

弱反馈下脉冲掺镱放大器输出特性的计算机仿真

孔令芳, 果鑫, 李娜, 刘丰年, 李长云

(湖南工业大学 计算机与通信学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 基于全光纤双包层脉冲掺镱放大器模型, 研究了纳秒脉冲的动态传输特性。在不考虑输入信号的情况下, 受前向泵浦的掺镱双包层光纤上能级粒子数的分布呈现中间高两端低的特征。考虑连续信号输入, 在放大器存在弱反馈条件下, 泵浦功率越高, 弱反馈引起的后向放大信号消耗更多上能级粒子, 正向的信号输出功率随着光纤长度的增加而降低。

关键词: 弱反馈; 掺镱放大器; 输出特性

中图分类号: TN915.05

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)05-0054-04

The Computer Simulation of Output Characteristics of Pulse Ytterbium-Doped Amplifiers under Weak Feedback

Kong Lingfang, Guo Xin, Li Na, Liu Fengnian, Li Changyun

(School of Computer and Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Based on the all-optical pulse Yb-doped double-clad amplifier modeling, studies the dynamic transmission characteristics of nanosecond pulses. Without considering the input signal, the upper-level population of ytterbium-doped double-clad fiber by forward-pumped distributes the characteristics of high intermediate and low at two ends. Considering the continuous signal input and the existence of weak feedback in amplifier, the backward amplified signals caused by the weak feedback consumes more number of upper-level particles as the pump power is higher. When the fiber length increases, a positive signal output power reduces.

Keywords: weak feedback; ytterbium-doped amplifiers; output characteristics

高功率脉冲光纤放大器具有光束质量高、结构紧凑、光纤输出、散热性能好等优势, 广泛运用于精密加工、材料处理、医疗、激光雷达、太空通信等领域。普通脉冲光纤激光器输出的平均功率一般为毫瓦量级, 要获得更高的单脉冲能量, 只能靠放大技术。单级单模掺镱光纤放大器能提供的增益一般在 0~13 dB。实现高功率脉冲输出最有效的方式之一就是级联多级放大器, 通常是在单模放大的基础上级联双包层放大器^[1-7]。这种级联多级放大器的放大方式在光路中必定会有多个光纤熔点, 因此光路的反馈会变得较为复杂。实际操作中隔离措施的使用能够削弱各级放大器之间的反

馈, 但在每级之内仍然存在弱反馈的影响。因此, 需要对弱反馈下的脉冲放大器进行理论模拟与实验研究。

1 基本模型及理论分析

级联双包层掺镱光纤脉冲放大器的基本模型如图 1 所示。此模型是基于高耦合效率合束器的级联放大结构。图 1 中泵浦/信号光耦合区是全光纤器件, 合束器 (2+1)×1 的型号为 MMCO2112CCO, 为多模非保偏合束器。B、C 为合束器的泵浦输入端, A 为信号输入端, D 为信号输出端。信号光工作波长在 1 040~1 080 nm, 泵

收稿日期: 2010-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60773110), 湖南省教育厅基金资助项目 (09C316)

通信作者: 孔令芳 (1983-), 女, 山西晋中人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为光纤通信, E-mail: 120344883@qq.com

浦光工作波长在 800~1 000 nm。因合束器耦合效率较高, 故必须采用泵浦保护器防止信号光返回 LD, 因此在 LD 尾纤接入泵浦保护器。该保护器对小于 920 nm 波长的光高透, 对大于 920 nm 波长的光吸收, 有效防止了信号光返回对 LD 造成的危害。合束器对泵浦光的耦合效率高达 98%, 但如果未对放大器采取很好的隔离措施, 包层反馈的光将很容易进入 LD, 影响 LD 的正常工作。因此, 需将合束器的另一个泵浦端闲置, 用以泄漏反馈。另外在输出端将 Yb 纤尾纤处的涂敷层剥除, 涂上

高折射率材料以滤除掺镱光纤内包层中的剩余抽运光 (pump dump)。为了抑制光纤端面的反射和放大自发辐射激光的自生振荡, 把光纤输出端处理为 8° 斜角。泵浦 B、C 端的数值孔径 N_A 及芯径/内包层尺寸为: 0.22, 105/125 μm , 信号输入/输出端芯径/内包层 N_A 及芯径/内包层尺寸为: 0.08/0.46, 10/125 μm 。光隔离器有避免返回的光功率影响种子光源的作用。在信号输入端, 泵浦保护器、隔离器、合束器与双包层光纤对芯熔接。由图 1 可见, 圈叉的熔接位置对放大器造成了弱反馈影响。

