

全光纤化 2.8 μm 中红外被动调 Q 激光器数值分析王瑞^{1,2}, 张钧翔^{1,2}, 盛泉^{1,2}, 付士杰^{1,2}, 史伟^{1,2*}, 姚建铨^{1,2}¹天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072;²天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 提出了一种实现全光纤中红外激光器脉冲运转的方法。利用氟化物玻璃中镝离子(Dy^{3+})的 2.8 μm 波段的吸收截面与铒离子(Er^{3+})发射截面重合的特性,将掺镝氟化物光纤作为中红外波段的可饱和吸收体,实现 2.8 μm 掺铒氟化物光纤激光器全光纤结构的被动调 Q 脉冲运转;通过在可饱和吸收体两端引入中心波长为 3.1 μm 的光纤光栅,解决 Dy^{3+} 上能级寿命较长所导致的高泵浦功率下 Dy^{3+} 吸收饱和、进而导致被动调 Q 失效的问题。基于该结构建立了 2.8 μm 被动调 Q 掺铒光纤激光器的速率方程模型,计算了可饱和吸收体的参数及其两端的谐振腔反馈条件对 2.8 μm 激光器的脉冲运转功率和时间特性的影响。计算结果表明,通过在可饱和吸收体两端引入光纤光栅可以加快可饱和吸收体的恢复过程,使激光器能够在高泵浦功率下保持调 Q 脉冲运转。

关键词 激光器; 中红外激光器; 被动调 Q 激光器; 光纤可饱和吸收体; 掺铒光纤激光器

中图分类号 O432.1+2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1014002

Numerical Analysis of All-Fiber Passively Q-Switched Laser at 2.8 μm Mid-Infrared RegionWang Rui^{1,2}, Zhang Junxiang^{1,2}, Sheng Quan^{1,2}, Fu Shijie^{1,2}, Shi Wei^{1,2*}, Yao Jianquan^{1,2}¹Institute of Laser and Opto-Electronics, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract We propose a method to realize the pulsed operation of all-fiber mid-infrared lasers. The absorption cross-section of dysprosium (Dy^{3+}) ions is overlapped with the emission cross-section of erbium (Er^{3+}) ions in fluoride glass in the 2.8 μm wavelength region. On this basis, a piece of Dy^{3+} -doped fluoride fiber is used as a fiber saturable absorber to achieve passively Q-switched pulsed operation at 2.8 μm in the all-fiber structure of an Er^{3+} -doped fluoride fiber laser. Furthermore, a pair of fiber gratings with a central wavelength of 3.1 μm are placed at both ends of the saturable absorber to solve the problem of passively Q-switching failure caused by the absorption saturation of Dy^{3+} ions under high pump power due to the long lifetime of the upper energy level of Dy^{3+} ions. A rate equation model for this 2.8 μm passively Q-switched Er^{3+} -doped fiber laser is built in view of this structure. The effects of the saturable absorber parameters and the resonator feedback conditions on the pulsed operation power and time characteristics of the 2.8 μm laser are evaluated. Numerical results indicate that the introduction of fiber gratings accelerates the recovery process of the saturable absorber, which is conducive to maintaining the Q-switched pulsed operation at high pump power.

Key words lasers; mid-infrared laser; passively Q-switched laser; fiber saturable absorber; Er-doped fiber laser

收稿日期: 2021-11-03; 修回日期: 2021-11-22; 录用日期: 2021-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(62075159,61975146)

通信作者: *shiwei@tju.edu.cn

1 引言

波长在 $3\ \mu\text{m}$ 附近的中红外波段激光在光谱分析、生物医学和军事对抗等领域具有非常重要的应用,也是激光技术领域的研究热点^[1-2]。相比于基于非线性光学频率转换技术^[3]以及半导体激光器等产生中红外激光的方法,基于稀土离子能级跃迁的掺铒氟化物(ZBLAN)光纤激光器具有发射光谱宽、可直接用高功率 $976\ \text{nm}$ 半导体激光器泵浦等优点,是当前实现高功率、高光束质量中红外激光输出的常用技术手段之一^[4-5]。

在连续波运转方面,Aydin 等^[6]在 2017 年设计了 $1.6\ \mu\text{m}$ 和 $2.8\ \mu\text{m}$ 激光级联跃迁的掺铒光纤激光器,将级联跃迁产生的 $1.6\ \mu\text{m}$ 激光通过激发态吸收重复利用,使得 $2.8\ \mu\text{m}$ 激光斜效率远超斯托克斯极限,达到 50%。2018 年该组采用双端泵浦的方法将 $2.8\ \mu\text{m}$ 激光连续波输出功率提升至 $41.6\ \text{W}$ ^[7],这是目前公开报道的中红外光纤激光器的最高功率水平。在脉冲运转方面,锁模技术是产生超短脉冲、实现高功率的常见手段,可以通过非线性偏振旋转技术^[8-9]或可饱和吸收体^[10-11]等方法获得中红外波段的锁模激光,而调 Q 是产生纳秒脉冲、实现较高脉冲能量的主要方法。早期中红外波段的调 Q 光纤激光器多基于声光调制器(AOM)^[12-13]、电光调制器(EOM)^[14]或机械开关^[15]等方法;相较于结构复杂的主动调 Q 方法,被动调 Q 激光器具有结构简单紧凑、价格低廉等优点。中红外波段可饱和吸收材料的迅速发展为被动调 Q 激光器的实现提供了多种选择,例如半导体可饱和吸收镜^[16]、 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ ^[17-18]、石墨烯^[19]、黑磷^[20]、MXene^[21]等。2012 年,Wei 等^[17]采用 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 作为可饱和吸收体,获得了重复频率(PRF)为 $161\ \text{kHz}$ 、脉冲宽度为 $370\ \text{ns}$ 、峰值功率为 $5.34\ \text{kW}$ 、脉冲能量为 $2\ \mu\text{J}$ 的 $2.8\ \mu\text{m}$ 脉冲激光;2015 年,Qin 等^[20]采用二维材料黑磷作为可饱和吸收体,实现了重复频率为 $63\ \text{kHz}$ 、脉宽为 $1.18\ \mu\text{s}$ 、脉冲能量为 $7.7\ \mu\text{J}$ 的中红外脉冲输出;2020 年,Wei 等^[21]采用多层 MXene- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 作为可饱和吸收体,获得了重复频率为 $78.12\ \text{kHz}$ 、脉宽为 $1.04\ \mu\text{s}$ 、峰值功率为 $13.4\ \text{W}$ 、脉冲能量为 $13.93\ \mu\text{J}$ 的 $2.8\ \mu\text{m}$ 脉冲激光。然而,上述报道的中红外波段被动调 Q 光纤激光器多基于空间光路,不利于系统集成和实现全光纤化,并且受限于中红外波段中氟化物光纤机械强度较低,在近红外波段沉积二维

