

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.04.016

多程脉冲激光放大系统的建模及仿真研究

张文平, 刘丰年, 果鑫, 徐勇, 张笛

(湖南工业大学 计算机与通信学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对目前多程脉冲放大系统研究中理论研究的不足, 基于多程放大的基本原理, 从脉冲激光多程放大速率方程出发, 建立多程脉冲放大理论模型, 研究脉冲在多程放大系统中的传输特性。通过对理论模型进行仿真研究, 得到多程脉冲放大系统输出功率与泵浦功率的关系、输出单脉冲能量与脉冲的重复频率的关系。

关键词: 光纤放大器; 多程放大; 理论建模; 低重复频率; 转换效率

中图分类号: TN253

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)04-0080-05

Modeling of Multi-Pass Laser Pulse Amplification System and Simulation Research

Zhang Wenping, Liu Fengnian, Guo Xin, Xu Yong, Zhang Di

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

Abstract: In view of the lack of theoretical research of multi-pass pulse amplification system, established multi-pass pulsed amplification theoretical model based on the basic principle of multi-pass amplification and the rate equation of pulse laser multi-pass amplification, and studied the transmission characteristics of pulse in multi-pass amplifying system. Through the simulation research of the theoretical model, obtained the relation of output power and pump power and the relation of output single pulse energy and pulse repetition frequency.

Keywords: fiber amplifier; multi-pass amplification; theoretical modeling; low repetition frequency; conversion efficiency

0 引言

高功率、高能量脉冲在加工、医疗、军事、通信^[1-3]等各个领域应用越来越广泛, 为了使激光器输出极高的能量或功率, 激光器必须具有庞大的体系结构, 而体积的增加必将增加系统的噪声。因此, 仅靠激光器来实现高功率的激光输出存在诸多困难。采用光纤放大器来实现高功率的激光输出是一种理想选择。

光放大原理与功率放大、反馈放大的原理类似, 实质上都是能量转换。按其放大结构可以分为单级

放大、多级级联放大和双程放大、多程放大。其中光纤放大器的基本单元是由输入耦合器、输出分离器、增益放大级、激励源和输出级 5 部分组成。其他级联放大、双程放大和多程放大都是基于单级放大结构而构成的。其基本结构如图 1 所示。

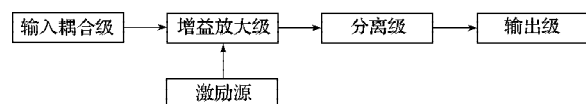


图 1 放大器基本结构图

Fig. 1 The basic structure of amplifier

收稿日期: 2013-03-25

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(11JJ3002), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2011B393)

作者简介: 张文平(1986-), 男, 湖北武汉人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为光纤通信与光纤传感,

E-mail: Zhangwenping.zt@163.com

在单程级联多级脉冲放大技术中, 输入脉冲信号多次通过同样的有源区, 在经过的时间间隔内引起了大量的自发辐射^[4-6](amplified spontaneous emission, ASE), ASE 不仅消耗了泵浦能量, 且被后面的多级放大系统继续放大, 加剧了 ASE 噪声, 使得单程放大系统的输出变得复杂。因此, 针对低重复频率的脉冲放大, 级联多级单程放大器不是最佳方案。

多程放大技术在脉冲激光放大中应用越来越广泛, 但在该领域的研究刚刚起步, 理论研究不足。2005 年 Akira Shirakaw 等在大模面积钕共掺光子晶体光纤中, 通过偏振控制实现多通道放大, 得到了单频、单偏振 350 mW 的脉冲输出, 由于光子晶体实芯的后向反馈损耗, 使得该研究的光-光转换效率仅为 5% 左右。多程脉冲放大的基本理论研究不足, 还存在增益光纤长度和掺杂浓度的优化、结构简化等问题, 需进一步研究。

