

文章编号: 1001-3806(2009)06-0651-03

## 掺 $\text{Yb}^{3+}$ 双包层光纤激光器的自脉冲行为分析

詹 仪

(曲阜师范大学 印刷学院,日照 276826)

**摘要:** 为了对掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的自脉冲行为进行系统的理论研究,采用数值模拟方法,对光子数密度和反转粒子数密度随时间及抽运功率的变化、阻尼系数与后腔镜的反射率和掺杂粒子浓度的关系,以及光纤本身固有振荡频率随后腔镜反射率的变化进行了理论分析。结果表明,随抽运功率的增加,振荡频率增加,振幅度减小;降低输出端的反馈和粒子的浓度可以抑制自脉冲现象。另外提出了抑制光纤激光器自脉冲的措施,为设计掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器提供了理论依据。

**关键词:** 激光技术;光纤激光器;自脉冲;掺镱双包层光纤

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.026

### Analysis of the self pulsing behavior of $\text{Yb}^{3+}$ -doped double clad fiber laser

ZHAN Yi

(College of Graphic Arts, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of self-pulsing of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber laser, the variation of photon density and inversed populations with pump power, the relationship among the damping coefficient, the output coupling reflectivity and doped particle concentration, and the variation of inherent oscillation frequency with output coupling reflectivity were simulated. The results show that the self-pulsing effect can be compressed with the decrease of the feedback of the output end and the increase of the doping concentration. Some measures to compress the self pulse of a fiber laser were put forward, providing a theoretical base for the design of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber lasers.

**Key words:** laser technique; fiber laser; self-pulsing;  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double clad fiber

### 引 言

光纤激光器无论在那个领域的应用,人们都希望激光器可以工作在恒定的连续输出状态或稳定的脉冲输出状态。在早期的研究中发现,即使在连续波抽运方式下,掺稀土(如  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  等)光纤激光器也会出现所谓的自脉动行为<sup>[1-2]</sup>,造成光纤激光器输出功率的不稳定。对掺铒光纤激光器自脉冲行为已经有大量理论和实验的研究<sup>[3-5]</sup>。对于 LD 侧向抽运的高功率掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的动态行为也有实验研究<sup>[6]</sup>,HIDEUR 等在试验中研究了不同的腔型的自脉冲行为以及自脉冲激发的布里渊散射和喇曼散射。自脉冲对光纤激光器的输出是有害的,当自脉冲的峰值功率足够高时,能激发布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS),自脉冲和布里渊的作用能够产生不规则的脉冲<sup>[7-8]</sup>。在高功率激光器中,当 SBS

脉冲功率达到喇曼散射阈值,引起激光输出的降低。

自脉冲是以一定的频率周期性发射的激光脉冲,表现出弛豫振荡的特性。它在特殊的抽运功率范围内,并且腔内光子寿命很短时才观察到<sup>[9]</sup>。人们对这种现象从可饱和吸收方面解释<sup>[10]</sup>,现在也有人主张从激光信号和反转粒子数的交互作用解释<sup>[11-12]</sup>。掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器的自脉冲行为机制没有被确定<sup>[7]</sup>。对掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的自脉冲行为的理论研究也很少见。

掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤的激光上能级的寿命在 1ms 左右,远远大于谐振腔内的光子寿命。故自脉冲行为可看作是光纤激光器本身在抽运阈值附近固有的弛豫振荡行为。

作者从能级速率方程出发,推导出光子数密度扰动时变关系式,进一步分析光纤激光器的参变量与自脉冲的关系,并提出抑制光纤激光器自脉冲的措施,为设计掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器提供了理论依据。

### 1 自脉冲的动力学方程

4 能级系统的速率方程根据参考文献[13]中的公式写为关于反转粒子数密度  $N(t)$  和光子数密度的微分方程组:

作者简介:詹 仪(1970-),女,副教授,主要从事光纤激光器方面的研究。

E-mail:zhanyi246@126.com

收稿日期:2008-07-21;收到修改稿日期:2009-01-18

$$\frac{dN(t)}{dt} = R_p(t) - \frac{N(t)}{\tau} - \sigma_{21}vN(t)S(t) \quad (1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \sigma_{21}vN(t)S(t) - \frac{S(t)}{\tau_r} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_{21}$  为腔模的受激跃迁截面;  $\tau$  是粒子在激光上能级  $E_2$  的平均寿命;  $\tau_r$  为该模式的光子在腔内的平均寿命;  $v$  为介质中的光速;  $R_p(t) = W_p[N_r - N(t)]$  为抽运速率;  $W_p$  为抽运几率;  $N_r$  为总粒子数密度。