材料到拉锥光纤上实现全光纤化结构的方法^[22]在中红外光纤激光器中也不易实现。而掺杂稀土离子的有源光纤对信号光也具有可饱和吸收特性,可作为可饱和吸收体实现全光纤结构的被动调 Q 激光器,这避免了对光纤进行拉锥,因此其损伤阈值更高,对热效应不敏感。例如 2003 年 Adel 等^[23]报道了利用掺铒光纤作为掺铒光纤激光器可饱和吸收体的被动调 Q 激光器。虽然目前以有源光纤作为可饱和吸收体的被动调 Q 技术在近红外波段已经相对成熟^[23-24],但基于该结构的中红外波段被动调 Q 光纤激光器鲜有报道。

本文提出了一种以掺铒 ZBLAN 光纤作为可饱和吸收体实现 $2.8\ \mu\text{m}$ 中红外掺铒全光纤激光器被动调 Q 脉冲运转的方法。为解决 Dy^{3+} 上能级寿命较长($650\ \mu\text{s}$)导致其在高泵浦功率下易发生吸收饱和、失去调 Q 作用的问题,在掺 Dy^{3+} 可饱和吸收体两端引入 $3.1\ \mu\text{m}$ 光纤光栅以构成谐振腔,其受激辐射后释放上能级粒子数,从而可保证调 Q 效果。基于速率方程建立了相关理论模型,讨论了 $976\ \text{nm}$ 泵浦功率、可饱和吸收体长度和 Dy^{3+} $3.1\ \mu\text{m}$ 发射波段谐振腔反射率对脉冲激光输出特性的影响。结果表明,该结构能使可饱和吸收体快速恢复到未漂白的初始状态,有助于激光器在高泵浦功率下保持调 Q 脉冲运转。仿真结果证明了该结构的可行性,该研究为全光纤化的中红外被动调 Q 激光器提供了一种参考。

2 理论模型

图 1 为 $2.8\ \mu\text{m}$ 被动调 Q 光纤激光器结构示意图。泵浦源为多模 $976\ \text{nm}$ 半导体激光器;增益光纤选用商用掺铒 ZBLAN 双包层光纤,掺杂浓度为 6%(物质的量分数),内包层直径为 $250\ \mu\text{m}$,纤芯直径为 $18\ \mu\text{m}$,该光纤与一对刻写在无源匹配光纤上中心波长为 $2.8\ \mu\text{m}$ 的光纤布拉格光栅(FBG1, FBG2)共同构成激光谐振腔。其中,FBG1 为高反光栅,其反射率为 100%;FBG2 为部分反射光栅,反射率为 15%。为实现腔内激光调 Q 脉冲运转,在掺铒光纤后面级联一段掺铒光纤作为可饱和吸收体,基于掺铒 ZBLAN 光纤在 $2.8\ \mu\text{m}$ 处的可饱和吸收效应实现对腔内激光的被动调 Q。所使用的掺铒 ZBLAN 光纤的掺杂浓度为 0.2%,纤芯/包层尺寸与掺铒 ZBLAN 光纤匹配, Dy^{3+} 上能级寿命较长,在高泵浦功率水平下难以恢复到未漂白的状态,因此在掺铒 ZBLAN 光纤两端引入一对光纤光栅

(FBG3, FBG4), 中心波长选用 $3.1 \mu\text{m}$, 对应其发射峰, 所构成的掺镱 ZBLAN 光纤谐振腔能加速 Dy^{3+} 上能级粒子数释放, 有利于高泵浦功率下维持

$2.8 \mu\text{m}$ 激光系统稳定的脉冲运转。利用波分复用器(WDM)将系统产生的 $3.1 \mu\text{m}$ 激光滤除, 得到 $2.8 \mu\text{m}$ 单波长激光。

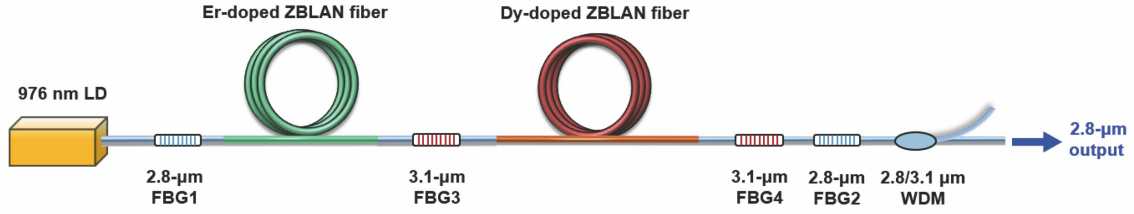


图 1 中红外被动调 Q 全光纤化激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of mid-infrared passively Q-switched all-fiber laser