大多数已有的研究成果都是对稳态情况下建模和仿真与分析^[10-11], 对动态情况也有相应的研究, 但还不是非常广泛。特别是在多程脉冲放大建模和方针方面很少见, 而且理论研究也不是很充分, 随着高功率、高峰值的脉冲应用越来越广泛, 迫切地需要能产生低噪声、高能量、峰值功率的脉冲放大器。基于这个需求, 本文对已有的单程脉冲放大的动态理论模型进行分析, 研究多程放大的基础理论和动态模型, 考虑合适的边界条件, 建立多程脉冲放大的理论模型, 然后对所建立的模型进行仿真, 并在稳态模型的基础上进行动态模型的理论及仿真研究。

文章主要的工作包括: 多程脉冲放大系统输出功率与掺杂浓度的关系、输出增益与光纤长度的关系。此项研究可以为实际构建多程脉冲放大系统提供理论依据, 本文的创新之处就是研究构建多程脉冲放大模型, 因此此研究在光通信、光纤传感、激光武器和工业加工等应用领域具有较深远意义。

1 多程脉冲放大系统结构模型

基于脉冲光纤放大的基础理论, 采用光纤环路器的单向输出特性将输入信号和输出信号有效隔离。并利用 3 dB 光纤环境的高反特性使脉冲信号在增益介质中往返穿过增益介质有源区, 构建多程脉冲放大系统结构如图 2 所示。

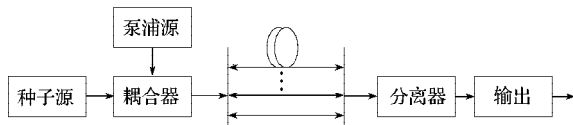


图 2 多程脉冲激光放大系统结构模型

Fig. 2 Structural model of multi-pass pulse amplification system

以下为了讨论的方便, 假设放大程数为四程时, 基于上面的多程脉冲放大的结构模型, 按照图 1 所示的模型结构建立四程脉冲放大的结构模型, 其结构模型如图 3 所示。

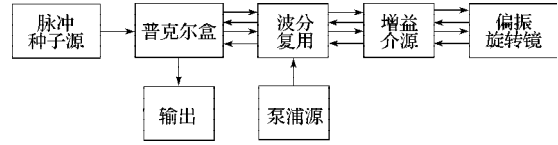


图 3 四程脉冲激光放大的结构模型

Fig. 3 Four-Pass pulse amplification system model

针对以上结构模型, 从粒子的速率和传输方程出发, 建立多程脉冲放大理论模型, 研究该多程模型的算法, 通过理论计算和仿真研究脉冲的输出特性, 得到系统的输出功率与脉冲的重复频率、泵浦功率之间的关系以及重复频率与转换效率的关系。

2 多程脉冲放大系统的理论模型

针对多程脉冲掺 Yb³⁺ 光纤放大器, 从 Yb³⁺ 离子能级跃迁速率方程组出发, 以双程脉冲放大器理论模型为基础, 建立多程脉冲放大系统理论模型, 研究脉冲在多程放大系统中的传输特性。在理论上, 从动态速率方程组入手, 考虑前向泵浦方式, 建立了多程脉冲放大模型的动态输出方程组如下:

$$\frac{dN_1(z,t)}{dt} = -\frac{\Gamma\lambda_{pump}}{hcA} [\sigma_a(\lambda_{pump})N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_{pump})N_2(z,t)] - P_{pump}(z,t) + \frac{N_2(z,t)}{\tau} - \frac{\Gamma}{hcA} \sum_{k=1}^4 \lambda_k [N_1(z,t)\sigma_a(\lambda_k) + N_2(z,t)\sigma_a(\lambda_k)] \cdot P_s(z,t,\lambda_k), k=1,2,3,4; \quad (1)$$

