

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.05.015

# 双程脉冲激光放大器动态输出特性研究

刘丰年, 张文平, 文 鸿, 果 鑫, 徐 勇, 唐 伟, 张 笛

(湖南工业大学 计算机与通信学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 基于双程放大的基本原理, 构建了一个双程脉冲激光放大器的实验模型, 从脉冲激光双程放大速率方程组出发, 建立双程脉冲放大理论模型, 研究脉冲在双程放大系统中的传输特性, 得到双程脉冲放大系统放大自发辐射能量与泵浦能量之间的关系、放大自发辐射能量与信号光重复频率之间的关系以及增益与输出信号光功率的关系。最后通过计算得到该放大系统模型的品质因数  $Q$ 。

**关键词:** 双程放大; 放大自发辐射; 增益; 品质因数

中图分类号: TN253

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)05-0067-04

## Study on Dynamic Output Characteristics of the Double-Pass Pulse Laser Amplifier

Liu Fengnian, Zhang Wenping, Wen Hong, Guo Xin, Xu Yong, Tang Wei, Zhang Di

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

**Abstract:** Based on the principle of double-pass amplification, establishes a double-pass pulse amplifier experimental model. From pulse laser double-pass amplification rate equations, establishes a double-pass pulse amplification theoretical model, studies the transmission characteristics of the pulse in the double-pass amplification system, and obtains the relations between ASE (amplified spontaneous emission) and pump energy, the relations between ASE and the repeat frequency of the signal light, as well as the relations between the gain and the output signal power. Finally, the quality factor  $Q$  of the system is derived through calculating.

**Keywords:** dual-pass amplification; amplified spontaneous emission; gain; quality factor

## 0 引言

脉冲激光的应用领域越来越广泛, 不仅在生活中和科研方面的应用迅速扩大, 在军事科技、生物科技方面的应用也日益扩大。产生脉冲激光的光纤激光器和光纤放大器具有结构紧凑、稳定性好、以及良好的热光效应等优势, 所以得到了快速的发展。而且光纤放大器已经在诸多领域, 包括脉冲放大和

超短脉冲放大中表现出诱人的前景。

脉冲激光放大器产生高功率脉冲的放大结构主要有级联单程放大和双程(或多程)放大两种。第一种是级联单程放大<sup>[1-3]</sup>, 其结构原理如图1所示。

双程(或多程)放大中双程激光放大是基于偏振控制理论、环形腔行波放大及耦合模理论而产生的一种激光放大技术。其技术难点在于采用特殊措施对放大器的输入信号和输出信号进行有效隔离,

收稿日期: 2012-08-03

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: 刘丰年(1974-), 女, 湖南常德人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信与光纤传感,

E-mail: lfjx@yahoo.com.cn

使信号光两次通过有源区放大<sup>[4-9]</sup>。而多程放大主要通过多次反射，控制信号光在增益介质内穿行多次。

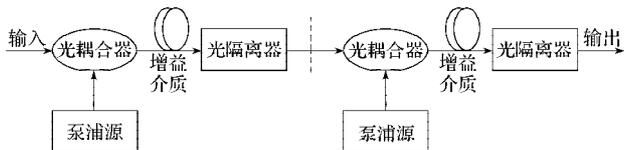


图1 级联单程脉冲放大结构原理图

Fig. 1 The structure of cascaded single-pass pulse laser amplification system

在此只针对双程放大过程进行研究，对于多程则在后续研究中开展。因此，本文基于偏振控制理论，采用偏振有关的分束器和偏振旋转反射镜，构建全光纤化的双程脉冲放大器结构。实验原理结构如图2所示。

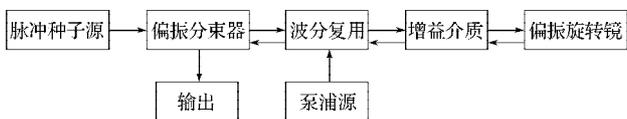


图2 双程脉冲放大实验结构原理图

Fig. 2 The experimental structure diagram of dual-pass pulse amplification system

### 1 放大器增益介质的基本理论

增益介质一般至少有3~4个能级，为了简化模型，将增益介质视为2能级结构，对该模型做如下假设：1) 任何两个stark能级之间的非辐射转换率比自发辐射率要高；2) 泵浦能级与上能级之间的转换率比自发辐射率和两个通道之间的时间间隔都要快；3) 同理，在下能级，粒子的耗散速率也要比自发辐射率和放大过程的两个通道之间的时间间隔都要快。

阐述了能级间粒子跃迁和放大的相关理论后，根据速率传输方程和功率传输方程，推算系统模型的输出的自发辐射（amplified spontaneous emission, ASE）能量与泵浦能量之间的关系、系统模型的输出的自发辐射能量ASE与信号光重复频率之间的关系、双程脉冲放大系统增益与输出信号光功率的关系，并得到系统模型的品质因数Q。

