

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0093-03

掺 Yb 双包层光纤放大器的瞬态增益特性研究

孔令峰, 楼祺洪, 周 军, 吴中林, 董景星, 魏运荣, 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 建立了简化的瞬态增益基本模型,数值计算了低频光脉冲经过掺 Yb 双包层光纤放大器(掺 Yb 双包层光纤放大器)后的波形。在实验中对种子源放大的掺 Yb 双包层光纤放大器的脉冲特性进行了分析,证实了其瞬态增益的低频响应特性。

关键词 激光技术; 光纤放大器; 双包层光纤; 瞬态增益

中图分类号 TN252 文献标识码 A

Investigation on Transient Gain Characteristics of Yb-doped Double Clad Fiber Amplifier

KONG Ling-feng, LOU Qi-hong, ZHOU Jun, WU Zhong-lin, DONG Jing-xing, WEI Yun-rong, ZHU Jian-qiang

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

Abstract A reduced model for transient gain is proposed and low repetition rate pulse after YDCFA is investigated through numerical calculation. Transient gain saturation and recovery is also discussed theoretically. Pulse amplified characteristics at different pump power and repetition rate are obtained through experiment, which is well in agreement with theoretical analysis.

Key words laser technique; fiber amplifier double clad fiber laser; transient gain

1 引言

双包层光纤放大器是最新发展的一种固体激光器件,它具有散热面积大、光束质量好、体积小等优点,同常规的体积庞大的气体激光器和固体激光器相比,均占有明显的优势,已逐渐发展成为高精度激光加工、激光雷达系统、空间技术、激光医学等领域中的重要候选者^[1],特别是应用种子源主振荡放大的双包层光纤放大器因其单脉冲能量高,光束质量好已成为人们青睐的获得脉冲光纤激光输出的方式^[2]。

掺 Yb 双包层光纤放大器作为一种新型的功率放大器,应具有恒定的增益或较小的增益变化,对大多数放大器(如 EDFA)而言,调制速率很高,稳态分析已经足够,上能级粒子数不随时间变化,但在研究抽运调制和光开关等特殊应用时,瞬态增益特性仍然起着重要的作用。

2 理论模型

在忽略受激自发辐射噪声的前提下,掺 Yb 双包层光纤放大器的二能级瞬态方程由粒子数速率方

程、功率传输方程组成,

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = (R_{pa} + W_{sa})N_1 - (R_{pe} + W_{se} + A_e)N_2 \quad (1)$$

$$N_1 + N_2 = \rho \quad (2)$$

$$\frac{\partial p_p^+}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial p_p^+}{\partial t} = \pm p_p^+ \cdot \Gamma_p \cdot (N_2 \sigma_{pe} - N_1 \sigma_{pa}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial p_s^+}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial p_s^+}{\partial t} = \pm p_s^+ \cdot \Gamma_s \cdot (N_2 \sigma_{se} - N_1 \sigma_{sa}) \quad (4)$$

其中, $R_{pa,e} = \frac{\sigma_{pa,e} \Gamma_p}{h\nu_p A_{eff}} p_p$, $W_{sa,e} = \frac{\sigma_{sa,e} \Gamma_s}{h\nu_s A_{eff}} p_s$, $A_e = \frac{1}{\tau_{21}}$ 分别

为抽运光的吸收和发射速率,信号光的吸收和发射速率,自发发射速率。 A_{eff} 和 τ_{21} 分别是双包层光纤的有效掺杂面积和激光上能级荧光寿命, Γ_p 和 Γ_s 分别是抽运光和信号光与掺杂离子间的有效交迭因子。

特征时间常数 $t_0 = \frac{\tau}{1+q+p}$, $q = \frac{p_p}{p_p^{sat}}$, $p = \frac{p_s}{p_s^{sat}}$ 。假设抽运光是连续的,在放大器进入稳态的某一时刻,输入一个低频脉冲信号,增益会随时间逐渐饱和,饱和特征时间常数为 $t_{\alpha} = \tau/(1+q+p)$,当脉冲信号过后,增益会随时间逐渐恢复,恢复特征时间为 $t_{\alpha} = \tau/(1+q)$,可以看出增益恢复时间总是大于增益饱和时间。

基金项目: 中国科学院知识创新工程和上海市光科技资助课题。

作者简介: 孔令峰,男,(1979-),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 LD 抽运固体激光和双包层光纤激光方面的研究。E-mail: lf_kong01@yahoo.com.cn

为分析脉冲经过掺 Yb 双包层光纤放大器后的瞬态增益,就要对方程(1)~(4)进行数值求解,常用的为有限元法,将时间和空间分解成独立的单元进行迭代积分,初始条件可由(1)~(4)的稳态解给出,假设信号光为高斯脉冲,脉宽为 1 μs。

$$\lambda_s=1064 \text{ nm}, \lambda_p=915 \text{ nm}, \tau_{21}=0.84 \text{ ms}, \rho=1.9 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}, \Gamma_p=0.0012, \Gamma_s=0.82, \sigma_{sa}=3 \times 10^{-26} \text{ m}^2, A_{\text{eff}}=5 \times 10^{-11} \text{ m}^2, \sigma_{pe}=3 \times 10^{-26} \text{ m}^2, \sigma_{pa}=2.5 \times 10^{-24} \text{ m}^2, \sigma_{sc}=5.5 \times 10^{-26} \text{ m}^2$$

