

文章编号: 0258-7025(2004)07-0807-04

光纤激光器弛豫振荡特性研究

夏江珍, 瞿荣辉, 蔡海文, 陈高庭, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 根据光纤激光器瞬态的速率方程,对 F-P 腔光纤激光器的瞬态输出特性进行了理论分析。采用数值计算方法对不同长度、不同腔面反射率、不同抽运功率下光纤激光器输出的弛豫振荡特性进行了模拟分析。结果表明弛豫振荡频率随光纤长度增加而减小,但是随抽运功率的变化很小。弛豫振荡幅度随抽运功率上升而增加,振荡的衰减时间随激光器腔镜的反射率的增加而上升,但是不随抽运功率变化。进行了 975 nm 抽运的 Er/Yb 共掺双包层光纤激光器的实验,实验表明理论分析得到的基本特性是合理的。

关键词 激光技术;光纤激光器;弛豫振荡;速率方程

中图分类号 TN 241;TN 248.1 **文献标识码** A

Studies on Relaxation Oscillation Characteristics of Fiber Lasers

XIA Jiang-zhen, QU Rong-hui, CAI Hai-wen, CHEN Gao-ting, FANG Zu-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Transient characteristics of Fabry-Perot cavity fiber lasers are analyzed by using the transient rate equations in this paper. Simulation for relaxation oscillation of the laser shows that its frequency decreases with increasing of the fiber length, and changes little with pump power; the amplitude of relaxation oscillation increases with pump power; the time constant of oscillation decay ascends with increasing of reflectivity of the cavity mirror, but changes little with pump power or fiber length. The experimental results on Er/Yb co-doped double-cladding fiber laser pumped by 975nm source showed good agreement with the theoretical calculations, indicating the simulation is reasonable.

Key words laser technique; fiber laser; relaxation oscillation; rate equation

1 引言

光纤激光器是激光领域受关注的热点之一。人们已经在实验和理论上对光纤激光器做了很多研究工作,尤其是稳态条件下的特性研究^[1,2]。随着波分复用(WDM)光网络技术的不断发展,经常面临信道的增减,引起瞬态光网络中功率抖动问题。目前,瞬态特性的研究主要集中在光纤放大器领域^[3,4],对光纤激光器的瞬态特性的研究比较少。本文从速率方程出发,分析研究光纤激光器的瞬态特性,对光纤激光器的输出功率的弛豫振荡频率、振荡衰减特性等主要性能进行了数值计算,给出了振荡特性同腔长、腔镜反射率、抽运功率水平等参数的关系。

2 基本模型

在 Er/Yb 双掺光纤中, Yb³⁺ 主要起敏化的作用,提高对抽运光的吸收效率, Yb³⁺ 离子并不直接发生能级跃迁而产生激光,因此可以将 Er/Yb 双掺光纤能级跃迁简化为单掺铒的情况。图 1 给出了 Er³⁺ 的能级简图。由于在玻璃或晶体受主中, Er³⁺ 能级受到周围电场或一个动态扰动的影响,能级产生斯塔克分裂,导致能级展宽。每个能级均由多个子能级构成^[5]。掺铒光纤激光器在 975 nm 抽运下是三能级系统。975 nm 抽运对应于 ⁴I_{11/2} 与 ⁴I_{15/2} 之间的跃迁,处于基态(⁴I_{15/2})的电子吸收抽运光子,跃迁到⁴I_{11/2}能级。然后很快从⁴I_{11/2}能级无辐射

收稿日期:2003-04-23;收到修改稿日期:2003-06-19

作者简介:夏江珍(1975—),女,山东威海人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光通信器件研究。E-mail: xiajzs@sina.com

跃迁到激发态($^4I_{13/2}$)能级。 τ_{32} 和 τ_{21} 为能级3至能级2和能级2至能级1的弛豫时间。实验表明, τ_{32} 典型值为10 ns左右,而 τ_{21} 为10 ms量级。由于 $\tau_{21} \gg \tau_{32}$,因此能级3上粒子数可近似认为零,从而可将975 nm抽运的掺铒光纤激光器当作两能级来处理。为了简化,这里不讨论激发态吸收的问题。