### 2 放大系统的理论模型

在理论上，从动态速率方程入手，建立双程脉冲放大理论模型。模型建立过程分两步：第一步，对上能级粒子数密度动态特性进行建模。以单程放大模型系统为基础进行修正；第二步，对功率传输特性和能量传输特性进行建模。通过边界条件的设定来考虑信号两次通过增益区，即得到双程放大器的功率和能量传输特性方程组。建模结果如下：

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a(\lambda_p)N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p)N_2(z,t)] \cdot p_p(z,t) - \frac{N_2(z,t)}{\tau} + \frac{\Gamma}{hcA} \sum_{k=1}^K \lambda_k [N_1(z,t)\sigma_a(\lambda_k) - N_2(z,t)\sigma_a(\lambda_k)] \cdot p_p(z,t, \lambda_k), K=1,2; \quad (1)$$

$$\frac{\partial p_p(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial p_p(z,t)}{\partial t} = -\Gamma_p [\sigma_a(\lambda_p)N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p)N_2(z,t)] \cdot p_p(z,t) - \alpha(\lambda_p)p_p(z,t); \quad (2)$$

$$\frac{\partial p_s(z,t, \lambda_k)}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial p_s(z,t, \lambda_k)}{\partial t} = \Gamma [\sigma_e(\lambda_k)N_2(z,t) - \sigma_a(\lambda)N_1(z,t)] \cdot p_p(z,t, \lambda_s) - \alpha(\lambda_k)p_p(z,t, \lambda_k) + 2\sigma_e(\lambda_k)N_2(z,t) \frac{hc^2}{\lambda_k^3} + S\alpha \lambda_k \cdot p_p(z,t, \lambda_k), K=1,2; \quad (3)$$

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

方程(2)和(3)满足下面的边界条件：

$$p_s^-(L) = R_2 p_s^+(L), \quad (5)$$

其中偏振旋转镜反射系数设为0.95。

从而由方程(2)和(3)可以得到如下关系式：

$$\begin{cases} p_s^+(L) = p_s^+(0) + G(L) - Q_{ASE}, \\ p_s^+(2L) = p_s^+(L) + G(L) - Q_{ASE}. \end{cases} \quad (6)$$

式(1)~(6)中： $N_2, N_1$ 分别为增益介质中上、下能级粒子数； $h$ 为普朗克常数； $c$ 为真空中光速； $\sigma_a$ 和 $\sigma_e$ 分别为增益介质离子吸收截面和发射截面， $\tau$ 为增益介质离子亚稳态能级的寿命； $\lambda$ 为信号光的波长； $\Delta\lambda$ 为信号光波长的光谱带宽； $\alpha$ 是泵浦光和信号光的瑞利散射损耗因子； $\Gamma$ 光纤对泵浦光和激光的功率填充因子； $G$ 为信号光的增益； $K$ 为信号光通过增益介质的次数； $v_p$ 是信号光、抽运光群速度； $p_s$ 是信号光功率； $p_p$ 是泵浦光的功率； $S$ 是光纤纤心的捕获系数。

表1为计算中所使用的参数列表。

表1 计算中所用到的参数

Table 1 The parameters used in the calculation

参数名称	数值	参数名称	数值
泵浦光吸收截面 $\sigma_a$	$2.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$	增益介质掺杂浓度 $N$	$6.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
泵浦光发射截面 $\sigma_e$	$1.9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$	损失系数 $\alpha$	$2.3 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$
信号光发射截面 $\sigma_s$	$1.5 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$	功率填充因子 $\Gamma$	0.86
纤芯截面积 $A$	$1.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$	反射镜反射系数 $R_2$	0.95
泵浦光波长 $\lambda_p$	976 nm	信号光波长 $\lambda_s$	1 053 nm

### 4 系统模型的数值模拟

本文基于文献[6]的基本方法, 并对其方法进行改进, 考虑了输入脉冲的重复频率对自发辐射的影响以及输入信号光的平均功率对放大增益的影响, 因此对该模型的研究更具系统性和完整性。在此重点对双程结构的脉冲放大进行研究。首先在没有信号脉冲的情况下, 单独考虑系统的自发辐射, 研究系统输出的 ASE 能量与信号光的重复频率、系统的品质因数、泵浦光的能量的关系。由方程 (2) 和 (3) 可得粒子的转换速率方程如下:

$$\frac{dN_2}{dt} = P(t) \cdot N_1(t) \sigma_p Q - \frac{N_2}{\tau_1} \cdot \frac{e^{g(t)L} - 1}{g(t)L}; \quad (9)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = P(t) \cdot N_1(t) \sigma_p Q - \frac{N_2}{\tau_1} \cdot \frac{e^{g(t)L} - 1}{g(t)L} - \sum_{m=1}^2 F_2(t) m e^{g(t)L} \quad (10)$$

其中,  $F_2(t) = \frac{N_2(t)}{\tau_1} \cdot \frac{e^{g(t)L} - 1}{g(t)L} \prod_{m=1}^2 D_2$ , 且

$$\prod_{m=1}^2 D_2 = \prod_{m=1}^2 e^{g(t)L} \quad (11)$$

其中,  $m$  是 ASE 脉冲通过增益介质的次数;  $D_2$  为 ASE 脉冲两次通过增益介质的耗散系数;  $F_2(t)$  是上能级粒子两次通过增益介质的减少系数;  $\sigma_p$  是泵浦光的横截面积,  $\sigma_p = 7.6 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 。

