

双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器动态特性的分析*

占生宝¹ 赵尚弘¹ 董淑福^{1,2} 庄茂录¹ 夏贵进¹ 李云霞¹

(1 空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 分析了弛豫振荡前上能级 Er³⁺、Yb³⁺ 粒子数的变化和弛豫振荡时 Er³⁺ 上能级粒子数的变化情况以及弛豫振荡时激光功率的变化规律, 结果表明: 弛豫振荡时的激光峰值功率远大于稳态时的激光功率.

关键词 光纤激光器; 双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤; 动态特性; 光纤激光器理论

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

包层泵浦技术的运用, 突破了光纤激光器输出功率低的应用瓶颈^[1]. 结合包层泵浦技术和普通 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器的突出优点^[2,3], 以双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤为增益介质的双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器具有广阔的运用前景. 研究双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器, 必须弄清其实现放大的机理. 对于双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器的稳态特性, 我们已进行过研究^[4]. 本文以加拿大国家光学研究所 (INO) 生产的 EY805 光纤为研究对象, 以 980 nm 连续泵浦光为泵浦源, 分析双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器从泵浦光输入到产生的 1550 nm 的激光达到稳态时的动态特性.

1 理论模型

研究双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器的动态特性, 其理论依据仍旧是 Er³⁺、Yb³⁺ 粒子数变化的速率方程^[4,5].

由于泵浦光沿光纤传播方向呈指数衰减^[6], 当光纤较长时, 从输入端进入光纤的泵浦光到达输出端时已基本被吸收, 这样, 动态计算依赖于泵浦光传输方向的光纤各点, 计算非常困难. 为简化计算, 取光纤长度为 1.5 cm, 这样就可假设泵浦功率不依赖于传输方向^[7], 虽然, 这样的计算不能真正反映双包层光纤激光器的动态特性, 但它不失为一种简便的近似计算方法. 由于光纤长度仅取 1.5 cm, 则光纤各点的功率可视为平均功率, 于是有

$$\int_0^{1.5/100} P_{\text{pin}}(t) \exp [(\gamma_p(t) - l_p)z] dz = \bar{P}_p(t) \times 1.5/100 \quad (1)$$

式中, $P_{\text{pin}}(t)$ 为入射的泵浦功率, $\bar{P}_p(t)$ 为光纤各点的平均功率, l_p 表示 980 nm 泵浦光的背景损耗, $\gamma_p(t)$ 是泵浦光吸收系数, 其值按下式给出^[7]

$$\gamma_p(t) = \Gamma_p (\sigma_{65} n_6 - \sigma_{56} n_5 - \sigma_{13} n_1) \quad (2)$$

由式(1)求得光纤上各点的平均功率为

$$\bar{P}_p(t) = P_{\text{pin}}(t) \frac{1 - \exp [(\gamma_p - l_p) \times 1.5/100]}{-(\gamma_p - l_p) \times 1.5/100} \quad (3)$$

设光纤前向和后向所产生的激光功率分别为 $P_s^+(t)$ 、 $P_s^-(t)$, 则总的激光功率定义为 $P_s(t) = P_s^+(t) + P_s^-(t)$, 得到以下的功率传输方程

$$\frac{1}{c} \frac{dP_s(t)}{dt} = [\Gamma_s (\sigma_{21} n_2 - \sigma_{12} n_1) - l_s - l_{\text{mirror}}] P_s(t) + \Gamma_s \sigma_s n_2 P_0 \quad (4)$$

式中, P_0 为自发辐射的贡献, $P_0 = 2hc^2/\lambda_s^3$ ^[8], c 为光速, l_s 为 1550 nm 激光的背景损耗, l_{mirror} 为腔镜耦合的损耗, 由下式给出

$$l_{\text{mirror}} = -\ln(R_1 R_2)/(2 \times 1.5/100) \quad (5)$$

R_1 、 R_2 分别为前、后腔镜对激光的反射率, 分别设为 0.99、0.95, 则总的输出功率为

$$P_{\text{sout}}(t) = (1 - R_2) P_s(t)/(1 + R_2) \quad (6)$$

2 理论分析

EY805 双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤各种参量见表 1, 使用的光谱振腔为典型的 F-P 腔. EY805 光纤芯径的截面积为 $201.62 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, 设入纤泵浦功率 $P_{\text{pin}}(t) = 10 \text{ W}$.

