

文章编号:1004-4213(2011)05-0699-6

脉冲泵浦的掺镱光纤放大器中放大自发辐射动态变化模拟

张伟毅, 宁继平, 陈博, 白晓磊, 韩群, 周雷

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘 要:在低重复率、高能量脉冲的应用场合, 光纤放大器中采用脉冲泵浦的方式具有重要意义. 本文模拟了脉冲泵浦方式下掺镱双包层增益光纤中放大自发辐射功率的动态变化, 为优化脉冲泵浦方式提供了参考. 通过有限元分析方法求解光纤中镱离子的速率方程和各光场的功率传输方程, 模拟了正向泵浦条件下, 泵浦脉冲开始后 $0 \sim 740 \mu\text{s}$ 时间内光纤内部正向、反向放大自发辐射功率分布情况的动态变化以及光纤两端放大自发辐射输出功率随泵浦时间的变化. 模拟结果发现了光纤两端正向、反向放大自发辐射功率增长速度的差异之处, 以及光纤内部两种放大自发辐射功率分布动态演变的一些特征.

关键词:光纤放大器; 掺镱双包层光纤; 脉冲泵浦; 放大自发辐射动态变化

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114005.0699

0 引言

以掺杂稀土元素的双包层光纤为基础的激光器和放大器, 由于其结构紧凑、可靠性好等优点而得到越来越多的关注^[1]. 镱离子作为激光的激活粒子, 其吸收谱带宽、量子效率高, 因而成为高功率激光器、放大器中增益光纤的首选掺杂离子^[2]. 由于高功率、高能量激光脉冲在工业、医学、军事等方面的广泛应用^[3], 对脉冲激光器输出的脉冲信号进行放大, 进而得到比激光器直接输出脉冲更优质脉冲信号的高功率掺镱光纤放大器受到更多关注^[4-5].

目前对脉冲信号进行放大的掺杂型光纤放大器中, 泵浦源大多采用连续输出的激光二极管(Laser Diode, LD). 这种传统的泵浦方式有一个最大的缺点, 就是在两个信号脉冲之间的无信号时间里泵浦光一直存在, 导致增益光纤中放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)的过度增强甚至自激振荡的产生^[6]. 这一点在信号脉冲重复频率高的情况下不太明显, 但是在一些使用低重复率光脉冲的场合, 比如说脉冲重复率低于 1 kHz 时, ASE 光的强度会增长到无法忽视的程度^[7]. 因此, 在低重复率的高功率脉冲激光放大器中采用脉冲泵浦的方式具有重要意义.

关于脉冲泵浦方式, 有一些在调 Q 光纤激光器中使用脉冲泵浦来控制调 Q 脉冲重复率以及增强稳定性的研究^[8]. 但是在光纤放大器中采用脉冲泵浦方式的研究论文却很少, 2005 年清华大学的叶昌庚等人获得了重复频率 200 Hz 下脉冲宽度 0.83 ns, 峰值功率 167 kW 的脉冲输出^[6]; 2007 年, 德国的 Bohling 等人在重复频率 200 Hz 时获得了脉冲能量 1.4 mJ, 持续时间 1 ns 的脉冲输出^[9]; 2009 年, 上海工程技术大学的孔勇等人报导了一个采用脉冲泵浦方式的掺镱双包层光纤放大器, 种子源使用被动锁模的掺镱光纤激光器, 在脉冲重复率 100 Hz 时放大后获得了 200 W 的脉冲峰值功率和 120 ps 的脉冲宽度^[10]; 同年, 中国电子科技集团公司的黄绣江等人获得了 100 Hz 重复率, 47 dBm 峰值功率, 100 ns 持续时间的输出脉冲信号^[11].

本文从输入泵浦时刻开始模拟增益光纤中各光场的动态变化, 得到了光纤输出端正向 ASE、输入端反向 ASE 功率随时间的变化曲线以及表示不同时刻光纤中 ASE 功率分布情况的多条曲线. 发现了光纤两端正向、反向放大自发辐射功率增长速度的差异之处, 以及光纤内部两种放大自发辐射功率分布动态演变的一些特征.

