Pr^{3+}离子, 该粒子向下跃迁到基态; (3) 通过能量转移上转换, 分别向上能级$^5I_6$能级和基态跃迁, 该过程将积累3.92 μm激光下能级$^5I_6$能级粒子，不利于激光运转, 此外，$^5I_7$能级粒子也通过弛豫跃迁至基态. 处于激发态$^5F_5$能级和处于基态的粒子通过交叉弛豫，分别向激光下能级$^5I_6$能级跃迁和向上跃迁至$^5I_7$能级.

通过上述激光动力学过程分析，基于粒子数方程和功率传输方程，对888 nm激光泵浦Ho^{3+}/Pr^{3+}共掺InF光纤产生3.92 μm激光的动力学过程进行建模，考虑到Pr^{3+}浓度比Ho^{3+}上能级粒子数量大，而且Pr^{3+}上能级粒子向下弛豫时间很短, 因此, 计算过程中只考虑Ho^{3+}各能级粒子数密度变化, 相关粒子数速率方程表示为[29]

$$\frac{\mathrm{d}N_4(z,t)}{\mathrm{d}t}=R_{\mathrm{ESA}}-W_{40}N_4(z,t)N_0(z,t)-\frac{N_4(z,t)}{\tau_4}+W_{22}N_2^2(z,t), \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}N_3(z,t)}{\mathrm{d}t}=R_{\mathrm{GSA}}+\beta_{43}\frac{N_4(z,t)}{\tau_4}-R_{\mathrm{SE}}-\frac{N_3(z,t)}{\tau_3}, \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}N_2(z,t)}{\mathrm{d}t}=&R_{\mathrm{SE}}(z,t)+\sum_{i=3-4}\beta_{i2}\frac{N_i(z,t)}{\tau_i}\\&+W_{40}N_4(z,t)N_0(z,t)+W_{11}N_1^2(z,t)\\&-\frac{N_2(z,t)}{\tau_2}-2W_{22}N_2^2(z,t)\\&-W_{\mathrm{ET2}}N_2(z,t)N_{\mathrm{Pr}},\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}N_1(z,t)}{\mathrm{d}t}=&\sum_{i=2-4}\beta_{i1}\frac{N_i(z,t)}{\tau_i}+W_{40}N_4(z,t)N_0(z,t)\\&-\frac{N_1(z,t)}{\tau_1}-R_{\mathrm{ESA}}-2W_{11}N_1^2(z,t)\\&-W_{\mathrm{ET1}}N_1(z,t)N_{\mathrm{Pr}},\end{aligned} \tag{4}$$

$$N_{\mathrm{t}}=N_0(z,t)+N_1(z,t)+N_2(z,t)+N_3(z,t)+N_4(z,t), \tag{5}$$

式中，N_0为基态粒子数密度，N_1为$^5I_7$能级粒子数密度，N_2为$^5I_6$能级粒子数密度，N_3为$^5I_5$能级粒子数密度，N_4为$^5F_5$能级粒子数密度，N_{t}为Ho^{3+}掺杂浓度; τ_i为相应的i能级寿命，W_{11}，W_{22}和W_{40}分别为能量转移上转换ETU1，ETU2和交叉弛豫CR过程相关的速率参数; W_{ET1}和W_{ET2}分别为Ho^{3+}离子向Pr^{3+}离子能量转移过程ET1和ET2相关的速率参数, 与Ho^{3+}和Pr^{3+}浓度相关[30]; β_{ij}为i能级向j能级弛豫的比例; R_{GSA}, R_{ESA}和R_{SE}分别为基态泵浦吸收速率、激发态吸收速率和激光发射速率, 其表达式分别为[32]

$$R_{\mathrm{GSA}}=\frac{\lambda_{\mathrm{p}}\Gamma_{\mathrm{p}}\sigma_{\mathrm{GSA}}}{hcA_{\mathrm{eff}}}N_0(z,t)[P_{\mathrm{p}}^{+}(z,t)+P_{\mathrm{p}}^{-}(z,t)], \tag{6}$$

$$R_{\mathrm{ESA}}=\frac{\lambda_{\mathrm{p}}\Gamma_{\mathrm{p}}\sigma_{\mathrm{ESA}}}{hcA_{\mathrm{eff}}}N_1(z,t)[P_{\mathrm{p}}^{+}(z,t)+P_{\mathrm{p}}^{-}(z,t)], \tag{7}$$

$$R_{\mathrm{SE}}=\frac{\lambda_{\mathrm{s}}\Gamma_{\mathrm{s}}\sigma_{\mathrm{SE}}}{hcA_{\mathrm{eff}}}N_3(z,t)[P_{\mathrm{s}}^{+}(z,t)+P_{\mathrm{s}}^{-}(z,t)], \tag{8}$$

