

掺 Yb 双包层光纤放大器的瞬态增益和频率响应*

孔令峰^{1,2} 楼祺洪¹ 周 军¹ 吴中林¹ 董景星¹ 魏运荣¹ 朱健强¹

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在理论上和实验上对掺 Yb 双包层光纤放大器(YDCFA)的瞬态增益特性进行了研究. 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双包层光纤的放大波形, 分析了瞬态增益饱和和恢复特性. 在实验中对种子源放大的 YDCFA 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 光纤放大器; 双包层光纤; 瞬态增益

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

掺杂稀土元素的光纤和包层泵浦技术的出现是光波技术领域革命性的变化, 双包层光纤放大器(DCFA)现已成为研究的热点, 和传统的半导体激光器相比, 双包层光纤放大器具有高增益、低阈值、转换效率高、光束质量好、结构紧凑小巧等优点, 在激光加工、激光雷达、医疗和空间通讯等领域有着广泛的应用. 特别是应用种子源主振荡放大的 DCFA 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^[1].

YDCFA 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, 实际上, 在泵浦功率和信号功率不变时, 脉冲信号频率对其增益会有一定影响. 本文对 YDCFA 的瞬态增益特性进行了研究, 建立了小信号瞬态增益模型, 对低频脉冲信号经过 YDCFA 放大后的波形进行了数值模拟, 分析了瞬态增益饱和和恢复特性. 在实验中对种子源主振荡放大的 YDCFA 的低频和低频信号放大特性进行了对比. 理论分析和实验结果符合得较好.

1 理论模型

Yb³⁺ 具有简单的二能级结构、宽的增益谱、长的上能级荧光寿命和高的量子效率. 在忽略受激自发辐射噪声(ASE)的前提下, YDCFA 的二能级瞬态方程由粒子数速率方程、功率传输方程组成

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

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

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

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

式中 $R_{pa,e} = \frac{\sigma_{pa,e} \Gamma_p}{h\nu_p A_{eff}} p_p$, $W_{sa,e} = \frac{\sigma_{sa,e} \Gamma_s}{h\nu_s A_{eff}} p_s$, $A_e = 1/\tau_{21}$ 分别为泵浦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 分别是泵浦光和信号光与掺杂离子间的有效交叉因子. $\sigma_{pa,e}$ 为泵浦光吸收和发射截面面积, $\sigma_{sa,e}$ 为信号光吸收和发射截面面积, v_g 为信号光和泵浦光的群速度, ρ 为单位体积中能级粒子数总和. 这里泵浦光和信号光传播的方向取决于符号的差异. 上述方程组为忽略 ASE 的一般方程, 对 YDCFA 普遍适用, 对不同脉冲频率的信号均有效, 只不过放大过程不一样. 由于存在时间和空间特性, 不存在简单的解析解, 但可采用多种方法进行数值积分.

然而, 当不考虑 ASE 的时候, 可以近似地认为方程组在光纤输入端存在粒子数的瞬态解析解^[2], 令 $n_i = N_i/\rho (i=1, 2)$, 将方程(1)和(2)重新写成

$$\frac{dn_2}{dt} = (R_{pa} + W_{sa})n_1 - (R_{pe} + W_{se} + A_e)n_2 \quad (5)$$

$$n_1 + n_2 = 1 \quad (6)$$

将(5)代入(6), 消去 n_1 , 得

$$\frac{dn_2}{dt} + \xi n_2 = \eta$$

$$\xi = R_{pa} + W_{sa} + R_{pe} + W_{se} + A_e, \eta = R_{pa} + W_{sa}$$

通解为 $n_2 = ce^{-\xi t} + \eta/\xi$, 其中 $c = n_2^0 - \eta/\xi$

所以特征时间常数 $t_0 = 1/\xi = \tau/(1+q)$, 其中 $q = p_p/p_s^{sat}$, $p = p_s/p_s^{sat}$.