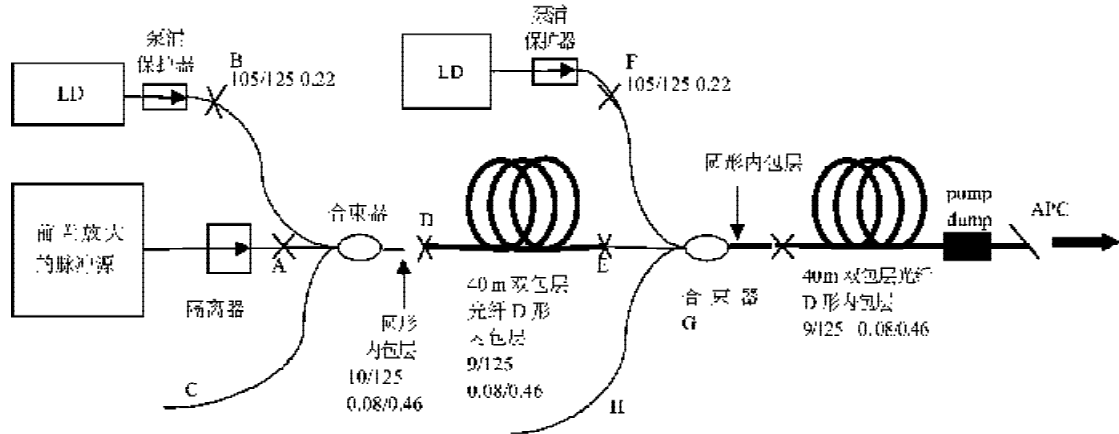


图 1 级联双包层掺镱光纤脉冲放大器的基本模型

Fig.1 The basic model of double-clad Yb-doped optical fiber amplifier

在双包层结构的光纤放大器中, 掺杂光纤具有很高的增益。但在信号光放大的同时, 自发辐射在传播过程中也不断得到放大, 形成放大的自发辐射 (amplified spontaneous emission, 简称 ASE), 直接影响光纤放大器的输出特性。由于掺 Yb³⁺ 双包层光纤发射截面的光谱相对较宽, 无法利用某一固定波长的发射截面值进行较为准确的计算。在下面的模型中, 将 ASE 光谱划分为不同的通道 K , 每一个通道的中心波长为 λ_k ($k = 1, 2, \dots, k$), 并且每个通道的宽度记作 $\Delta\lambda_k$, 因为实际信号光的带宽 $\Delta\lambda_s$ 为 0~2 nm, 所以可取 $\Delta\lambda_k = \Delta\lambda_s$, 这样, 信号光和 ASE 的传输方程就具有相同的形式。基于以上假设, 瞬态掺 Yb³⁺ 双包层光纤放大器的速率方程为^[8]:

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_u(\lambda_p) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] \cdot [P_p^+(z,t) + P_p^-(z,t)] - \frac{N_2(z,t)}{\tau} + \frac{\Gamma}{hcA} \sum_{k=1}^K \lambda_k [\sigma_u(\lambda_k) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_k) N_2(z,t)] \cdot [P_s^+(z,t, \lambda_k) + P_s^-(z,t, \lambda_k)], \quad (1)$$

$$\pm \frac{\partial p^\pm(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p^\pm(z,t)}{\partial t} = \Gamma_r [\sigma_a(\lambda_p) N_2(z,t) - \sigma_s(\lambda_p) N_1(z,t)] \cdot P_p^\pm(z,t) - \alpha_p P_p^\pm(z,t), \quad (2)$$

$$\pm \frac{\partial P_s^\pm(z,t, \lambda_k)}{\partial z} + \frac{1}{v_s} \frac{\partial P_s^\pm(z,t, \lambda_k)}{\partial t} = \Gamma_s [\sigma_a(\lambda_k) N_2(z,t) - \sigma_s(\lambda_k) N_1(z,t)] P_s^\pm(z,t, \lambda_k) - \alpha_s P_s^\pm(z,t, \lambda_k) - \frac{hc^2}{\lambda_k^3} \Delta\lambda, \quad (3)$$