式中，λ_{p}和λ_{s}分别为泵浦光和激光波长，σ_{GSA}为基态吸收截面, σ_{ESA}为激发态吸收截面, σ_{SE}为激光发射截面; h为普朗克常量，c为光速，A_{eff}为纤芯的有效横截面积; $P_{\mathrm{p}}^{+}(z,t)$和$P_{\mathrm{p}}^{-}(z,t)$分别为前向和后向传输的泵浦光功

率, $P_s^+(z,t)$和$P_s^-(z,t)$分别为前向和后向传输的激光功率, 其表达式如下[32]:

$$\pm\frac{\partial P_p^{\pm}(z,t)}{\partial z}+\frac{\partial P_p^{\pm}(z,t)}{v_g\partial t}$$
$$=-\Gamma_p\sigma_{GSA}N_0(z,t)P_p^{\pm}(z,t)$$
$$-\Gamma_p\sigma_{ESA}N_1(z,t)P_p^{\pm}(z,t)-\alpha_pP_p^{\pm}(z,t), \quad (9)$$

$$\pm\frac{\partial P_s^{\pm}(z,t)}{\partial z}+\frac{\partial P_s^{\pm}(z,t)}{v_g\partial t}$$
$$=\Gamma_s\sigma_{SE}N_3(z,t)P_s^{\pm}(z,t)$$
$$+\Gamma_s\frac{2hc^2}{\lambda_s^3}\sigma_{SE}N_3(z,t)\Delta_{ASE}-\alpha_sP_s^{\pm}(z,t), \quad (10)$$

式中, v_g为在光纤中的传播速度, α_p和α_s分别为光纤本征泵浦吸收损耗和激光吸收损耗, Δ_{ASE}为放大的自发辐射带宽. Γ_p和Γ_s分别为泵浦光和激光的重叠因子, 其中Γ_p为泵浦光的功率填充因子, 等于纤芯横截面积与内包层横截面积的比值[32]. 在信号光为高斯光束时, 高斯半径为$\omega_0=r_{core}(0.65+1.619V^{-1.5}+2.876V^{-6})$[30], 则有$\Gamma_s=1-\exp(-2(r_{core}/\omega_0)^2)$[30]. V为归一化频率, 其计算式为$V=2\pi r_{core}NA/\lambda_s$, NA为纤芯的数值孔径. 泵浦光和信号光在谐振腔的两个断面处遵循边界条件如下:

$$P_p^+(0,t)=P_p^-(0,t)R_{p0}+P_{in0}, \quad (11)$$

$$P_p^-(L,t)=P_p^+(L,t)R_{pL}+P_{inL}, \quad (12)$$

$$P_s^+(0,t)=P_s^-(0,t)R_{s0}, \quad (13)$$

$$P_s^-(L,t)=P_s^+(L,t)R_{sL}, \quad (14)$$

式中, 下标0和L分别对应谐振腔的两端(如图1所示). R_{p0}和R_{pL}分别为FBG1和FBG2对泵浦光的反射率, R_{s0}和R_{sL}分别为FBG1和FBG2对信号光的反射率, P_{in}为FBG1处注入的泵浦功率, 激光输出功率为

$$P_{out}=(1-R_{sL})P_s^+(L,t). \quad (15)$$

以上方程仿真计算过程中采用有限差分算法进行求解[33], 需要考虑的相关参数如表1–3所示.

表 1　Ho^{3+}离子光谱常数[34]

Table 1　Constant spectroscopic parameters of Ho^{3+} ions

参数	数值	参数	数值
τ_1	16.2 ms	β_{10}	1
τ_2	6.2 ms	B_{21}, β_{20}	0.058, 0.942
τ_3	135 μs	B_{32}, β_{31}, β_{30}	0.013, 0.43, 0.557
τ_4	16.3 μs	B_{43}, β_{42}, β_{41}, β_{40}	0.004, 0.046, 0.192, 0.758