(1) 式和(2)式是一组耦合的非线性方程, 可以看成是在稳定解的基础之上的小波动, 即认为:

$$N(t) = N_0 + n(t), (|n(t)| \ll N_0) \quad (3)$$

$$S(t) = S_0 + s(t), (|s(t)| \ll S_0) \quad (4)$$

式中,  $N_0, S_0$  为稳态解,  $n(t), s(t)$  分别为反转粒子数和光子数密度的扰动项。

将(3)式和(4)式代入(1)式和(2)式, 并进一步化简且忽略高阶项得:

$$\frac{d^2s(t)}{dt^2} + p \frac{ds(t)}{dt} + qs(t) = 0 \quad (5)$$

式中,  $p = \sigma_{21}vN_0 + 1/\tau + W_p, q = \sigma_{21}vN_0/\tau_r$ 。

(5) 式是一个瞬态过程的受迫阻尼简谐振动方程, 其解为  $s(t) = A \exp(-\gamma t) \sin(\omega t + \varphi_0)$ 。其中,  $\gamma = \frac{1}{2}p$  为阻尼振荡系数,  $\varphi_0$  为初相位角。  $\omega = \sqrt{q - \frac{p^2}{4}}$  为角频率。从其解可以看出, 光子数密度的变化以  $T = 2\pi/\omega$  为周期的运动, 其振幅随着时间的增大逐渐趋于平衡位置。阻尼系数  $\gamma$  随着反转粒子数和抽运功率的增加而增加。从  $\omega$  表达式可以看出, 当系统没有受到外界的干扰时, 由于光纤本身的固体形式,  $\omega$  是自身固有的振荡频率, 与抽运速率、光腔内光子的寿命及上能级寿命有关, 是一种自脉冲行为。

## 2 结果与分析

计算中采用的参量<sup>[14-15]</sup>如下:  $\lambda_p = 975\text{nm}, \sigma_{a,p} = 2.5 \times 10^{-24}\text{m}^2, \sigma_{e,p} = 2.5 \times 10^{-24}\text{m}^2, \tau_2 = 1\text{ms}, L = 30\text{m}, N_r = 4 \times 10^{25}\text{m}^{-3}, R_1 = 0.98, R_2 = 0.98, a_p = 3 \times 10^{-3}\text{m}^{-1}, a_1 = 5 \times 10^{-3}\text{m}^{-1}, \lambda_1 = 1090\text{nm}, \sigma_{a,s} = 1.4 \times 10^{-27}\text{m}^2, \sigma_{e,s} = 2 \times 10^{-25}\text{m}^2, \Gamma_p = 0.0012, A = 5 \times 10^{-11}\text{m}^2$ 。  $\lambda_p$  和  $\lambda_1$  为抽运光和激光的波长;  $\sigma_{a,p}$  和  $\sigma_{e,p}$  是抽运光的吸收截面和发射截面;  $\sigma_{a,s}$  和  $\sigma_{e,s}$  是信号光的吸收截面和发射截面;  $\tau_2$  为自发辐射寿命;  $a_p$  和  $a_1$  分别为抽运光和激光的散射损耗系数;  $\Gamma_p$  是抽运光的功率填充因子;  $A$  为纤芯面积;  $L$  为光纤的长度;  $R_1, R_2$  为前、后腔镜的反射率。