假设泵浦光是连续的, 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 $t_{os} = \tau/(1+q+p)$, 当脉冲信号过后, 增益会随时间逐渐恢复, 恢复特征时间

* 中国科学院知识创新工程和上海市光科技资助项目
Tel: 021-69918629 Email: lf_kong01@yahoo.com.cn
收稿日期: 2003-10-17

为 $t_{or} = \tau / (1 + q)$, 可以看出增益恢复时间总是大于增益饱和时间. 在计算中的相关参量为

$$\lambda_p = 915 \text{ nm}, \lambda_s = 1064 \text{ nm}, \sigma_{pa} = 2.5 \times 10^{-24} \text{ m}^2, \sigma_{pe} = 3 \times 10^{-26} \text{ m}^2, \tau_{21} = 0.84 \text{ ms}, \rho = 1.9 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}, \sigma_{sa} = 3 \times 10^{-26} \text{ m}^2, \sigma_{se} = 5.5 \times 10^{-26} \text{ m}^2, A_{eff} = 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2, \Gamma_p = 0.0012, \Gamma_s = 0.82, P = 1000, q = 100$$

上下能级相对粒子数随时间的变化如图 1 所示: 假设在低频信号进入时, 泵浦光为均匀泵浦, 信号光为方波脉冲, 脉宽为 1 μs , 在信号光进入 YDCFA 后, 使上能级粒子数急剧减少, 下能级粒子数逐渐增多, 而泵浦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, 由于泵浦光的存在, 粒子数逐渐恢复到稳态时的水平.

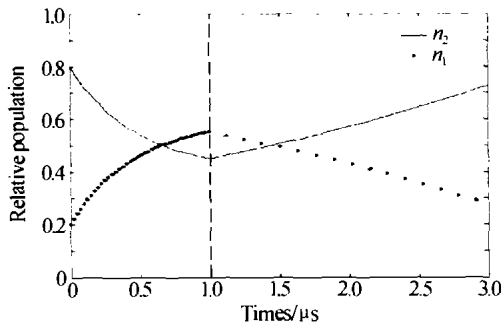


图 1 YDCFA 输入端相对粒子数随时间的变化
Fig. 1 The relative population at input end of Yb-doped DCFA changes as functions of time

在图 2 中, 加大泵浦功率, 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, 这是由于泵浦光不断变强, 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

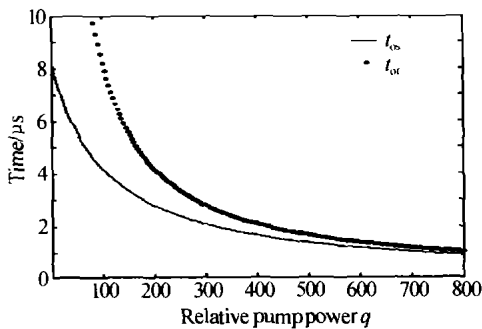


图 2 增益饱和、恢复特征时间随相对泵浦功率的变化
Fig. 2 Saturation and recovery time changes as functions of relative pump power

后, 同样由于泵浦光的作用, 反转粒子数迅速恢复到原来的水平. 当泵浦光增大到一定数值, 增益饱和时间和增益恢复时间趋于相等.

在 $Z > 0$ 时, 信号的变化与时间和空间有关, 难求解析解, 为简单处理, 只需考虑脉冲信号经过放大器后在输出端的波形变化. 为讨论放大器输出端的瞬态增益特性, 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, 即假定方程中各偏微分为 0, 关于边界条件, 假设信号光为方波脉冲, 脉宽为 1 μs , 功率为 0.3 W, 泵浦功率根据需要可调. 计算中除上述参量外, YDF 长度 10 m, $P_p^{sat} = 2\text{E-}3\text{W}$, $P_s^{sat} = 1.5\text{E-}2\text{W}$.

图 3 为数值计算低频方波脉冲经过 YDCFA 后的波形, 可以看出光脉冲在传输和放大过程中, 基态上粒子数逐渐减少, 而激发态上的粒子数逐渐增加, 从而使粒子数反转增加, 使脉冲前沿、后沿的增益都增大, 但由于脉冲前沿放大对后沿放大的抑制, 导致方波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. 反转粒子数随时间的变化引起的出射信号光波形的畸变, 与信号光脉冲的调制频率有关, 当调制频率较低时, 信号脉冲宽度与增益饱和时间可比拟时, 脉冲的前沿增益更大, 波形畸变更严重^[3]. 同时还表明, 在信号功率不变时, 随着泵浦功率的增加, 波形的畸变会加剧.