第一作者: 张伟毅(1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为掺杂型光纤放大器. Email: zwy01@163.com

导师: 宁继平(1945-), 女, 教授, 主要研究方向为光纤激光器与放大器. Email: jnping@tju.edu.cn

收稿日期: 2010-11-03; 修回日期: 2011-01-04

1 理论模型

脉冲泵浦方式的掺镱双包层光纤放大器,其理论模拟使用的方程系统与普通连续泵浦方式的掺镱脉冲放大器并无不同,由描述镱离子能量状态变化的粒子速率方程与描述光纤中光场功率变化的功率传输方程组成^[12].文献中方程描述的是掺镱光纤激光器,在此基础上增加一个描述信号光的功率传输方程即得到本文模拟所用的理论模型.

镱离子属于二能级系统,描述其能量状态在两个能级间变化的方程有两个

$$N = N_1 + N_2 \quad (1)$$

$$\partial N_2 / \partial t = W_1 N_1 - W_2 N_2 - N_2 / \tau \quad (2)$$

式中数字 1 表示基态,下能级;数字 2 表示上能级. N 表示增益光纤中镱离子的掺杂浓度;带脚标的 N_1 、 N_2 则分别表示处于能级 1、2 的镱离子浓度; τ 是荧光寿命; W_1 、 W_2 表示相应能级上的镱离子受激跃迁至另一能级的概率密度,与增益介质中的光功率有关,其表达式为

$$W_1 = \frac{\Gamma_p \sigma_a(\nu_p)}{h\nu_p A} (P_p^+ + P_p^-) + \frac{\Gamma_s \sigma_a(\nu_s)}{h\nu_s A} P_s + \sum_k \frac{\Gamma_k \sigma_a(\nu_k)}{h\nu_k A} (P_k^+ + P_k^-) \quad (3)$$

$$W_2 = \frac{\Gamma_p \sigma_e(\nu_p)}{h\nu_p A} (P_p^+ + P_p^-) + \frac{\Gamma_s \sigma_e(\nu_s)}{h\nu_s A} P_s + \sum_k \frac{\Gamma_k \sigma_e(\nu_k)}{h\nu_k A} (P_k^+ + P_k^-) \quad (4)$$

式中: P 表示光纤中的各光场的功率(+/-号表征光是传播方向,以信号光的传播方向为正向); Γ 是各光场与掺杂区域的重叠因子; ν 是各光的频率;三种物理量都用不同脚标 p、s、k($k=1\sim n$) 分别表示泵浦光、信号光 and 不同波长的 n 个 ASE 光. 式中除此之外的常量还有普朗克常量 h , 纤芯截面面积 A , 镱离子对应于不同频率光的吸收、发射截面 $\sigma_a(\nu)$ 、 $\sigma_e(\nu)$. 描述光纤中光场变化的功率传输方程为

$$\pm \frac{\partial P_p^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial P_p^\pm}{\partial t} = \Gamma_p [\sigma_e(\nu_p) N_2 - \sigma_a(\nu_p) N_1] P_p^\pm \quad (5)$$

$$\pm \frac{\partial P_s^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial P_s^\pm}{\partial t} = \Gamma_s [\sigma_e(\nu_s) N_2 - \sigma_a(\nu_s) N_1] P_s^\pm \quad (6)$$

$$\pm \frac{\partial P_k^\pm}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial P_k^\pm}{\partial t} = \Gamma_k [\sigma_e(\nu_k) N_2 - \sigma_a(\nu_k) N_1] P_k^\pm + 2\sigma_e(\nu_k) N_2 h\nu_k \Delta\nu_k \quad (7)$$

式(5)和(6)分别为泵浦、信号光的传输方程,式(7)实际上是描述 n 个不同频率 ASE 光的 n 个方程. 式中: t 为时间变量; v 是光在增益光纤中的光

速,由于光纤很短,可忽略色散的影响,计算中所有波长光取相同的速度 v . 由式(5)~(7)组成的偏微分方程组无法求得解析解,因此计算过程是通过数值方法求解出从时刻 0 开始,每一时间片段后对应的各个光场在光纤中的功率并加以分析.

2 模拟结果及分析

计算中所用的虚拟掺镱放大器结构如图 1. 采用正向泵浦方式,在 $z=0$ 处输入泵浦脉冲和信号脉冲,在 $z=L$ 处得到信号输出.