$$N = N_1(z) + N_2(z). \quad (4)$$

式 (1)~式 (4) 中: z 为光纤轴向的位置坐标 ($z \in [0, L]$, L 为光纤长度), $z = 0$ 和 $z = L$ 光纤熔接处的反馈系数都设为 4%; N 为光纤中的 Yb³⁺ 离子数, $N_2(z,t)$ 为光纤中 t 时刻 z 位置处的上能级 Yb³⁺ 离子数, $N_1(z,t)$ 为光纤中 t 时刻 z 位置处的下能级 Yb³⁺ 离子数; $P_p^\pm(z,t)$ 为光纤中 t 时刻 z 位置处的正、反向泵浦功率; $P_s^\pm(z,t, \lambda_k)$ 为光纤中 t 时刻 z 位置处中心波长为 λ_k 的通道内的正、反向信号光的功率; Γ_p 和 Γ_s 分别为泵浦光和信号光的功率填充因子; $\sigma_a(\lambda_p)$ 和 $\sigma_e(\lambda_p)$ 分别为泵浦光的吸收截面和发射截面; $\sigma_a(\lambda_k)$ 和 $\sigma_e(\lambda_k)$ 分别为波长为 λ_k 的信号光的吸收截面和发射截面; v_p 和 v_s 分别为泵浦光和信号光的频率; τ 为 Yb³⁺ 的上能级寿命; A 为纤芯的面积; c 为真空中的光速; h 为普朗克常数; α_p 和 α_s 分别为泵浦光和信号光在光纤中的衰减系数。在边界条件中对输入/输出信号功率的界定反映了放大器中的弱反馈机制。双包层掺镱光纤的主要参数如表 1 所示。

表1 双包层掺镱光纤的主要参数

Table 1 The main parameters of Yb-doped double-clad fiber

σ_a/m^2 (1 060 nm)	σ_e/m^2 (1 060 nm)	σ_a/m^2 (915 nm)	σ_e/m^2 (915 nm)	α_s /dB · m ⁻¹	α_p /dB · m ⁻¹
5.0×10^{-27}	3.4×10^{-25}	2.5×10^{-24}	2.5×10^{-24}	0.06	0.08
N_i/m^3	$d_1/\mu\text{m}$	$d_2/\mu\text{m}$	Γ_s	Γ_p	τ/ms
6.0×10^{25}	10	125	0.82	0.01	0.84

通常在数千赫兹至数百千赫兹的高重复频率下, 脉冲间隔远小于Yb³⁺离子的上能级寿命, 所以可以近似地认为 $dN_1/dt = dN_2/dt = 0$, 以及所有与时间有关的项都等于0, 这样得到稳态速率方程模型为:

$$N = N_1(z) + N_2(z), \quad (5)$$

$$N_2(z) = N \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_a(\lambda_p)\Gamma_p + \sum_{k=1}^s \frac{[P_s^+(z, \lambda_k) + P_s^-(z, \lambda_k)]\sigma_s(\lambda_k)\Gamma_s}{h\nu_s A}}{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\left[\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_s(\lambda_p)\right]\Gamma_p + \sum_{k=1}^s \frac{[P_s^+(z, \lambda_k) + P_s^-(z, \lambda_k)]\left[\sigma_s(\lambda_k) + \sigma_c(\lambda_k)\right]\Gamma_s}{h\nu_s A}}, \quad (6)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \Gamma_p \left[\sigma_e(\lambda_p)N_2(z) - \sigma_a(\lambda_p)N_1(z) \right] P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (7)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z, \lambda_k)}{dz} - \Gamma_s \left[\sigma_s(\lambda_k)N_2(z) - \sigma_a(\lambda_k)N_1(z) \right] P_s^\pm(z, \lambda_k) - \alpha_s P_s^\pm(z, \lambda_k) + 2\sigma_c(\lambda_k)N_2(z) \frac{hc^2}{\lambda_k^3} \Delta\lambda = 0, \quad (8)$$

在前向泵浦条件下, 基于以上准稳态速率方程组, 必须考虑的初始条件为: 假设泵浦光为连续光, 即 $P_p^+(0) = P_{\text{pump}}$, $P_p^-(0) = 0$; 在求稳态ASE时, 假设输入的信号光为0, 即 $P_s^+(0, \lambda_k) = 0$ ($k=1, 2, \dots, k$), 在计算信号光放大时, 则 $P^+(0, \lambda_s) = P_m$, $P^-(0, \lambda_s) = 0$; 稳态求解时, P_m 为一定功率的连续光, 脉冲放大时, 则为一定峰值功率和脉宽的不同波形的脉冲^[9]。