表 2　光谱参数和光纤参数

Table 2　Spectroscopic and fiber parameters

参数	数值	
N_{Ho}	4×10^{26} cm^{-3} (2 mol.%)[20]	2×10^{27} cm^{-3} (10 mol.%)[20]
N_{Pr}	4×10^{25} cm^{-3} (0.2 mol.%)	2×10^{26} cm^{-3} (1 mol.%)
L	0.5–2.5 m	
d_{core}	1.6×10^{-5} m	
d_{clad}	1.0×10^{-4} m	
λ_p	8.88×10^{-7} m	
λ_s	3.92×10^{-6} m	
σ_{GSA}	4.3×10^{-26} m^2[20]	
σ_{ESA}	3.0×10^{-25} m^2[21]	
σ_{SE}	3.7×10^{-25} m^2[20]	
α_s	0.046 m^{-1}[2]	
α_P	0.1 m^{-1}[20]	
n	1.49	
Δ_{ASE}	1.0×10^{-7} m[20]	
W_{11} (m^3 s^{-1})	2.3×10^{-24}[30]	2.8×10^{-23}[30]
W_{22} (m^3 s^{-1})	2.08×10^{-23}[30]	2.5×10^{-22}[30]
W_{40} (m^3 s^{-1})	4.2×10^{-24}[30]	5.0×10^{-23}[30]
W_{ET1} (m^3 s^{-1})	1.5×10^{-22}[30]	4.5×10^{-22}[30]
W_{ET2} (m^3 s^{-1})	5.5×10^{-22}[30]	2.5×10^{-21}[30]

表 3　谐振腔参数

Table 3　Parameters of laser resonator

参数	数值
R_{p0}	0.005
R_{pL}	0.01
R_{s0}	0.99
R_{sL}	Various

3　计算结果与讨论

3.1　激光产生动力学分析

仿真模拟典型条件下钬镨共掺3.9 μm连续光纤激光产生动力学过程, 如图3所示. 模拟计算参数为: Ho^{3+}掺杂浓度2×10^{27} m^{-3}, Pr^{3+}掺杂浓度2×10^{26} m^{-3}, 光纤长度0.8 m, 泵浦功率6 W, 谐振腔耦合输出率为35%. 从图中可以看出, 当泵浦光注入增益光纤后, Ho^{3+}离子上能级粒子数急剧上升, 此阶段激光上能级$^5I_5$粒子数不断集聚, 尚未向下跃迁, 因此激光输出功率和激光下能级$^5I_6$粒子数未发生变化. 当上能级$^5I_5$粒子数积累到一定程度后, 开始向下跃迁, 形成弛豫振荡激光尖

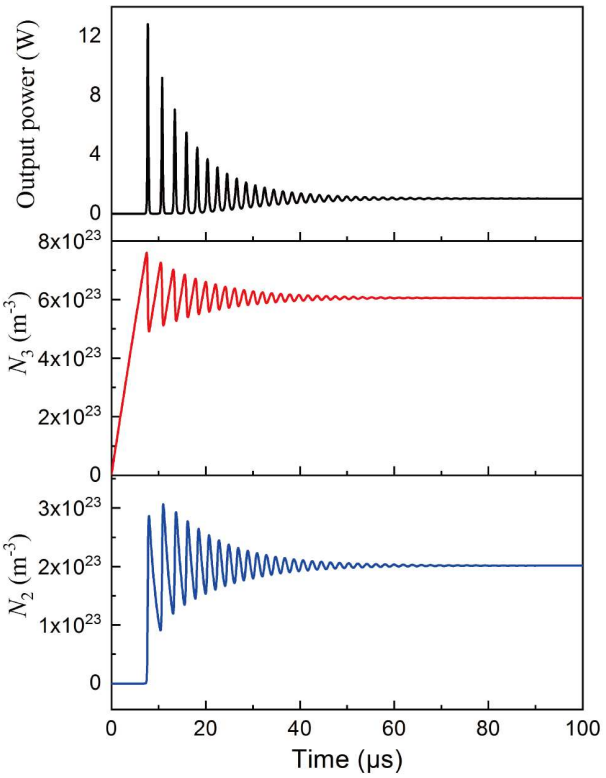


图 3　(网络版彩图) 3.9 μm激光振荡动力学过程模拟结果
Figure 3　(Color online) Simulation results of 3.9 μm laser oscillation dynamics process.