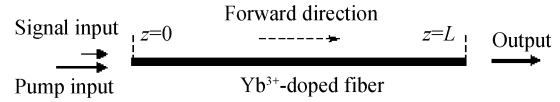


图 1 模拟的掺镱光纤放大器结构

Fig. 1 Structure of the simulated ytterbium-doped fiber amplifier

本文利用有限元法求解理论模型方程组的数值. 计算使用的是瑞典 COMSOL 公司开发的基于有限元算法的数值仿真软件 COMSOL Multiphysics, 相关常量如表 1. 表中各 λ 均为真空中的波长, c 为真空中光速,方程组中的 v 为光纤中的光速, $\nu=c/\lambda$ 则为与波长 λ 光对应的频率. 泵浦光的重叠因子 Γ_p 由纤芯截面积除以内包层截面积得来,信号光重叠因子 Γ_s 由高斯近似计算得出.

表 1 计算中使用的相关常量

Table 1 Some parameters used in calculation

Constant	Value
$c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$2.997\ 924\ 58 \times 10^8$
$h/(\text{J} \cdot \text{s})$	$6.626\ 176 \times 10^{-34}$
Γ_p	0.007 346
Γ_s	0.988 1
$r(\text{core radius})/\text{m}$	9×10^{-6}
$A(\text{core cross section area})/\text{m}^2$	$2.544\ 7 \times 10^{-10}$
$A_{\text{Cl}}(\text{inner clad cross section area})/\text{m}^2$	$3.464\ 1 \times 10^{-8}$
λ_p/nm	915
λ_s/nm	1 060
v	$c/1.5$
τ/ms	1.5
$N(\text{dope density})/\text{m}^{-3}$	3.5×10^{26}
$L(\text{fiber length})/\text{m}$	1.8

计算中对应于不同波长的镱离子吸收/发射截面数据由文献[13]得出,如图 2.

脉冲泵浦方式适用于对低重复率(<1 kHz)的脉冲信号进行放大,本文的模拟中使用方波型的泵浦脉冲. 低重复率和高功率的工作情况,决定了脉冲泵浦方式不适用于通信传输,而更多的应用在工业加工、医疗手术等. 因此在工作过程中只需采用固定形式的脉冲序列,泵浦脉冲周期与信号脉冲周期相

同,每一个泵浦脉冲末尾时输入信号脉冲,其结束后泵浦脉冲即停止,如图 3.

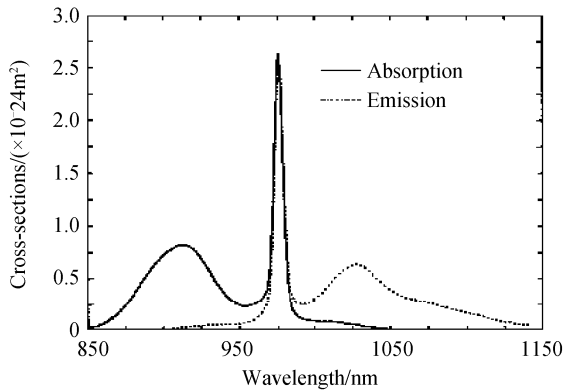


图2 模拟中使用的镱离子吸收/发射截面数据
Fig. 2 Absorption/emission cross section data of ytterbium used in the simulation

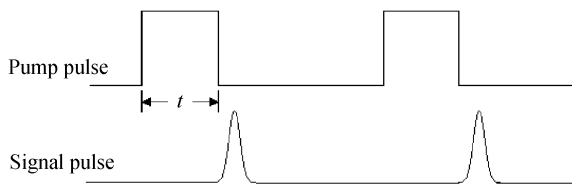


图3 泵浦脉冲与信号脉冲的时间位置
Fig. 3 Time locations of pump pulses and signal pulses

从脉冲放大结束到下一个脉冲到来之前,增益光纤会很长时间处于无光状态,在这段时间之后光纤中的激活粒子基本都回归基态.因此对脉冲泵浦放大方式的模拟研究只需取一个泵浦脉冲时间内的状态及其后的信号脉冲放大过程进行分析即可,而且数值计算选取的初始状态也为零态,即以图 3 所示第一个泵浦脉冲的前沿为计时起点,在时间 $t=0$ 时,光纤中所有光场功率为 0,镱离子全部处于基态.