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\Gamma\lambda_{pump}}{hcA} [\sigma_a(\lambda_{pump})N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_{pump})N_2(z,t)] - P_{pump}(z,t) - \frac{N_2(z,t)}{\tau} + \frac{\Gamma}{hcA} \sum_{k=1}^4 \lambda_k [N_1(z,t)\sigma_a(\lambda_k) - N_2(z,t)\sigma_a(\lambda_k)] \cdot P_s(z,t,\lambda_k), k=1,2,3,4. \quad (2)$$

然后, 对功率传输特性和能量传输特性进行理论研究。通过边界条件的设定来考虑信号多次通过增益区, 得到多程脉冲放大器的功率和能量传输特性方程组:

$$\frac{\partial P_{pump}(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_{pump}(z,t)}{\partial t} = -\Gamma\alpha [\sigma_a(\lambda_{pump})N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_{pump})N_2(z,t)] \cdot P_{pump}(z,t) - \alpha(\lambda_{pump})P_{pump}(z,t); \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_s(z, t, \lambda_k)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial P_s(z, t, \lambda_k)}{\partial t} = \Gamma \alpha [\sigma_c(\lambda_k) N_2(z, t) - \sigma_a(\lambda) N_1(z, t)] \cdot P_s(z, t, \lambda_s) - \alpha(\lambda_k) P_s(z, t, \lambda_k) + 2\sigma_c(\lambda_k) N_2(z, t) \frac{hc^2}{\lambda_k^3} + S \alpha_n \lambda_k \cdot P_s(z, t, \lambda_k), k=1, 2, 3, 4; \quad (4)$$

以上式中: $N_2(z, t)$, $N_1(z, t)$ 分别为增益介质上和能级粒子数;

λ_k 为第 k 次放大的波长;

$P_{\text{pum}}(z, t)$ 是泵浦光的功率;

$P_s(z, t, \lambda_k)$ 表示信号光功率;

h 为普朗克常数;

c 为真空中光速;

$\sigma_a(\lambda_{\text{pum}})$ 和 $\sigma_e(\lambda_{\text{pum}})$ 分别为泵浦光在增益介质中的吸收截面和发射截面;

v_g 是信号光、抽运光群移速度;

$\sigma_e(\lambda_s)$ 和 $\sigma_a(\lambda_s)$ 为信号光在增益介质中的发射截面和吸收截面;

Γ 为光纤对泵浦光和激光的功率填充因子;

$\Delta\lambda$ 为信号光波长的光谱带宽;

α 是泵浦光和信号光在光纤中损耗系数;

S 是光纤纤心的捕获系数;

α_{rs} 是光的瑞利散射系数。

表 1 给出了计算中所用到的参数。

表 1 计算中所用到的参数

Table 1 The parameters used in the calculation

参 数	数 值
泵浦光吸收截面 $\sigma_a(\lambda_{\text{pum}})/\text{cm}^2$	2.3×10^{-20}
浦光发射截面 $\sigma_e(\lambda_{\text{pum}})/\text{cm}^2$	2.3×10^{-20}
信号光吸收截面 $\sigma_a(\lambda_s)/\text{cm}^2$	1.2×10^{-21}
信号光发射截面 $\sigma_e(\lambda_s)/\text{cm}^2$	1.9×10^{-19}
反射镜反射系数 R_1	0.01
反射镜反射系数 R_2	0.96
散射系数 $\alpha_{\text{rs}}/\text{cm}^{-1}$	1.9×10^{-8}
捕获系数 S	0.75
填充因子 Γ	0.85
增益介质浓度 N/cm^{-3}	5.8×10^{19}
损失系数 α/cm^{-1}	2.1×10^{-5}
吸收系数 ϕ	0.13
能级寿命 τ/ms	0.84
纤芯截面积 A/cm^2	1.6×10^{-6}
光群移速度 v_g/ms^{-1}	2.3×10^8
泵浦光波长 $\lambda_{\text{pum}}/\text{nm}$	976
信号光波长 λ_s/nm	1 053