图 1 是光纤长度  $L = 30\text{m}$ 、抽运功率分别为 0.5W 和 2W 时, 光子数密度和反转粒子数密度与稳态值比

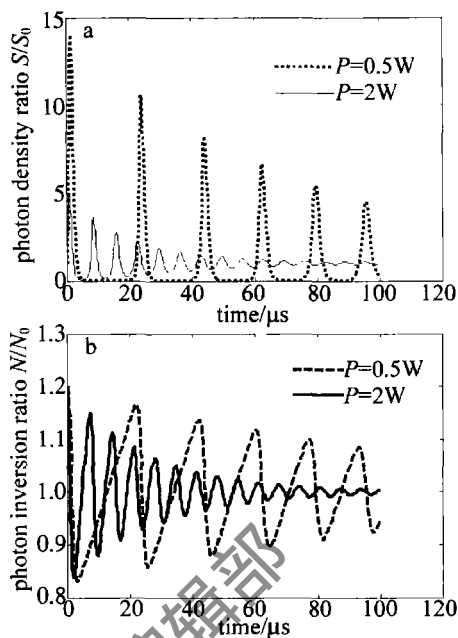


Fig. 1 Photon density and population inversion ratio vs. time and different pump powers

率随时间的变化关系。由图 1a 可见, 当抽运功率为 0.5W 时, 即在阈值附近, 光子密度的变化以弛豫振荡的形式表现出一定的重复性, 最高变化幅度为稳定值的 15 倍, 重复频率约为 500MHz。继续增大抽运功率, 振荡的幅度越来越小, 其重复频率增加, 约为 1500MHz。图 1b 的变化规律与图 1a 相同, 随抽运功率的增加, 振荡频率增加, 脉冲之间的时间间隔变小, 达到稳态时间越短。

阻尼系数  $\gamma$  与  $R_2$  及总掺杂浓度  $N_r$  的关系如图 2 所示。可见, 随  $R_2$  及掺杂粒子浓度  $N_r$  的增加, 阻尼系

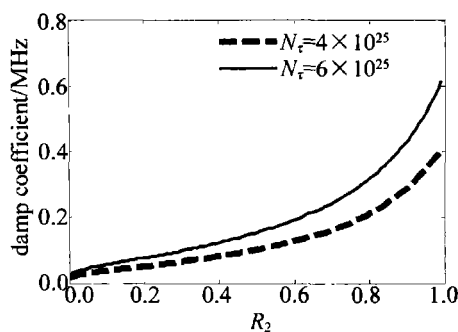


Fig. 2 Simulated damping coefficient  $\gamma$  for different values of output coupling reflectivity  $R_2$  and doped particle concentration  $N_r$

数也增加。因为增加  $R_2$ , 相当于增加腔长, 使腔内光子寿命增加, 从而导致阻尼系数增加。所以增加  $R_2$  有利于抑制自脉冲振荡。同时增加光纤的掺杂浓度, 也有利于抑制自脉冲行为。

图 3 中给出了固有振荡  $\omega$  随  $R_2$  和抽运功率的变化。当抽运功率超过阈值,  $R_2$  在 0~0.7 范围内变化时,  $\omega$  随  $R_2$  的增加而缓慢降低; 当  $R_2 > 0.7$  时,  $\omega$  降低的趋势很大, 这是由于输出端具有较高的反馈, 导致了

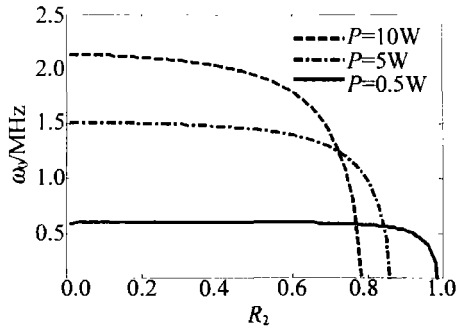


Fig. 3 Inherent oscillation frequency  $\omega$  vs. output coupling reflectivity  $R_2$  and different pump powers

腔内光子寿命较长,使自脉动增强。随抽运功率的升高, $\omega$  随  $R_2$  的增加减小的越快。所以,采用双镜腔结构的激光器,必须综合考虑各种因素的影响,适当地选择输出腔镜可以获得所需的激光。

### 3 结 论

从能级速率方程出发,用小信号近似方法推导出光子数密度扰动时变关系式,数值模拟了光子数密度和反转粒子数随时间及抽运功率的变化、阻尼系数与后腔镜反射率及掺杂粒子浓度的关系和固有振荡频率随后腔镜反射率的变化。随抽运功率的增加,振荡频率增加,自脉冲减弱。实验中如果采用高掺杂浓度的光纤,降低输出端的反馈和粒子的浓度有利于抑制自脉冲行为。

#### 参 考 文 献

[1] GLAS P, NAUMANN I, CHER A, *et al.* Self pulsing versus self locking in a CW-pumped neodymium-doped double clad fiber laser [J]. *Opt Commun*, 1999, 161(3): 345-358.  
 [2] CHERNIKOV S V, ZHU Y, TAYLOR J R. Super continuum self-Q-switched ytterbium fiber laser [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(5): 298-300.