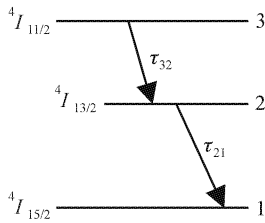


图1 铒离子能级简图

Fig. 1 Energy level diagram of Er^{3+} ion

根据文献[3]中光纤放大器瞬态的速率方程,假设光纤均匀掺杂,单向抽运,则线性腔掺铒光纤激光器的速率方程为

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\eta_s}{Ah\nu_s}(\sigma_a N_1 - \sigma_e N_2)P_s + \frac{\eta_p \sigma_p}{Ah\nu_p} N_1 P_p - A_{21} N_2 \quad (1)$$

$$\frac{dP_s^\pm(z,t)}{dz} \pm \frac{1}{v_s} \frac{dP_s^\pm(z,t)}{dt} = \pm \eta_s (\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) P_s^\pm \quad (2)$$

$$\frac{dP_p(z,t)}{dz} + \frac{1}{v_p} \frac{dP_p(z,t)}{dt} = -\eta_p \cdot \sigma_p \cdot N_1 \cdot P_p \quad (3)$$

其中, N_1, N_2 为光纤中铒的基态离子浓度、激发态离子浓度, $N_1 + N_2 = N_t$ 为总浓度。 σ_e, σ_a 分别为信号激光发射和吸收截面, σ_p 为抽运光吸收截面; η_s, η_p 分别为信号激光和抽运光与铒掺杂的重叠因子; ν_s 和 ν_p 分别表示信号激光和抽运光的频率; A_{21} 为自发辐射几率; A 为纤芯有效面积; v_s, v_p 为群速度。 $P_p(z,t)$ 和 $P_s(z,t)$ 分别为抽运光和信号激光功率沿光纤的纵向分布,其中正号表示信号光传输方向与抽运光相同,负号则表示方向相反。 $P_p(0,t) = P_{p0} F(t)$,其中 $F(t)$ 是一个调制函数,在模拟计算中采用阶跃函数,在实验研究中采用方波抽运电流。

3 数值模拟

式(1)~(3)速率方程是一组互相耦合的非线性方程,不能严格求出其解析解,必须采用数值计算方法求解。针对实验采用的Er/Yb共掺双包层光纤,

根据上述速率方程,计算了线性腔光纤激光器瞬态的一些基本特性。在模拟计算中,采用以下的典型的结构参数: $N_t = 1.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, $\sigma_e = 6.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_a = 7 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_p = 1.75 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\eta_s = 0.6$, $\eta_p = 0.811$, $\lambda_p = 975 \text{ nm}$, $\lambda_s = 1550 \text{ nm}$, $A_{21} = 83 \text{ s}^{-1}$, $A = 5.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 。以图2所示的F-P腔激光器为模型,假设抽运光的耦合效率为80%。掺杂光纤为Er/Yb共掺的双包层光纤,双包层光纤的长度为12 m,谐振腔左、右腔镜的反射率分别为 R_1, R_2 ,其中 R_1 是一个双色镜,其对抽运光透过率为85%,对信号激光的反射率为99%, R_2 对信号激光的反射率为85%。

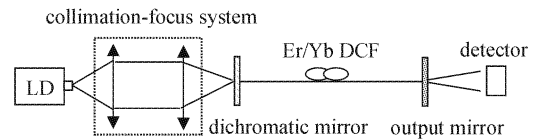


图2 光纤激光器的结构图

Fig. 2 Schematic diagram of the fiber laser

光纤激光器在一个阶跃函数的抽运功率作用下,此阶跃函数的表达式为: $F(t > 0) = 1; F(t \leq 0) = 0$ 。由于光子与Er离子之间的相互作用,以及激光在两端腔面上的反射,将发生弛豫振荡现象,这是激光振荡的最基本的特性之一。对弛豫振荡特性的了解将有助于设计和应用脉冲工作的光纤激光器,有助于分析连续工作光纤激光器的稳定性等重要性能。为此模拟计算了不同掺铒光纤长度、不同抽运功率、不同端面反射率下光纤激光器弛豫振荡的基本特性,主要是振荡频率和弛豫振荡衰减的时间常数。图3为光纤激光器弛豫振荡的功率随时间变化的曲线。