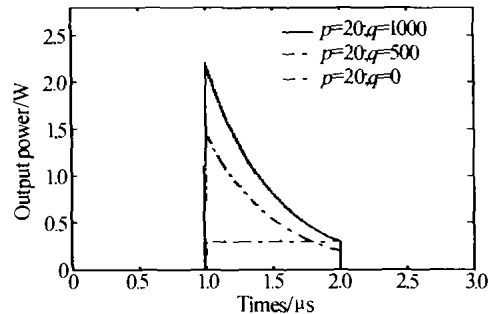


图 3 方波脉冲波形在 YDCFA 中随时间的变化
Fig. 3 The transient changes of square pulse as functions of time in YDCFA

2 实验装置

在实验中采用的是种子源主振荡放大的 YDCFA, 如图 4 所示, 种子源为 Nd:YAG 调 Q 激光器,

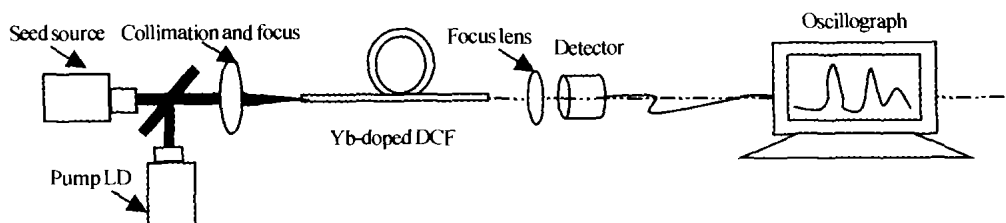


图 4 实验装置示意图
Fig. 4 Schematic diagram of experimental configuration

平均功率为近百毫瓦,波长约为 1064 nm,重复频率为 20 ~ 100 kHz 连续可调,泵浦 LD 功率为 0 ~ 10 W 可调,波长为 915 nm. 种子光和泵浦光通过 45° 双色片耦合,再经过准直聚焦系统,使得大部分泵浦光进入掺 Yb 双包层光纤内包层,同时种子光进入掺杂纤芯,双包层光纤两端磨有小角度倾角,以防止菲涅尔反射,双包层光纤长度约 10 m,输出光斑发散角约为几个毫弧度,在光路中加上聚焦透镜,如功率增大可加入可调衰减器,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泵浦源的功率,得

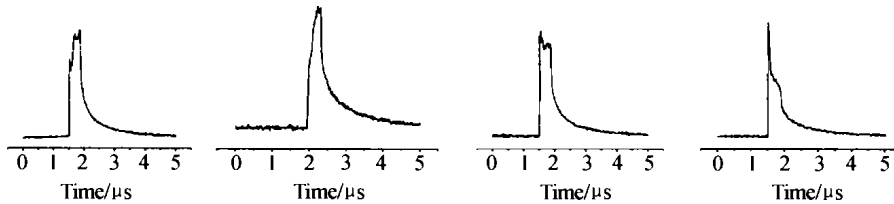


图 5 20 kHz 脉冲进入 YDCFA 后输出波形随泵浦功率增大的变化

Fig. 5 Transient gain of pulse at 20 kHz changes as the increase of pump power

能级粒子产生受激辐射,消耗掉的上能级粒子通过泵浦能级上粒子的无辐射跃迁和上能级多重态间粒子的横向弛豫过程得到补充^[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,在相同的泵浦功率下,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 6 是在较大泵浦功率下,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 YDCFA 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_{so} 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.

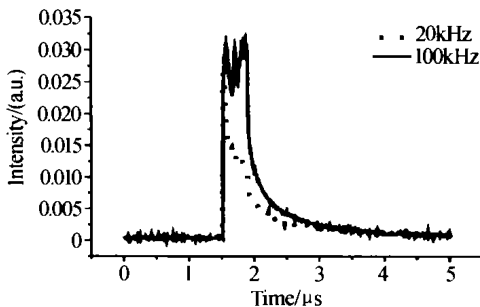


图 6 在同一泵浦功率下 20 kHz 和 100 kHz 时脉冲前沿和后沿的增益对比

Fig. 6 Upper and lower gain at 20 kHz and 100 kHz at the same pump power

到各种不同条件下的波形.