[3] ZYSKIND J L, MIZRAHI V, DIGIOVANNI D J, *et al.* Short single frequency erbium-doped fiber laser [J]. *Electron Lett*, 1992, 28(15): 1385-1387.  
 [4] le BOUDEC P, le FLOHIC M, FRANCOIS P L, *et al.* Self-pulsing in Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1993, 25(5): 359-367.  
 [5] MARCUSE D. Pulsing behavior of a three-level laser with saturable absorber [J]. *IEEE J Q E*, 1993, 29(8): 2390-2396.  
 [6] HIDEUR A, CHARTIER T, OZKUL C, *et al.* Dynamics and stabilization of a high power side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Opt Commun*, 2000, 186(4): 311-317.  
 [7] ORTAC B, HIDEUR A, CHARTIER T, *et al.* Influence of cavity losses on stimulated Brillouin scattering in a self-pulsing side-pumped ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Opt Commun*, 2003, 215(4/6): 389-395.  
 [8] SALHI M, HIDEUR A, CHARTIER T, *et al.* Evidence of Brillouin scattering in an ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(15): 1294-1296.  
 [9] le BOUDEC P, FRANCOIS P L, DELEVAQUE E, *et al.* Influence of ions pairs on the dynamical behavior of Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser [J]. *Opt & Quant Electron*, 1993, 25(8): 501-507.  
 [10] SANCHEZ F, le BOUDEC P, STEPHAN G, *et al.* Effects of ions pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers [J]. *Phys Rev*, 1993, A48(3): 2220-2229.  
 [11] RANGEL-ROJO R, MOHEBI M. Study of the onset of self-pulsing behavior in an Er-doped fiber laser [J]. *Opt Commun*, 1997, 137(1): 98-102.  
 [12] JACKSON S D. Direct evidence for laser reabsorption as initial cause for self-pulsing in three-level fiber lasers [J]. *Electron Lett*, 2002, 38(25): 1640-1642.  
 [13] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN T R, *et al.* *Laser theory* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 178-179 (in Chinese).  
 [14] DUAN Zh Ch, CHEN J G, ZHANG P. Solution to rate equations of a double-clad fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 274-276 (in Chinese).  
 [15] WANG F, PAN W, LUO B, *et al.* Performance analysis of multi-wavelength Yb-doped double-clad fiber lasers [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 497-500 (in Chinese).

(上接第 650 页)

[5] TANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes [J]. *A P L*, 1987, 51(12): 913-915.  
 [6] BURROUGHS J H, BRADLEY D D C, BROWN A R, *et al.* Light-emitting diodes based on conjugated polymers [J]. *Nature*, 1990, 347(6293): 539-541.  
 [7] LI J Y, MA J F, YU Q, *et al.* Synthesis and fluorescent property of the Eu(III) complex with the benzoyl acetone and 1, 10-phenanthroline [J]. *Chemical Reagents*, 2006, 28(5): 264-266 (in Chinese).  
 [8] PAN Y F, HU F Z, ZHENG A N, *et al.* New progress of the luminescent materials of rare earth polymer [J]. *Journal of Functional Poly-*

*mers*, 2003, 16(4): 570-574 (in Chinese).

[9] DU Ch X, WANG Zh Q, XIN Q, *et al.* Synthesis, photo-and electroluminescent properties of novel ternary europium(III) complexes [J]. *Acta China Sinica*, 2004, 62(22): 2265-2269 (in Chinese).  
 [10] BAO J R, ZHU X W, WANG Zh L, *et al.* Synthesis, characterization and fluorescence of Eu<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup> complexes with 2-thiophenecarboxylic acid and 1, 10-phenanthroline [J]. *Chinese Rare Earths*, 2007, 28(3): 38-41 (in Chinese).  
 [11] XU S Y, GE W P, WANG L. Experimental research on rare ions polymers sensitization [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 579-581 (in Chinese).