峰, 下能级$^5I_6$粒子数开始增多, 下能级$^5I_6$粒子与Pr^{3+}离子通过能量转移过程使得下能级$^5I_6$粒子数减少. 在上能级$^5I_5$粒子数消耗的同时, 泵浦光持续将基态Ho^{3+}离子抽运至上能级$^5I_5$, Pr^{3+}离子持续将激光下能级$^5I_6$粒子数清除, 通过多次的消耗与积累动态过程后, 最终达到一个稳定的平衡状态, 即激光上下能级粒子数和激光输出功率维持一定水平, 这个动态平衡过程持续时间为数十微秒. 激光器建立动态平衡的时间取决于激光器谐振腔内的动态增益和损耗, 泵浦功率越高, 耦合输出率越低, 达到稳态平衡输出所需的时间越短.

3.2　泵浦功率对激光输出功率的影响

分析计算不同掺杂条件下激光器输出功率随泵浦功率变化特性, 计算结果如图4所示. 激光器耦合输出率为35%, 光纤长度为0.8 m. 可以看出, 在图中给出的泵浦功率范围内, 3.9 μm激光功率与泵浦功率呈较好的线性关系, 在最大泵浦功率为16 W的条件下, 低掺杂和高掺杂浓度光纤条件下最大输出功率分别为1.3

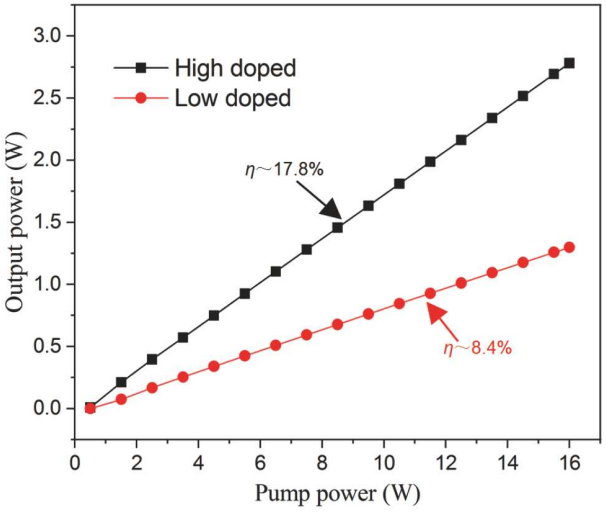


图 4　(网络版彩图)激光输出功率随泵浦功率变化关系
Figure 4　(Color online) Laser output power as a function of pump power.

和2.8 W, 斜率效率分别为8.4%和17.8%. 高掺杂条件下的斜率效率接近理论极限Stokes效率(22.7%), 比Maes等人[2]报道的单掺Ho^{3+}的3.9 μm光纤激光器的斜率效率(~10.2%)高出约75%, 泵浦阈值降低将近1个数量级, 而相比较全光纤结构的单掺Ho^{3+}的3.9 μm光纤激光器斜率效率(~9.2%)[22]高出近1倍. 通常, 在稀土离子掺杂固体激光器中, 不同掺杂浓度下输出功率随激光泵浦功率变化的斜率不同. 其原因及背后的核心物理机制主要在于不同掺杂浓度下掺杂离子对泵浦光的吸收和离子间相互作用这两方面的差异. 在泵浦光吸收方面, 泵浦光被增益介质吸收的比例直接影响有多少泵浦能量被转化为粒子数反转, 进而影响单位体积内的激光产生效率. 通常, 低掺杂浓度时斜率效率低主要受限于吸收不完全, 而高掺杂浓度下, 泵浦吸收效率更高. 在离子间相互作用方面, 相对低掺杂浓度, 高掺杂浓度下的交叉弛豫、能量转移上转换和能量转移等离子间相互作用更强, 这些作用过程将会影响激光反转粒子数, 进而影响激光运转效率, 一方面, Ho^{3+}与Pr^{3+}之间的能量转移作用更强, 有利于消耗激光下能级粒子数, 增加粒子数反转比例, 提升激光运转效率; 另一方面, Ho^{3+}与Ho^{3+}之间的能量转移上转换作用(ETU1)也增强, 不利于粒子数反转, 将降低激光运转效率, 这些离子相互作用的综合效果是激光斜率效率与理论Stokes效率存在差距的主要原因. Quimby[27]提出采用波长为

910和2120 nm激光器泵浦Ho^{3+}:InF光纤获得3.9 μm激光输出, 并模拟计算得到斜率效率达到17%. 相比较而言, 本文采用的机制可能具有以下两方面优势: 一是本文采用单一波长的半导体激光器泵浦, 结构更为简单; 二是文献中第二个波长泵浦激光采用半导体激光泵浦掺杂光纤或晶体获得更长波长, 因而本文的总电效率较高. 氟化物光纤损伤实验结果表明, ZBLAN光纤的损伤阈值为25 MW cm^{-2} [24], 纤芯为16 μm的ZBLAN光纤可以承受的激光功率达到近50 W, 相比ZBLAN光纤, InF光纤阈值稍低, 因此, 可以预测利用该光纤激光器有望实现10 W级激光功率输出.