3 实验结果和分析

在重复频率为 20 kHz 时,信号光为近高斯波,随着泵浦功率的增加,其波形呈现有规律的变化,波形峰值逐渐向脉冲前沿转移,这表明随着泵浦功率的增加,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 5. 在此过程中,脉冲前沿使得大量上

实验中还发现,在某一特定的重复频率下,脉冲宽度随着泵浦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,泵浦功率不同时的脉冲宽度,如图 7 所示.

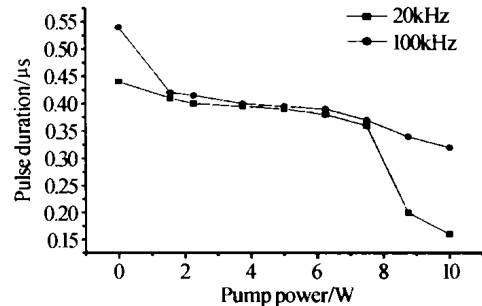


图 7 输出信号的脉宽随着泵浦功率的增加而减小

Fig. 7 Pulse width of output signal decreases as the increases of pump power

从图中还可以得知,在较高的泵浦功率水平下,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,说明了在此频率下泵浦光存储在光纤中的能量基本上被耗尽^[5],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].

4 结论

根据 YDCFA 的速率方程和传播方程,在忽略自发辐射的前提下,建立了小信号瞬态增益模型,通过数值计算,从理论上证明了掺 Yb 双包层光纤放大器的低频响应特性. 在实验中对种子源放大的 YDCFA 的脉冲输出特性进行了研究. 实验结果证明了 YDCFA 瞬态增益的低频响应特性,在高频时

脉冲前后沿增益基本相同. 实验还表明在不同的泵浦功率下,不同重复频率的脉冲宽度存在不同程度的压缩现象,对此进行了解释.

参考文献

- 1 Limpert J, Liem A, *et al.* High average power picosecond Yb-doped fiber amplifier. *Optics Letter*, 2001, **26**(23): 1849 ~ 1851
- 2 Ko K Y, Demokan M S, *et al.* Transient analysis of Er-doped fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, **6**(12): 1436 ~ 1438
- 3 杨宝, 明海, 谢建平, 等. 掺钕光纤功率放大器中脉冲非线性放大的理论研究. *光子学报*, 1996, **25**(11): 965 ~ 969
- 4 杨祥林. 光放大器及其应用. 北京: 电子工业出版社, 2000. 43 ~ 47
- 5 Yang X L. Light Amplifier and Its Application. Beijing: Electronics Industry Press, 2000. 43 ~ 47
- 6 Limpert J, Hofer S, *et al.* 100 W average-power high-energy nanosecond fiber amplifier. *Applied Physics B*, 2002, **75**: 477 ~ 479
- 7 刘宇, 明海, 王声波, 等. 脉冲泵浦掺钕光纤增益调制特性的研究. *量子电子学报*, 1996, **13**(6): 517 ~ 521
- 8 Liu Y, Ming H, Wang S B, *et al.* *Chinese J of Quantum Electronics*, 1996, **13**(6): 517 ~ 521

Frequency Response and Transient Gain of Yb-doped Double Clad Fiber Amplifier

Kong Lingfeng^{1,2}, Lou Qihong¹, Zhou Jun¹, Wu Zhonglin¹, Dong Jingxing¹, Wei Yunrong¹, Zhu Jianqiang¹

¹ Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, CAS, Shanghai 201800

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2003-10-17

Abstract Transient gain of YDCFA is analyzed both on theory and experiment. 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 is obtained through experiment, which is well in agreement with theoretical analysis.

Keywords Fiber amplifier; Double clad fiber laser; Transient gain



Kong Lingfeng obtained the B. S. degree in July, 2001 from Qufu Normal University. In September, 2001, he began to study for his M. S. degree at Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, CAS. Now he is studying for his Ph. D. degree directly at the same institute. His research interests include LD pumped rare earth doped fiber lasers and amplifiers.