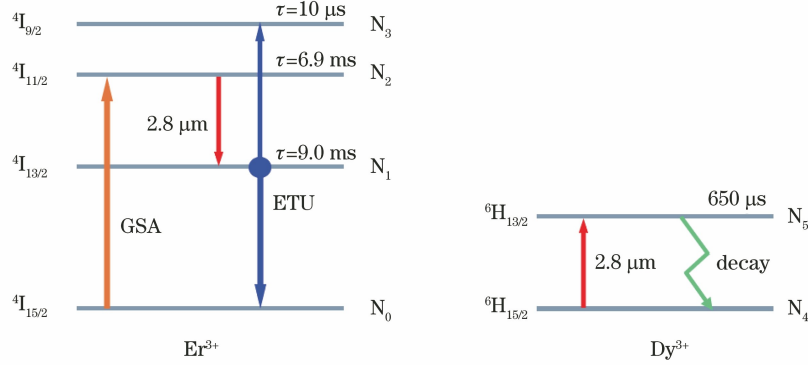


图 2 Er^{3+} 、 Dy^{3+} 能级及关于 $2.8 \mu\text{m}$ 激光的主要能级跃迁示意图

Fig. 2 Energy-level diagram of Er^{3+} and Dy^{3+} and transitions related to $2.8 \mu\text{m}$ laser

对于该激光系统, 其相关能级的粒子跃迁如图 2 所示。为简化理论模型, 仅考虑 Er^{3+} 中能量上转换(ETU)过程。在波长为 976 nm 的泵浦光激发下, 基态 $^4\text{I}_{15/2}$ 的 Er^{3+} 吸收能量(GSA)跃迁到激光上能级 $^4\text{I}_{11/2}$, 并在上能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 与下能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 间发生辐射跃迁, 产生 $2.8 \mu\text{m}$ 激光, ETU 过程

($^4\text{I}_{13/2}, ^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}, ^4\text{I}_{9/2}$) 有利于释放激光下能级粒子数, 缓解下能级长寿命(9.0 ms)所带来的自终止效应。处于基态 $^6\text{H}_{15/2}$ 的 Dy^{3+} 可以吸收 $2.8 \mu\text{m}$ 激光, 充当可饱和吸收体。基于图 2 的能级跃迁过程, 得到该系统的速率方程^[25-27]为

$$\frac{d\phi_1(t)}{dt} = \frac{\phi_1(t)}{\tau_{\text{er}}} \{ [\sigma_{\text{er}_e}(\lambda_1)N_2(t) - \sigma_{\text{er}_a}(\lambda_1)N_1(t)]I_{\text{er}} + [\sigma_{\text{dy}_e}(\lambda_1)N_5(t) - \sigma_{\text{dy}_a}(\lambda_1)N_4(t)]I_{\text{dy}} - [\delta_1 - \ln(R_1R_2)] \}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = -\frac{N_3(t)}{\tau_3} + W_{11}N_1^2(t), \quad (2)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = -\frac{N_2(t)}{\tau_2} + \beta_{32}\frac{N_3(t)}{\tau_3} - \frac{c}{n}\phi_1(t)[\sigma_{\text{er}_e}(\lambda_1)N_2(t) - \sigma_{\text{er}_a}(\lambda_1)N_1(t)] + \frac{\lambda_p\sigma_{\text{er}_a}(\lambda_p)P}{hcA}N_0(t), \quad (3)$$

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\frac{N_1(t)}{\tau_1} + \sum_{i=2}^3\beta_{i1}\frac{N_i(t)}{\tau_i} + \frac{c}{n}\phi_1(t)[\sigma_{\text{er}_e}(\lambda_1)N_2(t) - \sigma_{\text{er}_a}(\lambda_1)N_1(t)] - 2W_{11}N_1^2(t), \quad (4)$$

$$N_{\text{er}} = \sum_{i=0}^3N_i(t), \quad (5)$$

$$\frac{d\phi_2(t)}{dt} = \frac{\phi_2(t)}{\tau_{\text{dy}}} \{ [\sigma_{\text{dy}_e}(\lambda_2)N_5(t) - \sigma_{\text{dy}_a}(\lambda_2)N_4(t)]I_{\text{dy}} - [\delta_2 - \ln(R_3R_4)] \}, \quad (6)$$

$$\frac{dN_5(t)}{dt} = -\frac{N_5(t)}{\tau_5} - \frac{c}{n}\phi_1(t)_1[\sigma_{dy_e}(\lambda_1)N_5(t) - \sigma_{dy_a}(\lambda_1)N_4(t)] - \frac{c}{n}\phi_2(t)[\sigma_{dy_e}(\lambda_2)N_5(t) - \sigma_{dy_a}(\lambda_2)N_4(t)], \quad (7)$$

$$N_{dy} = \sum_{i=4}^5 N_i(t), \quad (8)$$

式中： i 为能级序号； τ_i 为包括声子弛豫和辐射跃迁过程的 i 能级固有寿命； β_{ij} 为 i 能级跃迁到 j 能级的分支比； W_{11} 为 $^4I_{13/2}$ 能级的能量上转换参数； $\phi_1(t)$ 、 $\phi_2(t)$ 分别为 $2.8 \mu\text{m}$ 、 $3.1 \mu\text{m}$ 脉冲光子数； $N_i(t)$ 为 i 能级的粒子数密度； c 为真空中光速； h 为普朗克常量； n 为光纤折射率； P 为泵浦功率； A 为光纤包层的有效横截面积； λ_p 、 λ_1 、 λ_2 分别为泵浦波长、信号波长和光纤光栅中心波长； δ_1 、 δ_2 分别为 $2.8 \mu\text{m}$ 、 $3.1 \mu\text{m}$ 激光腔腔内损耗； σ_{er_a} 、 σ_{er_e} 、 σ_{dy_a} 、 σ_{dy_e} 分别为 Er^{3+} 和 Dy^{3+} 在不同波长下的吸收发射截面； R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别为 FBG1、FBG2、FBG3、FBG4 的反射率； N_{er} 、 N_{dy} 分别为 Er^{3+} 、 Dy^{3+} 的掺杂浓度； t 为时间； l_{er} 、 l_{dy} 分别为掺铒光纤和掺镱光纤的长度； τ_{er} 、 τ_{dy} 分别为 $2.8 \mu\text{m}$ 、 $3.1 \mu\text{m}$ 激光在腔内往返一周的时间，二者表达式分别为