3.3　光纤长度对激光输出功率的影响

一般光纤激光器的增益光纤长度对激光器输出功率等特性有重要影响. 分析计算泵浦功率一定时, 不同掺杂条件下激光器归一化输出功率随增益光纤长度变化关系, 如图5所示. 可以看出, 在低掺杂和高掺杂浓度条件下, 增益光纤均存在最佳长度使得激光器输出功率最大, 最佳长度分别为2.2–2.4和~0.8 m. 相比低掺杂浓度, 高掺杂浓度的增益光纤吸收泵浦光能力更强, 可以在较短的距离内吸收大部分泵浦光. 当光纤长度超过最佳长度时, 后续基态粒子吸收的泵浦功率较低, 导致激光上能级$^5I_5$粒子数积累的速度不够, 同时激光下能级$^5I_6$粒子吸收3.9 μm光子, 产生额外损耗, 也就是说, 超过此长度的光纤产生的增益不足以抵消损耗, 因此激光功率反而出现了下降趋势.

3.4　耦合输出光纤光栅反射率对激光输出功率的影响

图6为激光输出功率随耦合输出光纤光栅反射率的变化关系. 从图中可以看出, 反射率在0.1–0.9范围内变化时, 在低掺杂和高掺杂浓度条件下激光功率均呈现先增加后下降趋势变化. 由于激光器谐振腔内增益和损耗动态博弈的过程, 使得光纤激光器一般存在最佳反射率. 一方面, 随着谐振腔输出镜反射率的增加, 腔内损耗降低, 相同泵浦功率下产生激光的阈值降低, 腔内光功率增加, 另一方面, 输出功率是腔内功率在输出镜处耦合输出的一部分, 因而反射率越高, 输出的比例越低. 在低掺杂浓度条件下, 输出光栅最佳反射率为0.3附近, 而在高掺杂浓度条件下, 最佳反射率为0.4–0.5之间, 因此, 在设计激光器输出镜耦合率时需要根据掺杂浓度进行综合考虑.

3.5　上能级荧光寿命对激光输出功率的影响

Schneider等人[10]首次报道利用掺Ho^{3+}离子的ZBLAN光纤获得3.9 μm激光输出时, 通过液氮对光纤进行了冷却, 而Maes等人[2]报道的3.92 μm光纤激光是在室温下获得的实验结果. 一般来说, 温度会对掺杂离

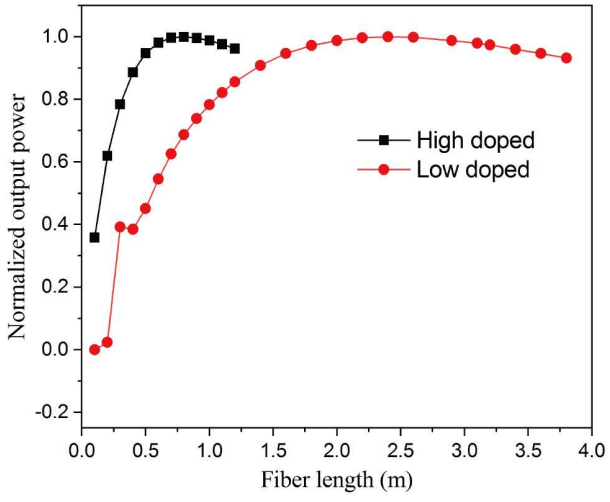


图 5　(网络版彩图)归一化激光输出功率随掺杂光纤长度变化关系

Figure 5　(Color online) Normalized laser output power versus doped fiber length.