3 仿真结果与分析

以下结合多程脉冲光纤放大基础理论 (在此只考虑四程放大所需要的边界条件), 对四程脉冲放大

系统理论模型进行仿真。

镱离子浓度会影响放大器的输出功率、增益的大小, 镱离子具有很宽的吸收带宽, 而且镱离子有更大的吸收截面和更大的吸收带宽 (800 ~ 1 100 nm), 显然镱离子的浓度对光纤放大器增益特性有明显的影响, 所以, 要提高单位长度上的增益, 应选择合适浓度的镱离子的掺杂浓度, 过大或过小都会影响放大系统的输出特性。因此, 为了确定镱离子浓度与放大器输出功率的关系, 在本仿真模型中通过改变镱离子浓度, 得到镱离子浓度与放大器输出功率之间的关系如图 4 所示。

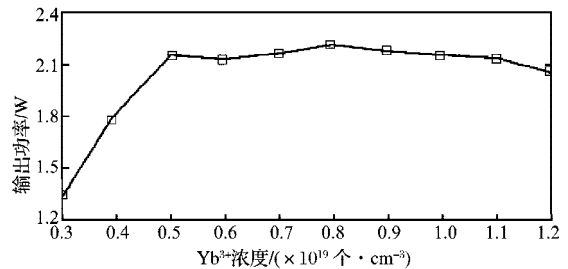


图 4 输出功率和 Yb^{3+} 浓度的关系

Fig. 4 The relationship between the output power and Yb^{3+} concentrations

在掺杂浓度和泵浦功率一定的情况下, 光纤长度的改变对增益有很大影响。如果光纤的长度增加, 在脉冲泵浦光激励的情况下, 当连续抽运功率为 4 W、注入种子脉冲的形状为高斯形、峰值功率 0.05 W、脉冲宽度 25 ns、光谱带宽 $\Delta\lambda$ 为 1.8 nm 时, 通过计算机数值模拟仿真, 可以得到光纤长度的变化对增益和泵浦功率分布的影响的关系, 如图 5 所示。

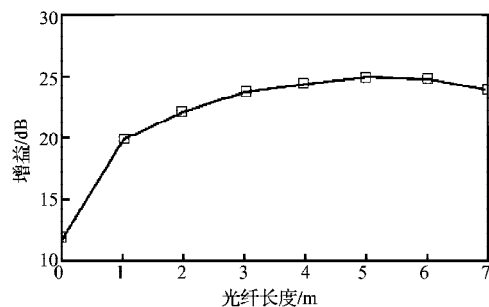


图 5 增益和光纤长度的关系

Fig. 5 The relationship between the gain and the fiber length

由图 5 可以看出, 当光纤长度变长时, 脉冲放大系统的增益会逐渐增加。这种现象的原因是在不断地对放大系统进行泵浦的情况下, 如果光纤长度变长的话, 则在整个增益介质中, 有更多的镱离子跃迁到高能级, 当信号光通过时, 可以不断地吸收上能级粒子的能量, 即相当于信号光被放大的长度增长, 系统的增益就更大。

但是当泵浦光功率一定时, 光纤越长, 增益有减小的趋势。这是因为随着光纤长度的增加, 没有足够的泵浦能量供所有的镱离子跃迁, 随着光纤长度变长, 上能级镱离子数目越来越少, 不能满足信号光吸收能量而放大, 所以信号光不能充分被放大。同时, 处在光纤后端未能充分被泵浦而发生跃迁的镱离子, 反而会吸收部分信号光的能量, 使信号光增益减小。因此在确定的泵浦功率和掺杂浓度条件下, 存在一个最佳的光纤长度, 使光纤放大器输出功率最大, 增益最大。

在不考虑自发辐射等噪声影响的条件下, 当光纤长度为 8 m、注入种子脉冲的形状为高斯形、峰值功率 0.05 W、脉冲宽度 25 ns、光谱带宽 $\Delta\lambda$ 为 1.8 nm 时。仿真得到放大器输出功率与泵浦功率之间的关系如图 6 所示。