采用四阶龙格-库塔方法, 对式(5)~式(8)进行数值计算。以 l 为小段光纤长度, 将总长度为 L 的光纤分为 L/l 段。对于每一小段光纤, 在知道其前端口处初始值的情况下, 采用四阶龙格-库塔方法, 对以上一阶微分方程进行数值化求解, 可得到另一端口处相应波长的信号光和泵浦光的功率, 作为下一小段光纤的前端初始值。因此, 在知道前端初始值的情况下, 对 L/l 段光纤进行数值化求解后, 便可得到后端口的正

向和反向不同波长的光功率。在光纤输入端的初始值, 连续泵浦功率为10, 20, 30, 40 W, 输入光为连续光。

2 模拟结果及分析

图2为上能级粒子数随光纤长度的变化图。图2中给出了在没有输入信号的情况下, 前向泵浦功率分别为10, 20, 30, 40 W时稳态情况下的上能级粒子数分布。由图2可见, 4条曲线变化规律相同且基本重合: 在掺镱双包层光纤中上能级粒子数分布呈现出两端较低中间较高的特点。这与掺镱双包层光纤的泵浦吸收特性有关。采用的前向泵浦在 $z=0$ 处, 后向ASE输出功率远高于前向ASE输出功率^[8], 因此消耗了大量的上能级粒子, 导致 $z=0$ 附近上能级粒子数降低。随着光纤长度的增加, 后向ASE与前向ASE输出功率达到动态平衡, 在 $z \approx 3.8$ m处上能级粒子消耗达到最小, 因此该处所储存的上能级粒子数达到最大值。随着前向ASE输出功率的增加, 后向ASE输出功率变小, 对上能级粒子的消耗进一步加强, 使上能级粒子数成指数衰减。由图2还可观察到泵浦功率为10 W的上能级粒子数曲线的峰值比泵浦功率为20, 30, 40 W的曲线峰值要低。

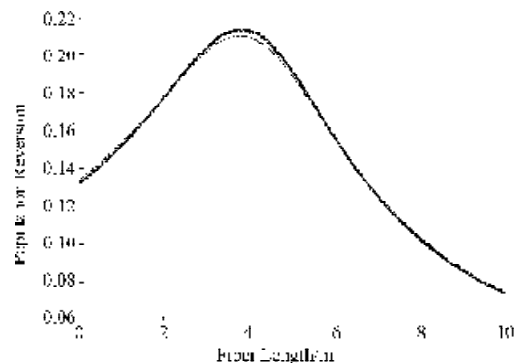


图2 上能级粒子数随光纤长度的变化图

Fig. 2 Evolution of upper-level population distribution under different fiber length

图3为泵浦功率随光纤长度的变化图。同样考虑前向泵浦分别为10, 20, 30, 40 W的4种情况。从图3可以看出, 在任一种泵浦情况下, 均有97%的泵浦光功率被掺镱光纤吸收。由于泵浦光在光纤内被Yb³⁺吸收, 其功率逐渐下降。如果光纤太长, 当泵浦功率下降到泵浦阈值以下时, 部分光纤处于低于阈值功率的泵浦, 这不但不会造成该部分Yb³⁺光纤的反转粒子数分布, 反而吸收信号光; 如果光纤太短, 对泵浦光吸收就会较少, 降低了泵浦光的利用率。因此要根据实验条件选择合适的泵浦功率与光纤长度。从图3还可以看出, 当泵浦功率增加时, 最佳的光纤长度也会随之增加。

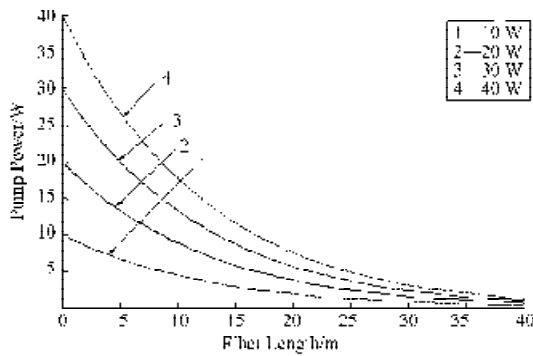
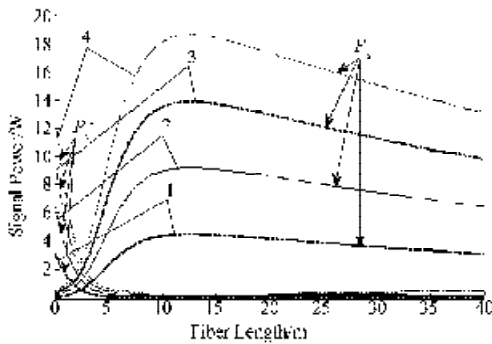