表 1 数值模拟中所用参量

参量	[Er ³⁺]	[Yb ³⁺]	$\sigma_a(\lambda_p)$	$\sigma_e(\lambda_p)$	$\sigma_a(\lambda_s)$
数值	$4.8 / 10^{25} \cdot \text{m}^{-3}$	$3.7 / 10^{26} \cdot \text{m}^{-3}$	$3.6480 / 10^{-21} \text{ cm}^2$	$7.296 / 10^{-21} \text{ cm}^2$	$2.78 / 10^{-21} \text{ cm}^2$
参量	$\sigma_e(\lambda_s)$	Γ_p	Γ_s	τ_{Yb2}	τ_{Er2}
数值	$3.42 / 10^{-21} \text{ cm}^2$	0.0058	1	$1.5 / 10^{-3} \text{ sec}$	$11 / 10^{-3} \text{ sec}$
参量	α_p	α_s	C_{YbEr}	C_{up}	
数值	$4.2 / 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$4.2 / 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	$2.0 / 10^{-16} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	$1.1571 / 10^{-17} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	

* 陕西省自然科学基金 (批准号: 2001X31)、空军工程大学学术基金资助项目

Tel: 029-84399160 Email: optfiberlaser@163.com

收稿日期: 2003-05-09

2.1 弛豫振荡前上能级 Er³⁺、Yb³⁺ 粒子数的变化情况

当泵浦光进入双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤时, Yb³⁺ 首先受激, 由于在掺有高浓度 Yb³⁺ 的 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺晶系中, 从 Yb³⁺ 到 Er³⁺ 的能量转移是一种快速的扩散极限状态, 受激的 Yb³⁺ 到 Er³⁺ 能量转换的可能性正比于未受激的 Er³⁺ 的浓度^[9], 因此, Yb³⁺ 受激上能级粒子数增加的同时, Er³⁺ 上能级的粒子数也同比例地增加. 由方程(4), 在忽略自发辐射贡献情况下, 设信号光的功率方程为

$$P_s(t) = A \exp([\Gamma_s(\sigma_{21}n_2 - \sigma_{12}n_1) - l_s - l_{\text{mirror}}]ct) \tag{7}$$

令 $A = 1$ ^[10], 用 Matlab 求解方程(1) ~ (4), 得出 N_2 、 N_6 随时间的变化关系, 如图 1、2 所示. 从图中可以看出 Er³⁺、Yb³⁺ 上能级粒子数随时间的变化情况, 到大约 288 μs 时, Er³⁺、Yb³⁺ 上能级的粒子数的值分别约为 $2.4825 \times 10^{25}/\text{m}^3$ 和 $2.0992 \times 10^{25}/\text{m}^3$, 从图 1、2 还可以发现: 在 288 μs 时, Er³⁺、Yb³⁺ 上能级粒子数没有达到饱和.

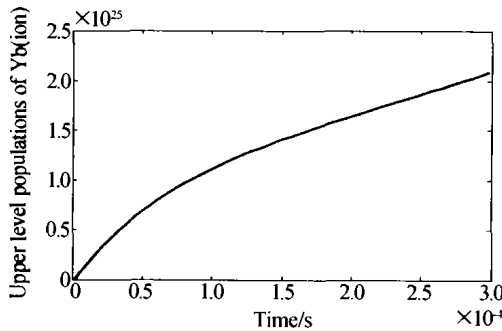


图 1 N_6 随时间变化的图形
Fig. 1 Changes of upper level population N_6 with time

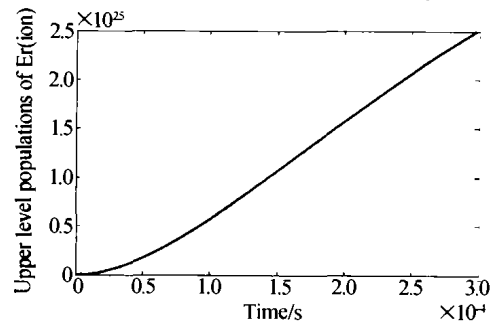


图 2 N_2 随时间变化的图形
Fig. 2 Changes of upper level population N_2 with time

2.2 弛豫振荡时 Er³⁺ 上能级粒子数的变化情况

Er³⁺ 接受 Yb³⁺ 扩散的能量后, 上能级的粒子数将不断增加, 当粒子数达到一定程度时, 开始产生弛豫振荡, 图 3 给出了弛豫振荡时 Er³⁺ 上能级粒子数的变化情况.

从图中可以看出: 在时间为 288 μs 时, Er³⁺ 开始弛豫振荡, 弛豫振荡时最大粒子数约为 $2.4860 \times 10^{25}/\text{m}^3$, 至 388 μs 时振荡达到稳态, 稳态时, Er³⁺ 上

能级的粒子数为 $2.4827 \times 10^{25}/\text{m}^3$.

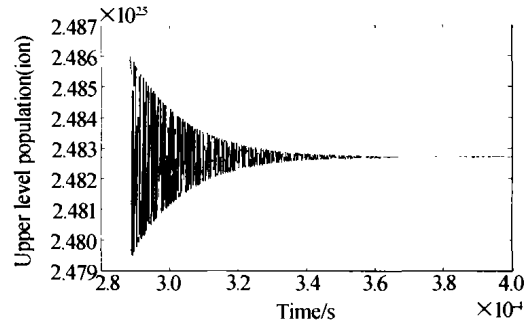


图 3 N_2 随时间变化的图形
Fig. 2 Changes of upper level population N_2 with time

2.3 弛豫振荡时功率的变化情况

根据方程(4)和 Er³⁺ 上能级粒子数的变化, 可求得激光功率随时间变化的情况, 如图 4 所示.