本文模拟过程从时刻 $t=0$ 开始,到泵浦时间 $t=740 \mu\text{s}$ 时,发现光纤中的光场分布已经接近连续泵浦时(图 4)的分布情况,时间再往后的光场分布已属于连续泵浦的状态,无分析必要.因此本文选取

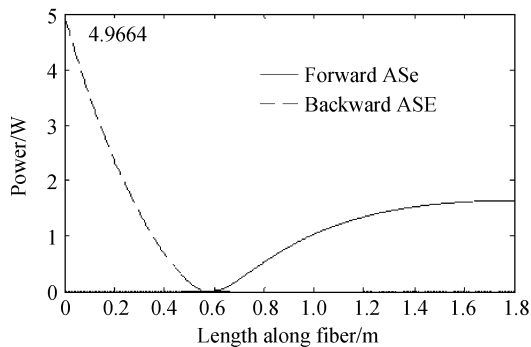


图4 连续泵浦状态下光纤中的正向/反向 ASE 功率分布
Fig. 4 Forward/backward ASE powers distribution along the fiber with continued pump situation

的分析时间段为 $0 \sim 740 \mu\text{s}$,对这一过程中增益光纤里 ASE 的动态变化进行分析.

模拟中,在泵浦脉冲持续时间内对光纤输入功率为 10 W 的正向泵浦光.计算选取的泵浦持续时间为 $0 \sim 740 \mu\text{s}$,以 $10 \mu\text{s}$ 为间隔,记录每个时刻增益光纤输出端的正向 ASE 总功率值和输入端的反向 ASE 总功率值,画出曲线如图 5.其中实线为正向 ASE 功率随时间的变化曲线,虚线为反向 ASE 功率的变化.从图中的曲线可以看出,随着泵浦的输入,在输入端的反向 ASE 功率增长较快,波动也比较强烈.图 4 为连续泵浦达到稳态时的 ASE 功率情况,与之比较可知,输入泵浦之后的 $200 \mu\text{s}$ 左右,反向 ASE 功率开始迅速上升, $350 \mu\text{s}$ 左右基本达到稳态的水平;而输出端的正向 ASE 功率则在 $300 \mu\text{s}$ 之后才有比较明显上升,增加的程度也比较平缓,直到 $700 \mu\text{s}$ 之后才接近稳态的水平.

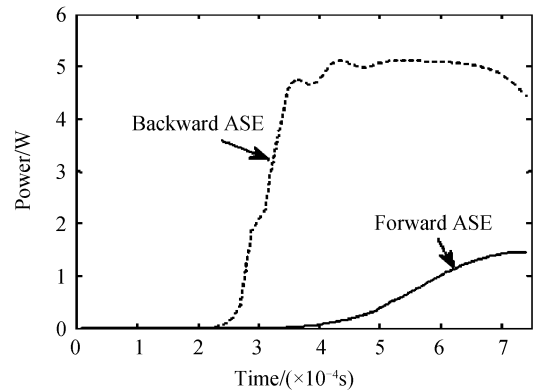


图5 正向和反向 ASE 功率随时间的变化
Fig. 5 Variation of forward and backward ASE powers versus time

为了分析在以上过程中光纤中 ASE 光场的变化情况,在时间 $0 \sim 700 \mu\text{s}$ 的数据中以 $100 \mu\text{s}$ 为间隔提取 7 个时刻光纤中 ASE 功率沿光纤长度的分布情况.画出曲线图如图 6.两个小图的 x 轴表示沿光纤的长度方向,增益光纤总长为 1.8 m,向右为正向, x 坐标为 0 处为输入位置; y 轴表示功率大小.

图 6 中(a)是光纤中正向 ASE 功率分布的变化情况,(b)是反向 ASE 功率的变化. $100 \mu\text{s}$ 和 $200 \mu\text{s}$ 时的 ASE 功率太小,在图中显示不出来,两图中能见的 5 条曲线由低到高分别是 $300 \sim 700 \mu\text{s}$ 这 5 个时刻光纤中正向、反向 ASE 功率的分布情况.图 6(a)中曲线的变化情况有两个特点,一是随泵浦时间增加曲线最大值增加,二是曲线最大值位置沿光纤往输出端移动;图 6(b)中曲线变化比较简单,基本上就是随时间的增加而增大.形成这种现象的原因应该是泵浦方向的影响.