图 1 为数值计算低频高斯脉冲经过掺 Yb 双包层光纤放大器后的波形,可以看出光脉冲在传输和放大过程中,由于反转粒子数随时间的变化,导致高斯脉冲的前沿增益大于后沿的增益,脉冲峰值向前沿方向移动,产生波形的畸变。

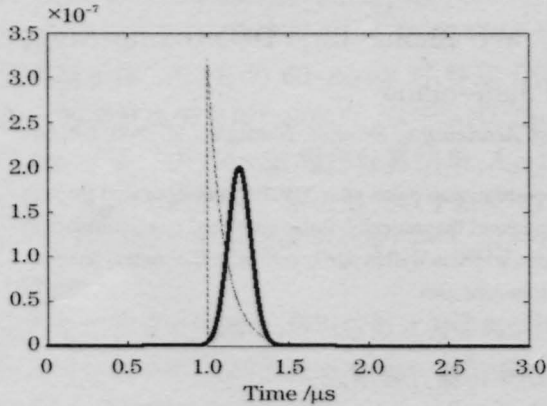


图 1 高斯脉冲波形在掺 Yb 双包层光纤放大器中随时间的变化

Fig.1 Transient changes of Gauss pulse as functions of time in YDCFA

假设在低频信号进入时放大器已处于稳态,抽运光为均匀抽运,信号光为高斯脉冲,在信号光进入掺 Yb 双包层光纤放大器后,使上能级粒子数急剧

减少,下能级粒子数逐渐增多,而抽运光使上能级粒子数增加,下能级粒子数减少,在两者共存时期,使反转粒子数呈现饱和而减少,在信号光过后,由于抽运光的存在,粒子数逐渐恢复到稳态时的水平。

加大抽运功率,增益饱和时间和增益恢复时间渐渐变小,随着功率的不断升高,两者趋于同一值,这是由于抽运光不断变强,反转粒子数增多,使得增益达到饱和的时间越来越短,当脉冲过后,同样由于抽运光的作用,反转粒子数迅速恢复到原来的水平。当抽运光增大到一定数值,增益饱和时间和增益恢复时间趋于相等。

3 实验装置

在实验中采用的是种子源主振荡放大的掺 Yb 双包层光纤放大器,重复频率为 20~100 kHz 连续可调,抽运功率为 0~10 W 可调,当输出功率增大的时候,在光路中加上可调衰减器,衰减度可达 80%以上,最后进入 InGaAs 光电探测器和示波器,通过改变种子源的重复频率和抽运源的功率,得到各种不同条件下的波形。

4 实验结果和分析

在重复频率为 20 kHz 时,信号光为近高斯波,随着抽运功率的增加,其波形呈现有规律的变化,波形峰值逐渐向脉冲前沿转移,这表明随着抽运功率的增加,上能级粒子数逐渐增多,脉冲前沿进入光纤放大器后,得到近指数的增益,脉冲后沿得到的增益随上能级粒子数的急剧减少而减小,从而引起波形的畸变,如图 3。由于受激辐射的时间相关性及初始状态相关性,脉冲前沿使得大量上能级粒子产生受

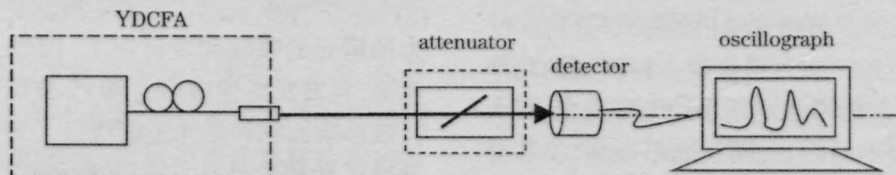


图 2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental configuration

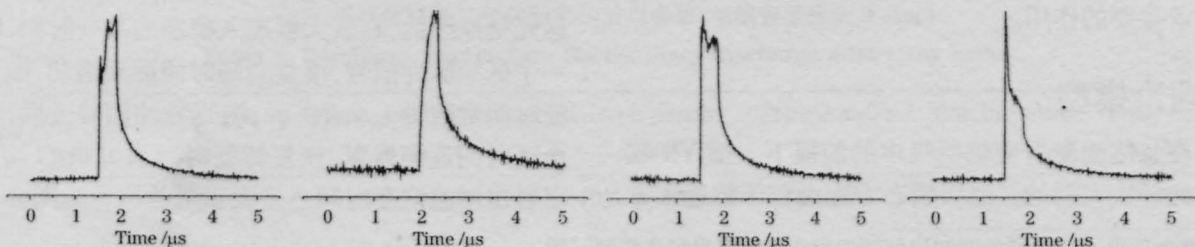


图 3 20 kHz 脉冲进入掺 YB 双包层光纤放大器后瞬态增益随抽运功率增大的变化

Fig.3 Transient gain of pulse at 20 kHz changes as the increase of pump power

激辐射,消耗掉的上能级粒子通过抽运能级上粒子的无辐射跃迁和上能级多重态间粒子的横向驰豫过程得到补充^[4],若上能级粒子不能在足够短的时间内得到补充,则造成脉冲之间甚至一个脉冲前后间的增益差异,形成瞬态增益现象。