从图3可以看出,光纤激光器在方波脉冲的抽运功率下,将发生弛豫振荡。但是,与固体和半导体激光器的弛豫振荡相比,具有不同的振荡行为。一般半导体和固体激光器的弛豫振荡峰值高于平均功率的情况,振荡幅度从峰值和谷值两边衰减到稳定输出。而光纤激光器的弛豫振荡的峰值功率维持在一个水平上,不超过振荡结束后稳态下的直流输出功率。弛豫振荡的衰减表现为谷值逐步上升,幅度逐步减小。这种不同的振荡行为与光纤激光器大的腔长有关。在大的腔长情况下,端面对激光振荡的反馈时间很长,激光光具有明显的行波传输行为。从模拟计算的振荡曲线,可以得到光纤激光器弛豫振荡特性同器件结构参数,包括腔长、端面反射率、

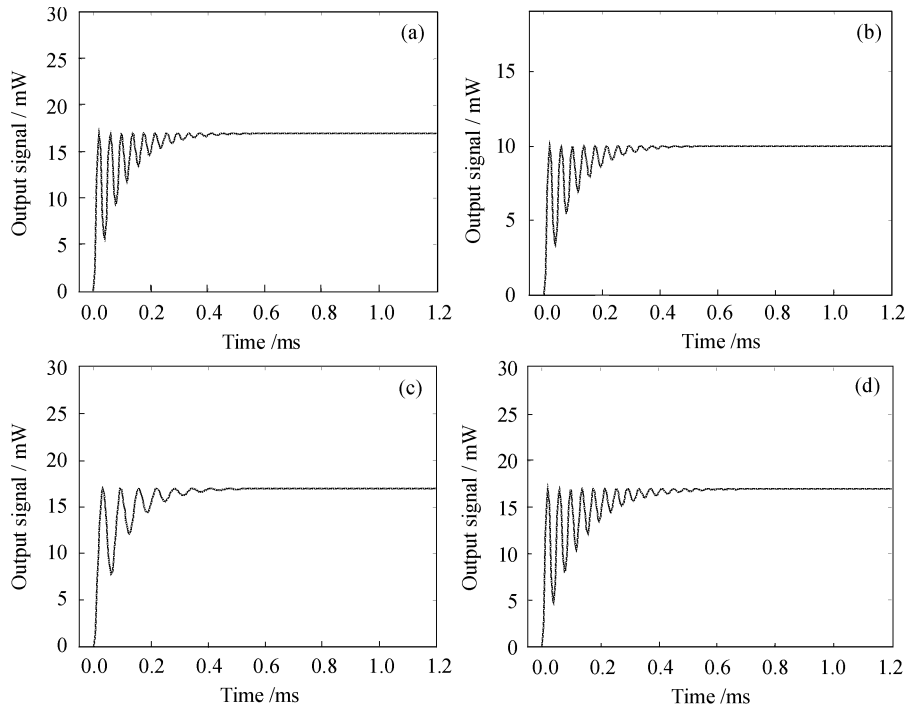


图 3 激光输出功率随时间的变化

Fig. 3 Variations of laser output power with time

(a) $L = 12$ m, $P_{p0} = 140$ mW, $R_2 = 0.85$; (b) $L = 12$ m, $P_{p0} = 100$ mW, $R_2 = 0.85$;
 (c) $L = 19$ m, $P_{p0} = 140$ mW, $R_2 = 0.85$; (d) $L = 12$ m, $P_{p0} = 140$ mW, $R_2 = 0.90$