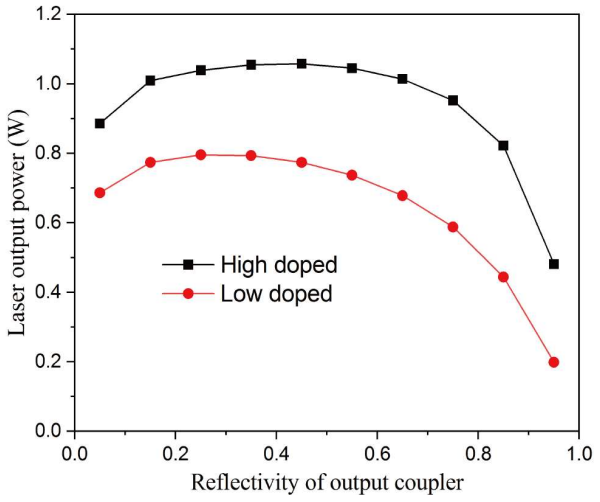


图 6　(网络版彩图)激光输出功率随耦合输出光栅反射率变化关系

Figure 6　(Color online) Laser output power as a function of reflectivity of output coupler.

子的上能级寿命产生影响，比如，Fe^{2+}的上能级寿命在室温和液氮低温条件下相差2个数量级[8]. 针对上述情况，分析了温度影响上能级寿命后，对激光输出功率的影响. 参考文献[8]，室温下Ho^{3+}上能级寿命为135 μs，初步估计低温下的寿命延长1个数量级，计算高掺杂浓度条件下，上能级寿命对激光输出功率的影响规律，如图7所示. 由图可见，随着上能级寿命的增加，激光功率呈上升趋势. 尽管寿命有益于提升激光功率，但是对输出功率影响较小，比如，寿命增加1个数量级后，激光功率仅提升0.05 W，相对增量约5%，也就是说，在这种运转机制下，激光上能级寿命变化对激光输出的影响较小.

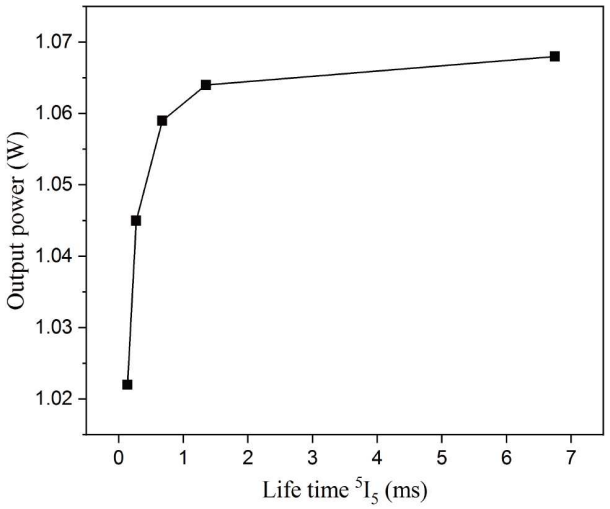


图 7　上能级$^5I_5$荧光寿命对3.9 μm激光输出功率的影响

Figure 7　Impacts of the fluorescence lifetime of upper laser level $^5I_5$ on 3.9 μm laser output power.

4　结论

基于钬离子与镨离子之间高效能量转换机制，本文提出了利用钬镨共掺氟化铟光纤获得中红外3.9 μm光纤激光输出. 通过建立理论计算模型，仿真分析了不同掺杂浓度、泵浦功率等条件下激光器输出特性变化规律，高掺杂浓度条件下更容易获得高效激光输出，存在谐振腔最佳耦合输出率和光纤最佳长度使得激光器工作效率最优，计算结果可以为该波段激光器件结构与实验设计提供参考依据.

参考文献

1　Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser. Nat Photon, 2012, 6: 423–431

2　Maes F, Fortin V, Poulain S, et al. Room-temperature fiber laser at 392 μm. Optica, 2018, 5: 761

3　Huang Y X, Zhao J M. Laser-induced electron coherence based on spatial self-phase modulation in quantum materials (in Chinese). J Light Scatt, 2024, 36: 52–62 [黄逸轩, 赵继民. 量子材料中基于空间自相位调制的激光诱导电子相干性. 光散射学报, 2024, 36: 52–62]

4　Huang Y, Zhao H, Li Z, et al. Laser-induced hole coherence and spatial self-phase modulation in the anisotropic 3D Weyl semimetal TaAs. Adv Mater, 2023, 35: 2208362

5　Wang H Y, Yuan S F, Li Q, et al. A discharge driven continuous wave single line DF/HF chemical laser for atmospheric absorption measurement (in Chinese). Chin J Laser, 2008, 35: 997–1000 [王红岩, 袁圣付, 李强, 等. 用于大气吸收测量的小型电激励连续波DF/HF选线化学激光器. 中国激光, 2008, 35: 997–1000]