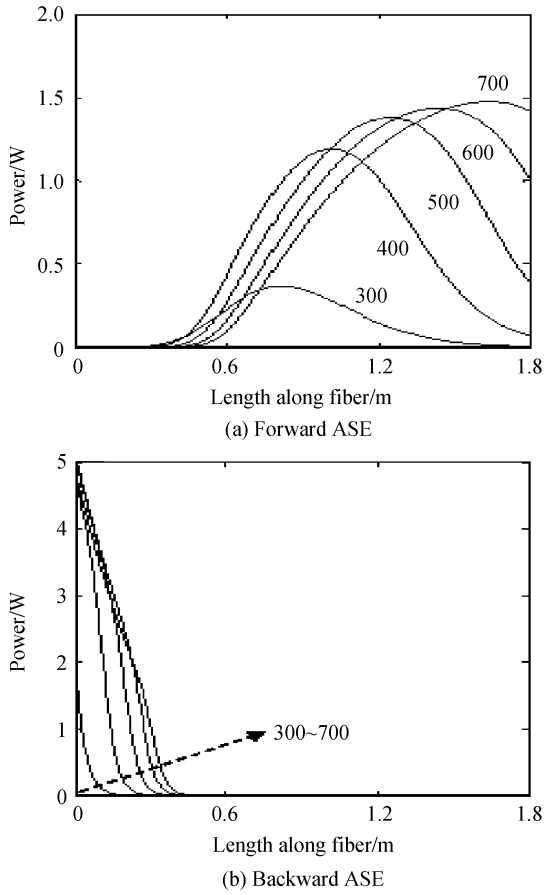


图6 光纤中 ASE 功率分布的变化
Fig. 6 ASE powers distributions along the fiber at different times from 0~700 μs

正向泵浦方式时, 光纤中泵浦光功率沿光纤方向递减, 如图 7. 图中的 7 条曲线位置都很接近, 分别为时刻 100 ~ 700 μs 的泵浦光分布. 基本的变化情况是随时间的增加, 泵浦功率分布曲线整体会有轻微的减小, 如图中箭头所示方向变化. 由于各个时刻的分布情况变化太小, 因此不必特别分析其差别. 从泵浦功率分布曲线的共同特征上来看, 泵浦光功率越小, 上能级离子数的增加就越慢, 因此靠近光纤末端的上能级粒子数需要更长时间才能达到放大

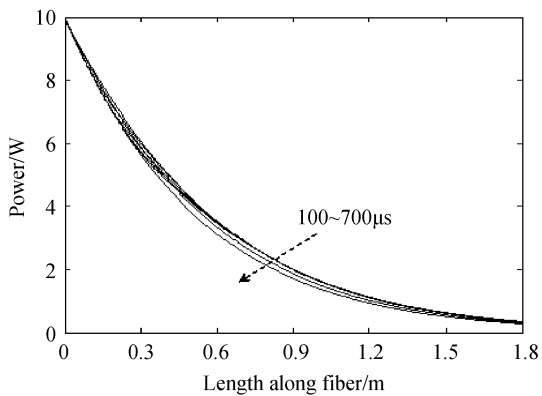


图7 泵浦光在光纤中的分布(100~700 μs 的 7 条曲线)
Fig. 7 Pump light power distribution curves in the fiber at different times(7 curves of 100~700 μs)

的要求, 这就导致了图 6(a) 中正向 ASE 光最大值随时间右移的现象, 而图 6(b) 中反向 ASE 功率则只是简单的增大.

观察图 6 中两个图曲线的变化, 可以发现一个相似之处, 即 300 μs 到 400 μs 之间正向和反向 ASE 功率曲线的最大值都增加最快. 在图 4 中, 两种 ASE 功率随时间的变化曲线体现不出来这个共同点. 结合图 4 和图 6 分析可知, 正向 ASE 光功率在光纤中分布情况随时间的变化比较复杂, 虽然其最大值在输入泵浦后的 400 μs 即接近了稳定时的最高水平, 但是在输出端的功率却仍然很小, 直到曲线最大值在 700 μs 后移动到了光纤末端才显示出来; 而反向 ASE 功率由于最大值一直在光纤始端, 则直接表现出了 300~400 μs 之间快速上升的现象. 这一点很好地解释了图 4 中两曲线随时间变化的差异.