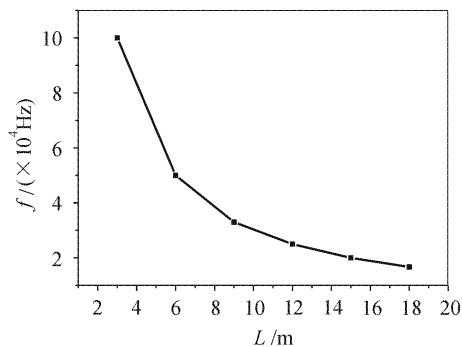


图 4 弛豫振荡频率与光纤长度的关系曲线

Fig. 4 Schematic diagram of the transient oscillation frequency versus fiber length

抽运功率等的关系。

3.1 光纤激光器弛豫振荡的频率特性

图 4 为弛豫振荡频率与光纤长度的关系曲线,二者成反比关系。也就是说振荡周期大致正比于腔长。这是因为在掺铒光纤激光器中,激活粒子的寿命远大于光在腔内传输来回的时间,弛豫振荡的频率基本上决定于传输时间常数。模拟计算还表明,弛豫振荡频率基本上不随抽运功率和腔面反射率而变化。

3.2 光纤激光器弛豫振荡的衰减特性

弛豫振荡曲线的谷点值的时间关系如图 5 所示。对其作数值拟合,可以看到弛豫振荡呈指数衰减规律

$$P_v = P_{v0}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4)$$

图 5(a)为相同光纤长度 ($L = 12$ m),相同腔镜反射率 ($R_2 = 0.85$),两种抽运功率 ($P_p = 100, 140$ mW)下的振荡衰减曲线。数值拟合得到 P_{v0} 大致满足如下的关系式: $P_{v0} = \eta(P_p - P_1)$, 其中拟合参数 $\eta = 0.17, P_1 = 40$ mW。弛豫振荡衰减的时间常数不随抽运功率的大小而变化,在所采用的参数下, $\tau \approx 0.1$ ms。图 5(b)为相同光纤长度 ($L = 12$ m),相同抽运功率 ($P_p = 140$ mW),两种腔镜反射率 ($R_2 = 0.85, 0.90$)下的弛豫振荡衰减曲线,它们的时间常数分别为 0.1 ms 和 0.14 ms。图 6 给出在相同光纤长度、相同抽运功率下 τ 随输出镜面反射率 R 变化的关系,它们基本上呈现线性关系。这是同弛豫振荡的物理机理相吻合的。

4 实验结果

采用图 2 所示的 F-P 腔光纤激光器实验装置,

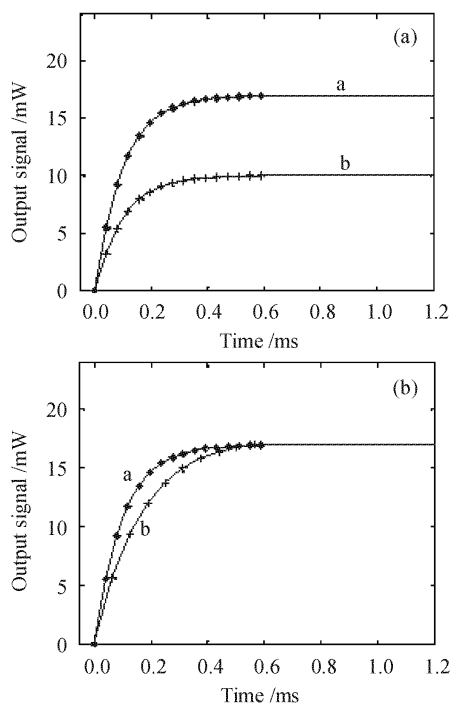


图5 光纤激光器弛豫振荡幅度的衰减特性

Fig. 5 Decay characteristics of the relaxation oscillation

(a) curve a: $P_p = 140$ mW, $L = 12$ m, $R_2 = 0.85$, curve b: $P_p = 100$ mW, $L = 12$ m, $R_2 = 0.85$; (b) curve a: $P_p = 140$ mW, $L = 12$ m, $R_2 = 0.85$, curve b: $P_p = 140$ mW, $L = 12$ m, $R_2 = 0.90$