6　Frolov M P, Korostelin Y V, Kozlovsky V I, et al. 3 J pulsed Fe:ZnS laser tunable from 3.44 to 4.19 μm. Laser Phys Lett, 2015, 12: 055001

7　Shen Y L, Wan Y C, Wang Y S, et al. 3.8 μm continuous-wave all solid-state Fe:ZnSe laser (in Chinese). Chin J Laser, 2023, 50: 0701008 [沈炎龙, 万颖超, 汪由胜, 等. 瓦级高效率中红外全固态3.8 μm连续波Fe:ZnSe激光器. 中国激光, 2023, 50: 0701008]

8　Shen Y, Wan Y, Zhu F, et al. High-power compact continuous-wave Fe:ZnSe laser at 4 μm with >50% overall conversion efficiency. Chin Opt Lett, 2024, 22: 081405

9　Schneider J. Fluoride fibre laser operating at 3.9 μm. Electron Lett, 1995, 31: 1250–1251

10　Schneide J, Carbonnier C, Unrau U B. Characterization of a Ho^{3+}-doped fluoride fiber laser with a 39-μm emission wavelength. Appl Opt, 1997, 36: 8595–8600

11　Henderson-Sapir O, Jackson S D, Ottaway D J. Versatile and widely tunable mid-infrared erbium doped ZBLAN fiber laser. Opt Lett, 2016, 41: 1676–1679

12　Zhang L, Fu S, Sheng Q, et al. 4.5 W Er-doped ZBLAN fiber laser at 3.78 μm. Opt Lett, 2025, 50: 2125

13　Chen B Y, Yu Y J, Wu C T, et al. High efficiency mid-infrared 3.8 μm MgO:PPLN optical parametric oscillator pumped by narrow linewidth

1064 nm fiber laser (in Chinese). Chin Opt, 2021, 14: 361–367 [陈柄言, 于永吉, 吴春婷, 等. 窄线宽1064 nm光纤激光泵浦高效率中红外3.8 μm MgO:PPLN光参量振荡器. 中国光学, 2021, 14: 361–367]

14 Liu G, Mi S, Yang K, et al. 161 W middle infrared $ZnGeP_2$ MOPA system pumped by 300 W-class Ho:YAG MOPA system. Opt Lett, 2021, 46: 82–85

15 Yang F, Yao J, Xu H, et al. High efficiency and high peak power picosecond mid-infrared optical parametric amplifier based on $BaGa_4Se_7$ crystal. Opt Lett, 2013, 38: 3903–3905

16 Liu Y, Zhao J, Wei Z, et al. High-power, high-repetition-rate tunable longwave mid-IR sources based on DFG in the OPA regime. Opt Lett, 2023, 48: 1052–1055

17 Wang Z F, Zhou Z Y, Cui Y L, et al. Research progress and prospect of fiber gas laser sources (II): Based on population inversion (in Chinese). Chin J Laser, 2021, 48: 0401009 [王泽锋, 周智越, 崔宇龙, 等. 光纤气体激光光源研究进展及展望(II): 基于粒子数反转. 中国激光, 2021, 48: 0401009]

18 Zhou Z Y, Li H, Cui Y L, et al. Optically pumped 4 μm CW HBr gas laser based on hollow-core fiber (in Chinese). Acta Opt Sin, 2020, 40: 1614001 [周智越, 李昊, 崔宇龙, 等. 基于空芯光纤的光泵浦4 μm连续波HBr气体激光器. 光学学报, 2020, 40: 1614001]

19 Li X X, Yang L Y, Zhou Z Y, et al. 4.8 μm laser output achieved with pure silica fiber (in Chinese). Chin J Laser, 2023, 50: 239–240 [李炫熹, 杨林永, 周智越, 等. 纯石英光纤实现4.8 μm激光输出. 中国激光, 2023, 50: 239–240]

20 Gomes L, Fortin V, Bernier M, et al. The basic spectroscopic parameters of Ho^{3+}-doped fluoroindate glass for emission at 3.9 μm. Opt Mater, 2016, 60: 618–626

21 Gomes L, Fortin V, Bernier M, et al. Excited state absorption and energy transfer in Ho^{3+}-doped indium fluoride glass. Opt Mater, 2017, 66: 519–526

22 Boilard T, Fortin V, Lemieux-Tanguay M, et al. 1.7 W holmium-doped fluoroindate fiber laser at 3920 nm. Opt Lett, 2024, 49: 2677–2680