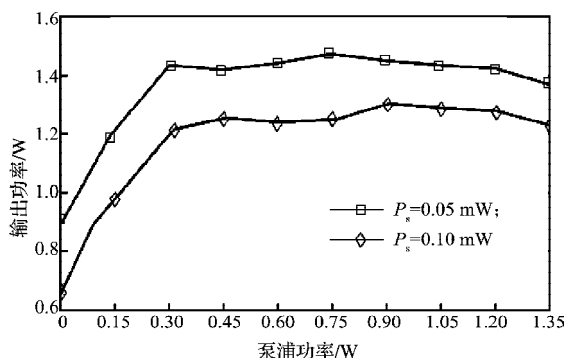


图6 输出功率和增益之间的关系

Fig. 6 The relationship between the output power and gain

由图 6 可以发现在泵浦功率达到 400 mW 之前, 放大器输出功率随着泵浦功率的增加而显著增加, 但是, 泵浦光功率不断地提升并不意味着输出功率的无限提高, 这里存在着放大器输出功率饱和性问题, 即当基态能级 (下能级) 的 Yb^{3+} 被抽运耗尽时, 更高的泵浦光功率将不能有更大的脉冲输出功率。随着泵浦光的功率不断地提高, 放大器的增益介质没有更多受激辐射跃迁到高能级的粒子, 放大器输出功率并不能无限提高, 最终必定会达到饱和。同时还可以看到, 输入信号光功率大的放大器, 其输出功率反而小, 这是因为当输入信号光功率大时, 增益介质中基态镱离子先被抽运耗尽时, 即先出现泵浦饱和现象。

在确定的掺杂浓度、光纤长度、泵浦功率条件下, 光纤放大器增益与输入信号光功率的关系比较紧密。当光纤长度为 8 m、连续抽运功率为 3 W、注入种子脉冲的形状为高斯形、峰值功率 0.05 W、脉冲宽度 25 ns、光谱带宽 $\Delta\lambda$ 为 1.8 nm 时, 仿真得到增益随着信号光功率变化的关系如图 7 所示。

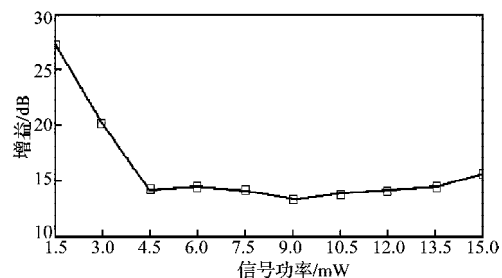


图7 信号光功率和增益之间的关系

Fig. 7 The relationship between the signal light power and gain

由图 7 可见, 光纤放大器随着输入信号光功率的增大, 掺镱的光纤很容易达到饱和, 放大器的增益先随着输入信号光功率增加而逐渐增加, 然后在一段时间内, 增益几乎维持在不变的水平, 输出增益达到饱和, 此时如果输入信号脉冲功率进一步增加, 放大系统增益逐渐减小。在确定的泵浦功率、掺杂浓度、光纤长度的条件下, 增益随着信号功率的变化而变化, 显然, 掺镱光纤放大器在大信号情况下很容易饱和。

4 结语

多程放大与双程放大或单程放大相比, 这 3 种放大结构大体上相同, 但这些结构之间又有着重要的差别。首先, 信号光在多程放大结构中由于信号光往返经过光穿过普克尔盒, 必须涉及插入技术, 而且达到最大输出功率的光纤长度要远小于双程或单程放大结构; 其次, 多程放大要比双程或单程放大最大输出功率大。所以相对于单程或双程放大来说, 多程放大具有很大的优势。如四程放大在输出为 60 mW 时光纤长度为 6 m, 但是单程放大要达到同样的输出却需要 22 m 左右的光纤。它表明能用 1/4 或者更少的光纤就能得到单程放大时信号光获得的增益。也就是说, 多程光纤放大器具有 2 个重要的优点: 1) 更加经济。只需要用很短的光纤就可以获得更高的输出; 2) 能得到更高输出功率 (增益)。