以 100 μs 为间隔, 分别在泵浦开始后的 100~700 μs 输入信号进行模拟计算. 由于脉冲泵浦方式的应用场合是低重复率脉冲的放大, 脉冲序列中每个周期脉冲的放大都是从增益光纤的零态开始, 因此模拟中只针对一个脉冲的放大情况进行分析. 模拟输入的信号脉冲为持续时间 10 ns, 峰值功率 0.1 W 的高斯脉冲. 在 100~700 μs 之间 7 个不同时间点输入脉冲进行放大后得到的输出脉冲峰值功率分别为 0.001 4、0.278、27.3、199.4、566.6、1 000、1 260 W. 如图 8 所示(坐标图中的左 Y 轴), 7 个数据在图中以空心圆点标出, 可以通过曲线看出其增长趋势.

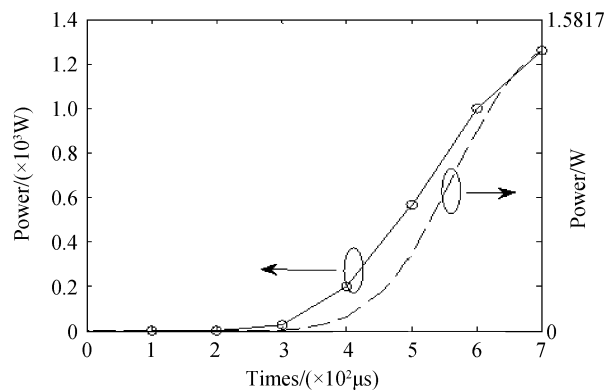


图8 不同时间处信号脉冲放大效果与 ASE 功率的比较
Fig. 8 Comparison of signal amplification with ASE power at different times

图 8 中虚线是 0~700 μs 时间内, 在输出端得到的正向 ASE 功率变化曲线(其 Y 轴为图中右 Y 轴). 通过调整坐标轴, 使 700 μs 处的正向 ASE 功率数据点与信号脉冲峰值的数据点重合, 以便于比较两条数据曲线的变化趋势. 从图中可以很明显地看出: 随着泵浦的持续, 信号脉冲的放大效果首先出

现比较明显的增长,而在其先出现增长的一段时间内,正向 ASE 输出功率的增长并不明显(比如 500 μs 以前).过了某时间点后,正向 ASE 功率迅速增大,而脉冲信号功率的增长则开始减缓;从图中看,这种情况应该是在 500~600 μs 之间.再往后,ASE 功率在相对增长上已经超过了信号脉冲功率.因此经过综合分析可以认定,以本文模拟中使用的放大器为例,脉冲泵浦方式下选定泵浦脉冲持续时间在 500~600 μs 之间,是一个比较优化的选择,能在得到良好信号放大效果的同时使 ASE 功率控制在较低的水平.

综上所述,脉冲泵浦方式在低重复率脉冲放大的工作场合,对于光纤中的 ASE 现象可以有比较好的抑制效果.而从光纤中非线性效应的角度考虑,脉冲泵浦方式中的泵浦时间一般在数百微秒的量级,属于长脉冲,而且泵浦时间内的泵浦功率与连续泵浦相比也并无增加,因此不必担心采用脉冲泵浦方式会增加光纤中的非线性效应.

3 结论

本文从输入泵浦时刻开始模拟增益光纤中各光场的动态变化,得到了光纤输出端正向 ASE、输入端反向 ASE 功率随时间的变化曲线以及表示不同时刻光纤中 ASE 功率分布情况的多条曲线.以采用文中参量的放大器为例,发现了增益光纤两端正向、反向 ASE 光功率增长规律的差异,进而通过分析两种 ASE 光在光纤中分布情况的动态变化,找到两种 ASE 光表现出这种差异的原因,以及在 300~400 μs 之间两种光都快速增大的内在共同点.从中分析出正向、反向 ASE 功率变化规律及其产生的原因,最后通过对不同时刻脉冲放大的模拟找到了一种对泵浦脉冲进行优化的基本方法.有关结论对脉冲泵浦的掺镱光纤放大器优化具有重要意义.