$$\tau_{er} = \frac{2n(l_{er} + l_{dy} + l)}{c}, \quad \tau_{dy} = \frac{2n(l_{dy} + \frac{l}{2})}{c}, \quad (9)$$

式中： l 为无源光纤长度。

采用四阶 Runge-Kutta 求解上述微分方程，计算中使用的具体参数及其取值如表 1 所示，仿真采

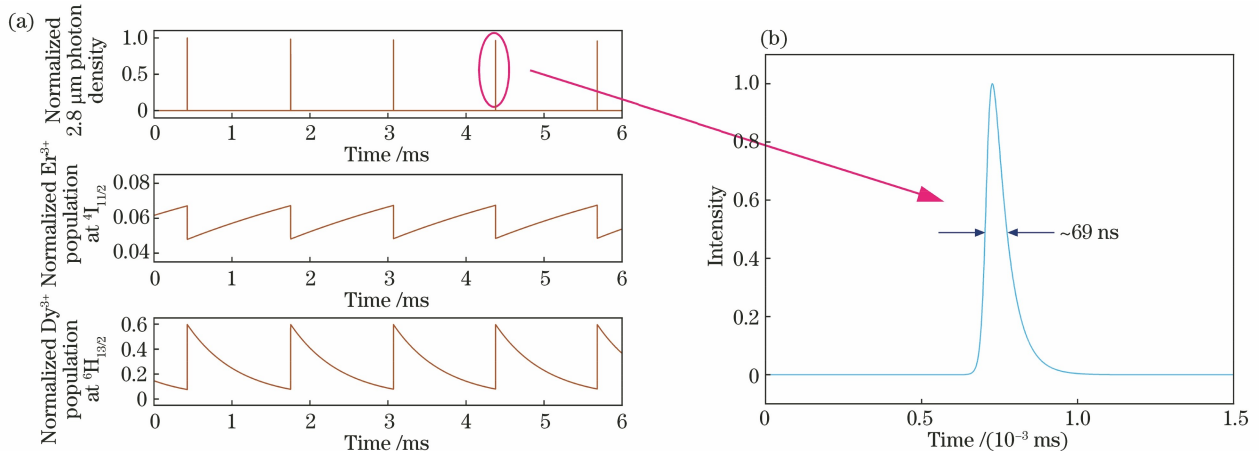


图 3 未引入 $3.1 \mu\text{m}$ 光栅 ($R_3 \times R_4$ 为 0.0001) 时， 1 W 泵浦功率下的仿真结果。(a) 归一化的 $2.8 \mu\text{m}$ 光子密度、 $^4I_{11/2}$ 能级 Er^{3+} 粒子数及 $^6H_{13/2}$ 能级 Dy^{3+} 粒子数随时间的变化情况；(b) $2.8 \mu\text{m}$ 激光的单脉冲轮廓

Fig. 3 Simulation results without $3.1 \mu\text{m}$ fiber Bragg gratings ($R_3 \times R_4$ is 0.0001) at pump power of 1 W . (a) Normalized pulse photon density of $2.8 \mu\text{m}$ radiation, Er^{3+} population of $^4I_{11/2}$ energy level, and Dy^{3+} population of $^6H_{13/2}$ energy level as functions of time; (b) single pulse profile of $2.8 \mu\text{m}$ laser

用的光纤数据均来自商用光纤，具有实际指导意义。

表 1 仿真中所使用的数据^[27-30]

Table 1 Data used in simulation^[27-30]

Parameter	Value	Parameter	Value
N_{er}/m^{-3}	9.6×10^{26}	β_{30}	0.001
N_{dy}/m^{-3}	3.66×10^{25}	$\sigma_{er_a}(\lambda_p)/\text{m}^2$	2.1×10^{-25}
τ_1/ms	9.0	$\sigma_{er_e}(\lambda_1)/\text{m}^2$	4.2×10^{-25}
τ_2/ms	6.9	$\sigma_{er_a}(\lambda_1)/\text{m}^2$	2.5×10^{-25}
$\tau_3/\mu\text{s}$	10	$\sigma_{dy_e}(\lambda_1)/\text{m}^2$	2.6×10^{-25}
$\tau_5/\mu\text{s}$	650	$\sigma_{dy_a}(\lambda_1)/\text{m}^2$	3.9×10^{-25}
β_{10}	1	$\sigma_{dy_a}(\lambda_2)/\text{m}^2$	2.8×10^{-26}
β_{54}	1	$\sigma_{dy_e}(\lambda_2)/\text{m}^2$	6.8×10^{-26}
β_{21}	0.37	$W_{11}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	1.0×10^{-24}
β_{20}	0.63	l_{er}/m	4
β_{32}	0.99	l_{dy}/m	3
β_{31}	0	l/m	2