参考文献:

- [1] Yang L M, Wan P, Protopopov V, et al. 2 μm Femtosecond Fiber Laser at Low Repetition Rate and High Pulse Energy [J]. Optics Express, 2012, 20(5): 5683-5688.
- [2] Renard W, Canat G, Bourdon P. 26 NJ Picosecond Solitons From Thulium-Doped Single-Mode Master Oscillator Power Fiber Amplifier[J]. Optics Letters, 2012, 37(3): 377-379.

- [3] Xu Y F, Zhan Y, Zheng Y. Analysis of Pulse Amplification of Ytterbium-Doped Fiber Amplifiers by Means of Finite Elements[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 201-203.
- [4] Lee E S, Hahn J W. Four-Pass Amplifier for the Pulsed Amplification of a Narrow-Bandwidth Continuous-Wave Dye Laser[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(22): 1836-1838.
- [5] Zaouter Y, Papadopoulos D N, Hanna M. Stretcher-Free High Energy Nonlinear Amplification of Femtosecond Pulses in Rod-Type Fibers[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(2): 107-109.
- [6] Tanya M M, Eter D M. Self-Similar Evolution of Self-Written Waveguides[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(4): 268-270.
- [7] Kocharovskaia O A, Khanin I I. Coherent Amplification of an Ultrashort Pulse in a Three-Level Medium Without Population Inversion[J]. *Pis Ma Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, 1988, 48: 581-584.
- [8] Barty C P J, Guo T, Le Blanc C, et al. Generation of 18-Fs, Multiterawatt Pulses by Regenerative Pulse Shaping and Chirped-Pulse Amplification[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(9): 668-670.
- [9] Marcianite J R, Zuegel J D. High-Gain, Polarization-Preserving, Yb-Doped Fiber Amplifier for Low-Duty-Cycle Pulse Amplification[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(26): 6798-6804.
- [10] Wang Xude, Zhou Zheng, Li Suwen, et al. Self-Similar Pulse Evolution in Yb-Doped Fiber Amplifiers[J]. *Laser Technology*, 2006, 45(26): 6798-6804.
- [11] Hu G J, Li X G, Zhang P. Gain Performance of Er³⁺/Yb³⁺ Codoped Double-Clad Fiber Amplifier[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2012, 42(1): 240-248.

(责任编辑: 申 剑)

(上接第 45 页)

- [10] 丁智平, 王腾飞, 李明, 等. 镍基单晶合金多轴非比例加载低周疲劳单胞模型[J]. *材料研究学报*, 2011, 25(5): 455-463.
- Ding Zhiping, Wang Tengfei, Li Ming, et al. Low Cycle Fatigue Unit Cell Model for Single Crystal Nickel-Base Superalloy Under Multiaxial Non-Proportional Loading[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2011, 25(5): 455-463.
- [11] 丁智平, 李明, 王腾飞, 等. 基于单胞模型镍基单晶高温合金低周疲劳寿命的预测[J]. *机械工程材料*, 2012, 36(6): 79-85.
- Ding Zhiping, Li Ming, Wang Tengfei, et al. Low Cycle Fatigue Life Prediction for Ni-Based Single Crystal High Temperature Alloy Based on Unit Cell Model[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2012, 36(6): 79-85.
- [12] 丁智平, 刘义轮, 尹泽勇, 等. 面心立方晶体单晶材料弹塑性本构模型研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2004, 35(3): 423-428.
- Ding Zhiping, Liu Yilun, Yin Zeyong, et al. Constitutive Model for FCC Single Crystal Material[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2004, 35(3): 423-428.

(责任编辑: 邓光辉)