图3 泵浦功率随光纤长度的变化

Fig. 3 Pump power under different fiber length

将信号光功率 $P_s^+(0,t) = 0.5 \text{ W}$ 作为输入信号, 对基于图1放大器的模型进行计算机仿真。图4为泵浦功率分别为10, 20, 30, 40 W时, 信号功率随光纤长度的变化图。随着泵浦功率的增加, 前向的信号功率也随着增加, 而反向的信号功率会随之减小。由图4还可观察到, 泵浦功率越高, 由弱反馈引起后向信号输出功率越大, 即后向放大的脉冲信号对上能级粒子消耗加大, 同时因放大器的增益饱和效应, 正向的输出信号功率随光纤长度增加而降低。图4在泵浦功率分别为20, 30, 40 W的情况下出现了正向输出功率明显降低的情况, 且泵浦功率越高, 降低的幅度越大。



1— $P_p=10 \text{ W}$; 2— $P_p=20 \text{ W}$; 3— $P_p=30 \text{ W}$; 4— $P_p=40 \text{ W}$

图4 前、后向信号功率随光纤长度的变化图

Fig. 4 Forward and backward signals power under different fiber length

3 结语

对全光纤脉冲掺镱放大器的输出特性进行了数值模拟。当波长为915 nm的时候, 靠近光纤的泵浦输入端, 由于后向ASE输出功率远大于前向ASE输出功率, 因此消耗了大量的上能级粒子, 随着前后ASE输出功率的动态平衡, 储存的上能级粒子数达到最大值; 当前向ASE输出功率继续增加时, 对上能级粒子的消耗又进一步加剧, 上能级粒子数呈指数衰减。因此, 上能级粒子数的分布呈现出中间高两端低的特性。研究

结果还显示: 在不同的泵浦功率作用下, 光纤的最佳长度会随着泵浦功率的增加而增加; 在弱反馈存在的条件下, 放大器增益饱和之后, 正向的信号输出功率会随着泵浦功率的增加而减低。

参考文献:

- [1] Taverner D, Richardson D J, Dong L, et al. 158-mJ Pulses From a Single-Transverse-Mode, Large-Mode-Area Erbium-Doped Fiber Amplifier[J]. Optics Letters, 1997, 22(6): 378-380.
- [2] Matos C J S, Taylor J R. Multi-Kilowatt, All-Fiber Integrated Chirped-Pulse Amplification System Yielding $40 \times$ Pulse Compression Using Air-Core Fiber and Conventional Erbium-Doped Fiber Amplifier[J]. Optics Express, 2004, 12(3): 405-409.
- [3] Dupriez P, Piper A, Malinowski A, et al. 321 W Average Power, 1 GHz, 20 ps, 1060 nm Pulsed Fiber MOPA Source [C]// Optical Fiber Communication Conference (OFC). California: Postdeadline Session, 2005: 3.
- [4] Dupriez P, Piper A, Malinowski J k, et al. High Average Power, High Repetition Rate, Picosecond Pulsed Fiber Master Oscillator Power Amplifier Source Seeded by a Gain-Switched Laser Diode at 1 060 nm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(9): 1013-1015.
- [5] Christophe Codemard, Carl Farrell, Pascal Dupriez, et al. Millijoule, High-Peak Power, Narrow-Linewidth, Sub-Hundred Nanosecond Pulsed Fibre Master-Oscillator Power-Amplifier at 1.55 μm [J]. C. R. Physique, 2006, 7(2): 170-176.
- [6] Kennedy R E, Rulkov A B, Popov S V, et al. High-Peak-Power Femtosecond Pulse Compression with Polarization-Maintaining Ytterbiumdoped Fiber Amplification[J]. Optics Letters, 2007, 32(10): 1199-1201.
- [7] Almantas Galvanauskas, Cheng Mingyuan, Hong Kaichun, et al. High Peak Power Pulse Amplification in Large-Core Yb-Doped Fiber Amplifiers[J]. Quantum Electronics, 2007, 13(3): 559-566.
- [8] Wang Yong. Optimization of Pulse Amplification in Ytterbium-Doped Double-Clad Fiber Amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(6): 2139-2147.
- [9] 许党鹏, 李明中, 吕新杰, 等. 高功率掺镱双包层光纤放大器放大特性理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(7): 1071-1076.

Xu Dangpeng, Li Mingzhong, Lv Xinjie, et al. The Study of High-Power Yb-Doped Double-Clad Fiber Amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(7): 1071-1076.

(责任编辑: 徐海燕)