3 分析与讨论

3.1 引入光纤光栅前后激光输出特性对比

图 3 和图 4 为被动调 Q 激光器分别在连续波泵浦功率为 1 W 和 3 W 的条件下归一化的 $2.8 \mu\text{m}$ 激光光子数、对 Er^{3+} 掺杂浓度 N_{er} 归一化的 $^4I_{11/2}$ 能级粒子数，以及对 Dy^{3+} 掺杂浓度 N_{dy} 归一化

的 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 能级粒子数随时间的变化情况,此时 $R_3 \times R_4$ 设为 0.0001,即未引入 FBG3 和 FBG4 来对

Dy^{3+} 的发射波长提供反馈,可饱和吸收体的长度为 3 m,掺铒 ZBLAN 的光纤长度为 4 m。

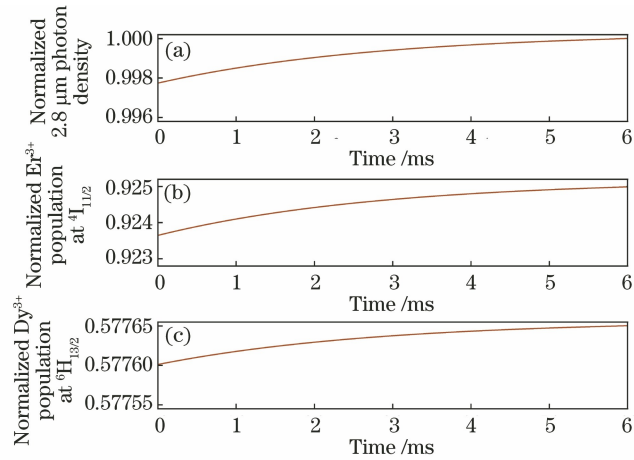


图 4 未引入 $3.1 \mu\text{m}$ 光栅 ($R_3 \times R_4$ 为 0.0001) 时, 3 W 泵浦功率下的仿真结果。

(a) 归一化的 $2.8 \mu\text{m}$ 光子密度; (b) ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级 Er^{3+} 粒子数; (c) ${}^6\text{H}_{13/2}$ 能级 Dy^{3+} 粒子数

Fig. 4 Simulation results without $3.1 \mu\text{m}$ fiber Bragg gratings ($R_3 \times R_4$ is 0.0001) at pump power of 3 W. (a) Normalized $2.8 \mu\text{m}$ pulse photon density; (b) Er^{3+} population of ${}^4\text{I}_{11/2}$ energy level; (c) Dy^{3+} population of ${}^6\text{H}_{13/2}$ energy level

由图 3(a) 所示, 当未引入 FBG3 和 FBG4 时, 1 W 泵浦功率下, 谐振腔在初始时刻处于低 Q 值状态, Er^{3+} 的 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级粒子数不断累积; 当可饱和吸收体的吸收达到饱和时, 谐振腔处于高 Q 值状态, 产生激光振荡, 形成激光脉冲; 随着激光振荡的产生, Dy^{3+} 的 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 能级粒子数迅速增加, 随后通过非辐射跃迁过程释放上能级粒子数, 恢复到未漂白的状态, 谐振腔恢复低 Q 值; 重复上述过程实现了 $2.8 \mu\text{m}$ 激光的被动调 Q 脉冲运转。此时重复频率为 0.76 kHz, 脉冲能量为 $75.3 \mu\text{J}$, 脉冲宽度为 69 ns, 峰值功率为 1.1 kW, 平均输出功率为 0.057 W。进一步研究发现随着泵浦功率的增加, 脉宽逐渐变宽, 这是由于: 泵浦功率的增加导致激光强度的增加, 因此可饱和吸收体基态的大部分粒子吸收能量跃迁到上能级, 其恢复到初始状态需要的时间更长, 导致脉冲宽度增加。进一步提高泵浦功率, 由于 Dy^{3+} 的 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 能级寿命较长, 无法在短时间内通过声子弛豫释放该能级的粒子数, 此时掺铒光纤无法恢复对 $2.8 \mu\text{m}$ 激光原有的吸收能力, 使其无法作为可饱和吸收体继续工作, 最终导致 $2.8 \mu\text{m}$ 激光连续波运转。图 4 表明在 3 W 泵浦功率下激光器连续运转, 此时 $2.8 \mu\text{m}$ 激光的输出功率为 0.47 W。

图 5 所示为在可饱和吸收体两端引入光纤光栅后的激光器模型计算结果, 此时 FBG3 的反射率为 100%, FBG4 的反射率为 85%。当泵浦功率为 1 W 时, 该被动调 Q 激光系统可以稳定输出脉冲, 脉冲

重复频率为 0.48 kHz, 脉冲能量为 $179 \mu\text{J}$, 脉宽为 48 ns, 峰值功率为 3.75 kW, 平均输出功率为 0.073 W。在 1 W 泵浦功率下, 通过将可饱和吸收体与高反射谐振腔结构相结合, 仿真获得了比未引入光纤光栅 FBG3 和 FBG4 时脉宽更短、输出功率更高的中红外激光输出。该现象是因为在引入光栅后, Dy^{3+} 中 ${}^6\text{H}_{13/2}$ 能级粒子在短时间内通过受激跃迁过程跃迁到基态, 更多的上能级粒子能够跃迁到基态, 使可饱和吸收体快速恢复到未漂白的状态, 继续吸收 $2.8 \mu\text{m}$ 激光导致脉宽变窄; 同时, Dy^{3+} 基态粒子数的增加使其储能更多, 需要更多的 Er^{3+} 上能级反转粒子数才能产生激光, 此时腔内更多的存储能量被提取利用, 从而使激光器效率得到提高, 文献 [31] 的实验结果也证实了该现象。增加泵浦功率到 3 W 时, 如图 5(c) 所示, 系统仍可以稳定输出脉冲激光, 此时重复频率为 2.34 kHz, 脉冲能量为 $165 \mu\text{J}$, 脉宽为 49 ns, 峰值功率为 3.37 kW, 平均输出功率为 0.33 W。需要指出的是, 泵浦功率增加到 10 W 时, 系统仍可以保持稳定脉冲输出。上述结果表明, 在掺铒 ZBLAN 光纤所充当的可饱和吸收体两端引入光纤光栅会加快有源光纤中掺杂离子的上能级粒子的释放, 使其恢复到未漂白的状态。此时该有源光纤不仅可以作为可饱和吸收体, 还可以作为增益光纤, 这种通过受激辐射来释放上能级粒子数的方式有利于 $2.8 \mu\text{m}$ 激光在高泵浦功率下维持稳定调 Q 运转。