参考文献

[1] ZHAO Hong-ming, LOU Qi-hong, ZHOU Jun, *et al.* Recent progress of Q-switched double-clad fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 42-46.

- 赵宏明,楼祺洪,周军,等.调 Q 双包层光纤激光器研究新进展[J].*激光与光电子学进展*, 2006, **43**(9):42-46.
- [2] PASK H M, CARMAN R J, HANNA DC, *et al.* Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1~1.2 μm region[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, **1**(1): 2-13.
- [3] PIPER A, MALINOWSKI A, FURUSAWA K, *et al.* 1.2 mJ, 37 ns single-mode pulses at 10 kHz repetition rate from a Q-switched ytterbium fiber laser[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2004, Paper CMK3.
- [4] KONG Ling-feng, LOU Qi-hong, ZHOU Jun, *et al.* Power amplifier for 1 064 nm using Yb³⁺-doped double-clad fiber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, **2**(2): 98-99.
- [5] HUANG Jing, LÜ Xin-jie, LI Feng, *et al.* Simulation characteristics of Yb³⁺-doped double-clad fiber amplifier for 1 053 nm pulse amplification[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(8): 1022-1026.
- 黄晶,吕新杰,李锋,等.1 053 nm 掺 Yb³⁺ 双包层光纤放大器脉冲放大特性研究[J].*中国激光*, 2005, **32**(8):1022-1026.
- [6] YE Chang-geng, YAN Ping, GONG Ma-li, *et al.* Pulsed pumped Yb-doped fiber amplifier at low repetition rate[J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, **3**(5): 249-250.
- [7] RENAUD C C, OFFERHAUS H L, ALVAREZ-CHAVEZ J A, *et al.* Characteristics of Q-switched cladding-pumped ytterbium-doped fiber lasers with different high-energy fiber designs[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, **37**(2): 199-206.
- [8] HU Zhu-ling, XIE Chun-xia, LÜ Fu-yun, *et al.* Analysis the dynamics of pulse pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 329-332.
- 胡姝玲,谢春霞,吕福云,等.脉冲泵浦掺镱双包层光纤激光器的动力学研究[J].*光子学报*, 2005, **34**(3):329-332.
- [9] BOHLING C, ZIMMERMANN H, HOHMANN K, *et al.* Synchronised pulsed pumped fiber amplifiers[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2007, Paper CML1.
- [10] KONG Yong, LIU Qi-zhong, DENG Chen, *et al.* Pulsed pumped Yb³⁺-doped double-cladding fiber amplifier [J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, **56**(5): 597-600.
- [11] HUANG Xiu-jiang, GUO Bao-ling, YANG Wen-kui *et al.* Pulsed-pumped optical fiber amplifier [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**(8): 712-714.
- [12] WANG Yong, XU Chang-qing. Modeling and optimization of Q-switched double-clad fiber lasers[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(9): 2058-2071.
- [13] PASCHOTTA R, NILSSON J, TROPPEL A C, *et al.* Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(7): 1049-1056.

Simulation the ASE Dynamics in the Pulsed-pumped Ytterbium-doped Fiber Amplifiers

ZHANG Wei-yi, NING Ji-ping, CHEN Bo, BAI Xiao-lei, HAN Qun, ZHOU Lei

(Key Laboratory of Optoelectronics Information Science and Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Implementation of pulsed-pump technique to fiber amplifier is significantly useful in the situation of low repetition rate and high energy pulses operating. The Amplified Spontaneous Emission (ASE) dynamics simulation in a pulsed-pumped ytterbium-doped double-clad fiber amplifier was presented, which provides important references about optimizing the pulsed-pump mode. By solving the rate equations and light power propagation equations in fiber using the finite elements analysis method, the simulations of ASE dynamics were carried out, including evolution of forward, backward ASE power distribution in the fiber and variations of ASE output power at two ends of the fiber in the time span from $0\sim 740\ \mu\text{s}$ after injection of pump light. Through the analysis of simulation results, the difference between forward and backward ASE powers increasing speeds and characteristics of the two kinds of ASE powers distributions dynamic in fiber were indicated.

Key words: Fiber amplifier; Ytterbium-doped double-clad fiber; Pulsed-pumped; Amplified Spontaneous Emission (ASE) dynamics