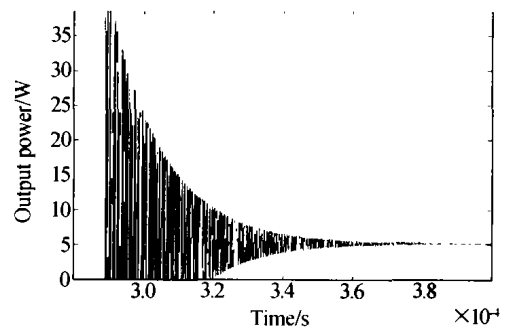


图 4 输出功率随时间变化的图形
Fig. 4 Changes of output power with time

从图 4 可以看出: 在时间为 288 μs 时, 输出激光功率开始弛豫振荡, 弛豫振荡时的最大功率约为 38.6 W, 到 390 μs 时, 振荡趋于稳定, 稳态时的功率值约为 5.2 W, 最大量子转换效率为 52%, 接近于理论计算值(63%), 与稳态分析时的计算值相吻合.

3 结论

通过对双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器动态特性的分析, 可得出以下结论: 1) 双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器实现放大的机理是: 泵浦能量首先使 Yb³⁺ 受激, 而不是直接作用于 Er³⁺; 2) 受激的 Yb³⁺ 通过快速的能量扩散使 Er³⁺ 受激, Yb³⁺ 是 Er³⁺ 的能量仓库; 3) 在连续泵浦光作用下, 受激的 Er³⁺ 首先产生弛豫振荡, 最后达到稳态, 弛豫振荡开始时的峰值功率远大于稳态时的功率.

参考文献

- Po H, Snitzer E, Tummelini R, et al. Double clad high brightness Nd fiber laser pumped by GaAlAs phased array. *OFC'89 Tech Dig*, 1989, 5: 220 ~ 223
- Ding M, Cheo P K. Effects of codoping on suppressing self-pulsing in Er-doped fiber lasers. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, 9(3): 324 ~ 326
- Lester C, Bjarklev A, Rasmussen T. Modeling of Yb³⁺-sensitized Er³⁺-doped silica waveguide amplifiers. *J*

- Lightwave Technol*, 1995, **13**(5):740 ~ 743
- 4 占生宝, 赵尚弘, 董淑福, 等. 双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器稳态特分析. *激光技术*, 2003, **27**(4): 345 ~ 348
Zhan S B, Zhao S H, Dong S F, et al. *Laser Technology*, 2003, **27**(4):345 ~ 348
 - 5 Karásek M. Optimum design of Er^{3+} - Yb^{3+} codoped fibers for large-signal high-pump-power applications. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, **33**(10):1669 ~ 1705
 - 6 Kim N S, Hamada T, Prabhu M. Numerical analysis and experimental results of output performance for Nd-doped double-clad fiber lasers. *Opt Comm*, 2000, **180**(4-6): 329 ~ 337
 - 7 Tellert T, Pasquale F D, Federighi M. Theoretical analysis of the dynamic behavior of highly-efficient erbium/ytterbium codoped fiber lasers. *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, **8**(11): 1462 ~ 1464
 - 8 Kelson I, Hardy A. Optimization of strongly pumped fiber lasers. *J Lightwave Technol*, 1999, **17**(5): 891 ~ 897
 - 9 Majaron B, Lukac M, Copie M. Population dynamics in Yb:Er: phosphate glass under neodymium laser pumping. *IEEE J Quantum Electron*, 1995, **31**(2):301 ~ 308
 - 10 Tanguy E, Larat C, Pocholle J P. Modelling of the erbium-ytterbium laser. *Opt Comm*, 1998, **153**(1-3):172 ~ 183

Analysis of the Dynamic Behavior of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-doped Double-clad Fiber Laser

Zhan Shengbao, Zhao Shanghong, Dong Shufu, Zhuang Maolu, Xia Guijin, Li Yunxia
Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shannxi, P. R. China 710077

Received date: 2003-05-09

Abstract The distribution of population of Er^{3+} and Yb^{3+} at upper state is analyzed before relaxation oscillation. The distribution of population of Er^{3+} at upper state and the distribution of laser power is also analyzed in course of relaxation oscillation. The results show that the peak power of laser in course of relaxation oscillation is far larger than the power when the steady state is reached.

Keywords Fiber laser; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double clad fiber; Dynamic behavior; Optical fiber laser theory

Zhan Shengbao was born in 1967, in Taihu, Anhui, China. He received the B. S. degree in the Department of Wire Telecommunication in Air-force Telecommunication Engineering Institute in 1992. He is now a M. S. degree candidate in Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, where he is engaged in research of optical communications.