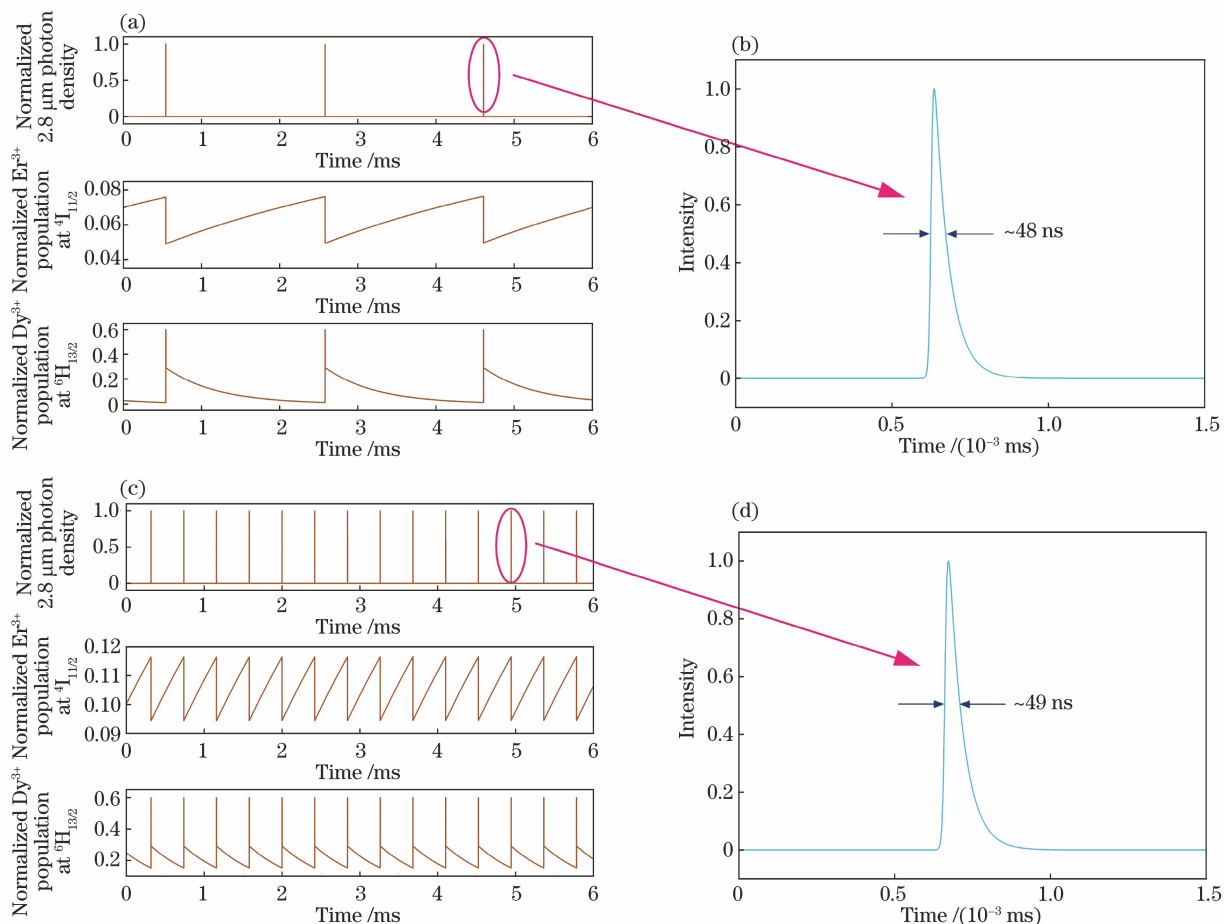


图 5 引入 $3.1 \mu\text{m}$ 光栅 ($R_3 \times R_4$ 为 0.85) 后, 泵浦功率分别为 1 W 和 3 W 时的归一化 $2.8 \mu\text{m}$ 光子数、各能级粒子数随时间的变化情况

Fig. 5 Normalized $2.8 \mu\text{m}$ pulse photon density, Er^{3+} population of ${}^4\text{I}_{11/2}$ energy level, and Dy^{3+} population of ${}^6\text{H}_{13/2}$ energy level as functions of time with $3.1 \mu\text{m}$ fiber Bragg gratings (the $R_3 \times R_4$ is 0.85) at pump powers of 1 W and 3 W. (a)(b) Pump power of 1 W; (c)(d) pump power of 3 W

3.2 泵浦功率、可饱和吸收体长度和光栅反射率对激光重复频率的影响

从上文的计算结果可知, 光纤光栅的引入可以加快 Dy^{3+} 上能级粒子的消耗, 保证系统在高泵浦功率下维持稳定脉冲运转。进一步地, 基于上文的模型计算了引入光纤光栅后 $2.8 \mu\text{m}$ 激光的重复频率与泵浦功率、可饱和吸收体长度及光栅反射率的关系。