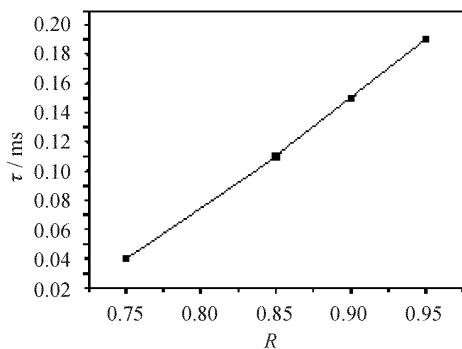


图6 弛豫振荡衰减时间常数与端面反射率R的关系曲线

Fig. 6 Decay time of the relaxation oscillation versus reflectivity R

该器件的连续工作阈值抽运功率为 70 mW(耦合之前)。在抽运光准直耦合的光路上用一个斩波器进行调制,使抽运光被调制为脉宽 2 ms,占空比为 1:1 的方波。在耦合到光纤中的抽运激光为 $P_p = 140$ mW(耦合进光纤)的功率下,在示波器上测得图 7 所示的波形。振荡周期为 $40 \mu\text{s}$,弛豫振荡衰减时间常数为 0.1 ms,与数值模拟得到的结果基本一致。

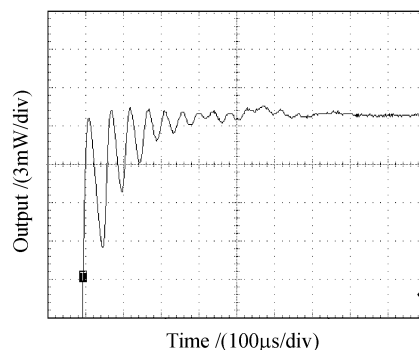


图7 在示波器上测得的激光输出波形

Fig. 7 Waveform of the laser output on the oscilloscope

5 结 论

从速率方程出发,分析研究了 F-P 腔光纤激光器的瞬态特性,对光纤激光器的输出功率的弛豫振荡频率、振荡衰减特性等主要性能进行了数值计算。结果表明,光纤激光器弛豫振荡频率反比于激光器的腔长;不随腔镜反射率和抽运功率水平而变化。弛豫振荡的幅度随抽运功率增加而上升,呈一个线性函数的关系。弛豫振荡衰减的时间常数与腔镜反射率直接有关,基本上是线性增加的关系,不随腔长和抽运功率水平而变化。进行了 975 nm 抽运的 Er/Yb 共掺双包层光纤激光器的实验,测量了激光器的瞬态特性,实验表明理论分析得到的基本特性是合理的。理论和实验结果为光纤激光器的优化设计提供了依据。

参 考 文 献

- 1 Wu Zhengmaou, Xia Guangqiong, Chen Jianguo. Analytical studies on output characteristics of erbium-doped fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(12):1676~1680
吴正茂,夏光琼,陈建国. 掺铒光纤激光器输出特性的解析研究 [J]. *光学学报*, 1996, **16**(12):1676~1680
- 2 Lü Fuyun, Fan Yaxian, Wang Hongjie *et al.*. Experimental study of cladding pumped Q-switched fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12):1057~1060
吕福云,樊亚仙,王宏杰等. 包层抽运调 Q 光纤激光器的实验研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(12):1057~1060
- 3 Stephen R. Chinn. Simplified modeling of transients in gain-clamped erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(6):1095~1100
- 4 Qian Yu, Chongcheng Fan. Simple dynamic model of all-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7):1166~1171
- 5 Emmanuel Desurvire, Jay R. Simpson. Amplification of spontaneous emission in erbium-doped single-mode fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(5):835~845