在提高脉冲信号的重复频率后,虽然信号光也有很大的增益,但是,信号的峰值不再向脉冲前沿转移,前后沿的增益基本上趋于一致,在相同的抽运功率下,高重复频率的信号光的畸变比低重复频率的信号光的畸变要小的多。图4是在较大抽运功率下,不同重复频率的近高斯波的放大波形,可以看出,在重复频率为20 kHz时,脉冲畸变的比较明显,脉冲前沿增益远比后沿大,在100 kHz时,脉冲前沿和后沿增益基本上相同,没有太大的差异。由此可知,低频信号在掺Yb双包层光纤放大器中存在明显的瞬态增益现象,在高频信号时,特别是信号光的调制周期远小于饱和特征时间常数 t_{os} 时,反转粒子数变化很小,因而信号光前后沿增益的变化也很小,所以对于高频信号,放大过程中引起的波形的畸变也很小。

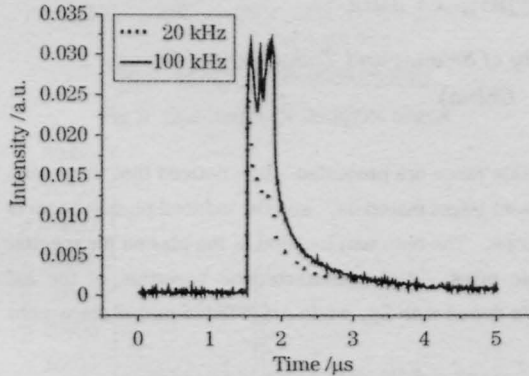


图4 在同一抽运功率下20 kHz和100 kHz时脉冲前沿和后沿的增益对比

Fig.4 Upper and lower gain at 20 kHz and 100 kHz at the same pump power

实验中还发现,在某一特定的重复频率下,脉冲宽度随着抽运功率的增加而不断减小,即存在脉冲压缩现象。我们分别测量了重复频率在20 kHz和100 kHz时,抽运功率不同时的脉冲宽度,如图5

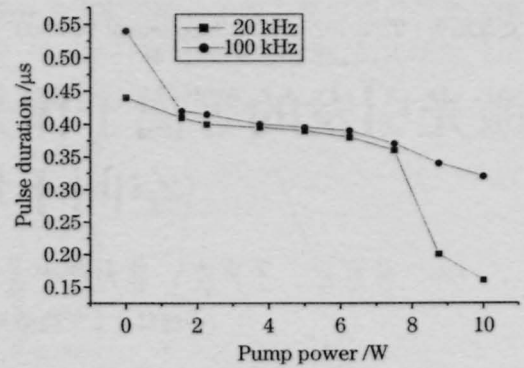


图5 脉冲宽度随着抽运功率的增加而减小

Fig.5 Pulse width decreases as the increases of pump power shown.

从图5中还可以得知,在较高的抽运功率水平下,脉冲压缩的倍数随着重复频率的增加而减小,相应的单脉冲能量有所提高,在低重复频率的情况下,脉冲压缩的倍数比较大,说明了在此频率下抽运光存储在光纤中的能量基本上被耗尽^[6],反转粒子数变化比较大。高频信号的脉宽变化比较小是因为信号周期较短,引起的粒子数变化比较小,脉冲前后沿的增益变化不大^[6]。

参考文献

- 1 B. Rossi. Commercial fiber laser take on industrial markets[J]. *Laser Focus World*, 1997, **33**(5):143-149
- 2 J. Limpert, A. Liem, T. Gabler *et al.*. High-average-power picosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(23):1849-1851
- 3 K. Y. Ko, M. S. Demokan *et al.*. Transit gain of EDFA[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(12):1436-1438
- 4 Yang Xianglin. *Light Amplifier and Applications* [M]. Beijing: 2000.43-47
杨祥林等编著. *光放大器及其应用*[M]. 北京,2000,43-47
- 5 J. Limpert, S. Hofer, A. Liem *et al.*. 100W average power, high energy nanosecond fiber amplifier[J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**: 477-479
- 6 Liu Yu, Ming Hai, Wang Shengbo *et al.*. Research into Gain Modulation Characteristics of Erbium-Doped Fiber Pumped by Pulsed Laser [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1996, **13**(6):517-521
刘宇,明海,王声波等.脉冲泵浦掺铒光纤增益调制特性的研究[J]. *量子电子学报*, 1996, **3**(6):517-521