图 6 所示为输出脉冲激光重复频率随泵浦功率的变化情况, 此时固定 FBG3 和 FBG4 的反射率分别为 100%、85%, 可饱和吸收体的长度为 3 m, 当泵浦功率达到激光器振荡阈值时, 系统输出 $2.8 \mu\text{m}$ 脉冲激光, 随着泵浦功率的增加, 脉冲激光的重复频率也逐渐增加。泵浦功率从 0.5 W 增加到 5 W 时, 重复频率从 0.14 kHz 增加到 4.23 kHz。

固定 FBG3 和 FBG4 的反射率仍为 100%、

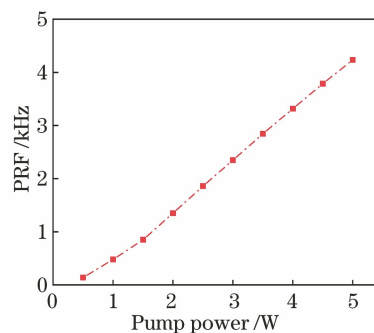


图 6 可饱和吸收体长度为 3 m、 $R_3 \times R_4$ 为 0.85 时不同泵浦功率下 $2.8 \mu\text{m}$ 激光的重复频率
Fig. 6 PRF of $2.8 \mu\text{m}$ laser as a function of pump power when length of saturable absorber is 3 m and $R_3 \times R_4$ is 0.85

85%, 泵浦功率为 3 W, 计算得到不同可饱和吸收体长度下激光脉冲的重复频率如图 7 所示。可饱和吸收体为 0.5 m 时, 重复频率为 14.41 kHz, 随着可饱

和吸收体长度增加到 3 m, 重复频率减小到 2.34 kHz。这主要是由于在固定泵浦功率的条件下, 可饱和吸收体越长, 则漂白所需光强越大, 不易达到饱和状态, 此时 Q 开关速度变慢, 导致重复频率不断减小。

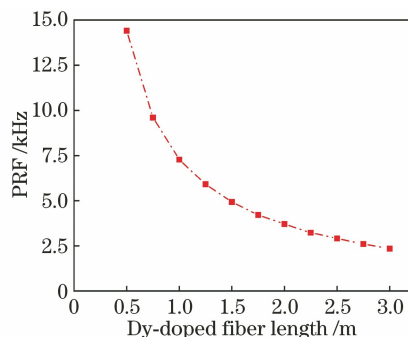


图 7 $R_3 \times R_4$ 为 0.85、泵浦功率为 3 W 时不同可饱和体吸收长度下 2.8 μm 激光的重复频率

Fig. 7 PRF of 2.8 μm laser as a function of saturable absorber length when pump power is 3 W and $R_3 \times R_4$ is 0.85

掺镱 ZBLAN 光纤两端中心波长为 3.1 μm 的 FBG3 和 FBG4 的反射率也对 2.8 μm 脉冲激光的重复频率有影响。固定泵浦功率为 3 W, 可饱和吸收体长度为 3 m, FBG3 的反射率为 100%, 激光重复频率与 FBG4 反射率的关系如图 8 所示。当 FBG4 的反射率小于 40% 时, 重复频率随着 FBG4 的反射率的增加快速减小, 最终趋于稳定值, 约 2.34 kHz。这主要是由于增加 FBG4 的反射率降低了可饱和吸收体产生 3.1 μm 受激跃迁的阈值, 导致 Dy^{3+} 基态粒子数的增加, 即降低了 2.8 μm 谐振腔 Q 值, 2.8 μm 脉冲激光阈值增加, 导致重复频率减小, 这个现象与文献[25]报道的趋势相符合。

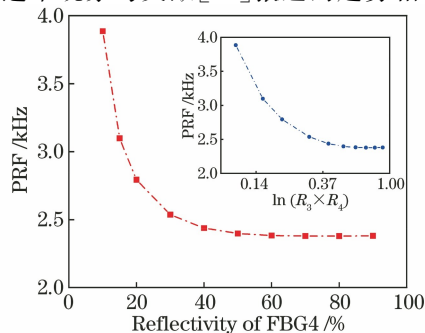


图 8 泵浦功率为 3 W、可饱和吸收体长度为 3 m 时不同 FBG4 反射率下的 2.8 μm 激光重复频率

Fig. 8 PRF of 2.8 μm laser as a function of reflectivity of FBG4 when pump power is 3 W and length of saturable absorber is 3 m

基于上述分析可知, 2.8 μm 脉冲激光的重复频率与泵浦功率正相关, 与可饱和吸收体长度及 3.1 μm 光栅的反射率负相关, 通过优化三者来调整激光重复频率特性, 获得重复频率在百 kHz 至百 Hz 之间的稳定脉冲激光, 以满足不同的应用需求。模拟结果可以为后续相关实验研究提供参考。

4 结 论

提出一种基于掺镱 ZBLAN 光纤对掺铒 ZBLAN 光纤的 2.8 μm 激光的可饱和吸收效应实现中红外波段全光纤激光器被动调 Q 脉冲运转的方法。利用速率方程模型对激光系统中相关能级间的粒子跃迁过程进行了模拟, 研究了激光器功率和时间特性的影响因素。计算结果表明, 在可饱和吸收体两侧引入掺镱 ZBLAN 光纤发射波段的 3.1 μm 光栅, 可以有效缩短可饱和吸收体的恢复时间, 在短时间内通过受激辐射跃迁将上能级粒子数释放到较低水平, 有利于该激光系统在高泵浦功率下维持脉冲激光的稳定输出。泵浦功率、可饱和吸收体长度、光栅反射率是影响激光系统重复频率特性的重要因素, 通过调节相应变量的参数来满足不同应用场合对于重复频率的要求, 这有助于提高激光系统的性能, 同时为实现全光纤化中红外调 Q 激光器的实验设计提供了参考。