23 Srinivasan B, Tafoya J, Jain R. High-power "Watt-level" CW operation of diode-pumped 27 μm fiber lasers using efficient cross-relaxation and energy transfer mechanisms. Opt Express, 1999, 4: 490–495

24 Zhu X, Jain R. 10-W-level diode-pumped compact 278 μm ZBLAN fiber laser. Opt Lett, 2007, 32: 26–28

25 Pollnau M, Jackson S D. Energy recycling versus lifetime quenching in erbium-doped 3-μm fiber lasers. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38: 162–169

26 Jackson S D. Single-transverse-mode 25-W holmium-doped fluoride fiber laser operating at 286 μm. Opt Lett, 2004, 29: 334

27 Quimby R S. Dual pumping scheme for efficient 4 μm operation of a Ho:InF_3 glass fiber laser. In: Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose, 2018

28 Zhou F, Li J, Luo H, et al. Numerical analysis of 3.92 μm dual-wavelength pumped heavily-holmium-doped fluoroindate fiber lasers. J Lightwave Technol, 2021, 39: 633–645

29 Cao J, Wei C, Zhou H, et al. Modeling and optimization of cascaded lasing in a holmium doped fluoride fiber laser with efficient output at 3.92 μm. Opt Express, 2022, 30: 31623

30 Li J, Gomes L, Jackson S D. Numerical modeling of holmium-doped fluoride fiber lasers. IEEE J Quantum Electron, 2012, 48: 596–607

31 Librantz A F H, Jackson S D, Jagosich F H, et al. Excited state dynamics of the Ho^{3+} ions in holmium singly doped and holmium, praseodymium-codoped fluoride glasses. J Appl Phys, 2007, 101: 123111

32 Luan K P, Shen Y L, Tao M M, et al. Numerical simulation of 3.5 μm dual-wavelength pumped Er:ZBLAN fiber lasers (in Chinese). Chin J Laser, 2019, 46: 1001008 [栾昆鹏, 沈炎龙, 陶蒙蒙, 等. 3.5 μm双波长泵浦Er:ZBLAN光纤激光器数值模拟. 中国激光, 2019, 46: 1001008]

33 Liang X L, Zhou S Q, Bao B G, et al. Modeling and analysis of mid-infrared gain-switched Fe:ZnSe laser pulse pumped by a 2.8 μm fiber laser (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 264211 [梁晓琳, 周松青, 包本刚, 等. 2.8 μm光纤激光器脉冲泵浦的中红外增益开关Fe:ZnSe激光器数值模拟. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 264211]

34 Loconsole A M, Falconi M C, Portosi V, et al. Numerical design of a gain-switched pulsed laser at 3.92 μm wavelength based on a Ho^{3+}-doped fluoroindate fiber. J Lightwave Technol, 2021, 39: 3276–3283

Numerical analysis of mid-infrared 3.9-μm Ho^{3+}/Pr^{3+} co-doped InF all-fiber laser

LIANG XiaoLin, BAO BenGang, WANG LinHui* & ZHOU SongQing

College of Intelligent Manufacturing, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, China
**Corresponding author (email: wlh3362@huse.edu.cn)*

A method for high efficiency operation of a mid-infrared 3.9 μm all-fiber laser is proposed based on the efficient energy transfer mechanism between holmium (Ho^{3+}) and praseodymium (Pr^{3+}) ions. An all-fiber laser is constructed by doping Ho^{3+} and Pr^{3+} into indium fluoride fiber and inscribing Bragg fiber gratings with optimized reflectivity ratios at both ends of the fiber. A rate equation model for the Ho^{3+}/Pr^{3+} co-doped 3.9 μm laser system is established, and the effects of doping concentration, pump power, fiber length, output coupling ratio, and upper-level particle lifetime on the output characteristics of the laser are simulated. The calculated results indicate that the lower energy level particles can be eliminated by introducing the energy transfer mechanism of Pr^{3+}, which realizes the particle number inversion and 3.9 μm laser high efficiency output. Under high doping conditions, a slope efficiency of 17.8% was achieved, approaching the theoretical Stokes limit of 22.7%. Therefore, this method is supposed to be an effective solution for low laser efficiency in singly Ho^{3+}-doped InF lasers.

mid-infrared, all-fiber laser, energy transfer, numerical analysis, Ho^{3+}/Pr^{3+} co-doped, continuous-wave

PACS: 42.55.-f, 42.55.Ah, 42.55.Rz, 42.60.Lh

doi: 10.1360/SSPMA-2025-0641