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] Pollnan M, Jackson S D. Erbium 3 μm fiber lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(1): 30-40.
- [3] 董文乾, 郝强, 黄坤, 等. 基于全保偏光纤激光器的单通光参量中红外超短脉冲激光系统[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1236001.
Dong W Q, Hao Q, Huang K, et al. Single-pass optical parameter mid-infrared ultra-short pulse laser system based on all polarization-maintaining fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1236001.
- [4] Tokita S, Murakami M, Shimizu S, et al. Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3062-3064.
- [5] 沈炎龙, 黄珂, 周松青, 等. 10 W 级高效率单模中红外 2.8 μm 光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502008.
Shen Y L, Huang K, Zhou S Q, et al. 10 W-level

- high efficiency single-mode mid-infrared 2.8 μm fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0502008.
- [6] Aydin Y O, Fortin V, Maes F, et al. Diode-pumped mid-infrared fiber laser with 50% slope efficiency[J]. Optica, 2017, 4(2): 235-238.
- [7] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, et al. Towards power scaling of 2.8 μm fiber lasers [J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [8] Gu H A, Qin Z P, Xie G Q, et al. Generation of 131 fs mode-locked pulses from 2.8 μm Er:ZBLAN fiber laser[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(3): 031402.
- [9] Duval S, Bernier M, Fortin V, et al. Femtosecond fiber lasers reach the mid-infrared[J]. Optica, 2015, 2(7): 623-626.
- [10] Tang P H, Qin Z P, Liu J, et al. Watt-level passively mode-locked Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 4855-4858.
- [11] Zhu G W, Zhu X S, Wang F Q, et al. Graphene mode-locked fiber laser at 2.8 μm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(1): 7-10.
- [12] Bawden N, Matsukuma H, Henderson-Sapir O, et al. Actively Q-switched dual-wavelength pumped Er³⁺: ZBLAN fiber laser at 3.47 μm [J]. Optics Letters, 2018, 43(11): 2724-2727.
- [13] Hu T, Hudson D D, Jackson S D. Actively Q-switched 2.9 μm Ho³⁺Pr³⁺-doped fluoride fiber laser [J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2145-2147.
- [14] Shen Y L, Wang Y S, Zhu F, et al. 200 μJ , 13 ns Er:ZBLAN mid-infrared fiber laser actively Q-switched by an electro-optic modulator [J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 1141-1144.
- [15] Shen Y L, Wang Y S, Luan K P, et al. High peak power actively Q-switched mid-infrared fiber lasers at 3 μm [J]. Applied Physics B, 2017, 123(4): 105.
- [16] Shen Y L, Wang Y S, Luan K P, et al. Watt-level passively Q-switched heavily Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26659.
- [17] Wei C, Zhu X S, Norwood R A, et al. Passively Q-switched 2.8- μm nanosecond fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(19): 1741-1744.
- [18] Ning S G, Feng G Y, Dai S Y, et al. Mid-infrared Fe²⁺:ZnSe semiconductor saturable absorber mirror for passively Q-switched Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser[J]. AIP Advances, 2018, 8(2): 025121.
- [19] Wei C, Zhu X S, Wang F, et al. Graphene Q-switched 2.78 μm Er³⁺-doped fluoride fiber laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3233-3236.
- [20] Qin Z P, Xie G Q, Zhang H, et al. Black phosphorus as saturable absorber for the Q-switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24713-24718.
- [21] Wei C, Zhou L Q, Wang D S, et al. MXene-Ti₃C₂T_x for watt-level high-efficiency pulse generation in a 2.8 μm mid-infrared fiber laser[J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 972-977.
- [22] Boguslawski J, Sobon G, Zybala R, et al. Dissipative soliton generation in Er-doped fiber laser mode-locked by Sb₂Te₃ topological insulator[J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2786-2789.
- [23] Adel P, Auerbach M, Fallnich C, et al. Passive Q-switching by Tm³⁺ co-doping of a Yb³⁺-fiber laser [J]. Optics Express, 2003, 11(21): 2730-2735.
- [24] Kurkov A S. Q-switched all-fiber lasers with saturable absorbers[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(5): 335-342.
- [25] Tao M M, Ye X S, Wang F, et al. Modeling and analysis of a pulsed Er-Tm fiber laser system [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(1): 37-43.
- [26] Jackson S D, King T A, Pollnau M. Modelling of high-power diode-pumped erbium 3 μm fibre lasers [J]. Journal of Modern Optics, 2000, 47(11): 1987-1994.
- [27] Li J F, Jackson S D. Numerical modeling and optimization of diode pumped heavily-erbium-doped fluoride fiber lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(4): 454-464.
- [28] 栾昆鹏, 沈炎龙, 陶蒙蒙, 等. 2.8 μm 增益开关 Er:ZBLAN 光纤激光器的数值模拟 [J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0714001.
- Luan K P, Shen Y L, Tao M M, et al. Numerical simulation of 2.8 μm gain-switched Er:ZBLAN fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0714001.
- [29] Woodward R I, Majewski M R, MacAdam N, et al. Q-switched Dy:ZBLAN fiber lasers beyond 3 μm : comparison of pulse generation using acousto-optic modulation and inkjet-printed black phosphorus[J]. Optics Express, 2019, 27(10): 15032-15045.
- [30] Wang B, Cheng L H, Zhong H Y, et al. Excited state absorption cross sections of ⁴I_{13/2} of Er³⁺ in ZBLAN[J]. Optical Materials, 2009, 31(11): 1658-1662.
- [31] Dvoyrin V V, Mashinsky V M, Dianov E M. Yb-Bi pulsed fiber lasers[J]. Optics Letters, 2007, 32(5): 451-453.