首先, 在没有信号脉冲的情况下, 通过以上关系, 讨论泵浦光每次通过增益介质的自发辐射能量 ASE, 方程 (10) 和方程 (11) 是一个整体, 利用  $N_1(t)$  和  $F_2(t)$  分别计算最后的 ASE 能量, 如式 (12) 所示:

$$E_a = \int_0^T F_2(t) e^{g(t)L} h\omega V dt \quad (12)$$

其中:  $T$  为 ASE 脉冲两次通过增益介质的总时间;

$h\omega$  是 ASE 光子的能量;

$V$  是增益介质的体积,  $V = \Pi \omega_p^2 L$ ;

ASE 的能量函数为  $E_a$ ;

$\omega_p$  是脉冲泵浦的脉宽。

其次, 通过数值模拟和理论计算得到系统的品质因数  $Q$  的值。图 3 为在不同的泵浦能量下, 系统输出 ASE 能量与品质因数  $Q$  之间的关系, 通过数值模拟和理论计算对比, 得到放大系统的品质因数  $Q$ 。

从图 3 的数据对比可以确定系统的品质因数  $Q$  为 0.71, 根据  $Q$  值可以计算放大器的增益。下面考虑泵浦脉冲重复频率为 10 kHz, 不同的单脉冲能量下, 系

统输出的自发辐射 ASE 能量与信号光的重复频率的关系, 图 4 为两者的关系曲线。

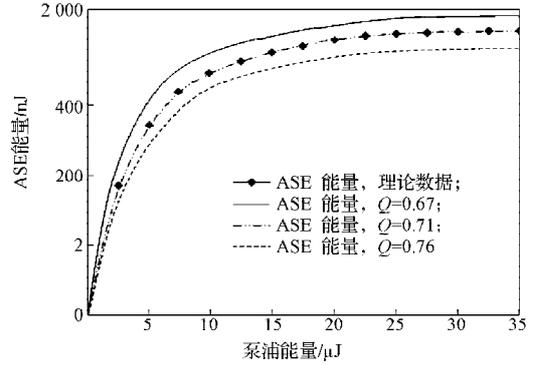


图 3 不同品质因数下, 系统输出 ASE 能量与泵浦能量之间的关系

Fig. 3 The relationship between output energy of the ASE and the pump energy with different quality factors

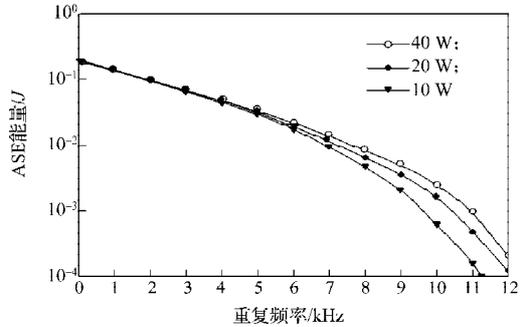


图 4 不同脉冲泵浦功率下, 系统输出 ASE 能量与信号光的重复频率的关系

Fig. 4 The relationship between output energy of the ASE and signal light repeat frequency with different pulse pump power

从图 4 中可以得出: 随着输入脉冲的重复频率增加, 增益介质内的 ASE 能量减少。这说明重复频率越高, 对上能级粒子数的攫取能力越强, 受激辐射转化为信号光光子的几率大幅增加。因此 ASE 能量减少, 在同样的泵浦条件下, 转化效率提高。综合研究多个已有实验结果可得到: 输入脉冲重复频率越高, 放大系统输出的转换效率越高<sup>[10-12]</sup>。这说明文中部分理论研究结果在已有实验研究中得到验证。

信号光通过增益介质的时间比上能级粒子的平均寿命要短, 在每次放大的过程, 上能级粒子的减少仅仅是由于辐射, 在这种条件下, 可以用 Frantz-Nodvik 方程<sup>[6]</sup>计算每次通过增益介质的增益

$$G_j = \frac{\phi_s}{\phi_j} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp\left(\frac{\phi_j}{\phi_s}\right) - 1 \right] \cdot \exp[g_j(t_j)L] \right\} \quad (13)$$

式中:  $G_j$  是第  $j$  次通过增益介质的放大系数;  $\phi_s = \frac{h\omega}{\sigma_e}$  是增益介质的能量因子;  $\phi_j$  是脉冲第  $j$  次通过增益介

质的输入能量;  $g_j$  是脉冲第  $j$  次通过增益介质的增益, 第  $j$  次通过增益介质获得的增益:  $g(t_j) = N_1(t_j)\sigma_e - N_0(t_j)\sigma_a$ , 假设信号光在  $t_m$  时刻输入增益介质。

那么总共  $j$  次通过增益介质的总时间为:  $t_j = t_m + (j-1)\Delta T$ ,  $\sigma_a$  是脉冲的吸收截面, 经过放大后上能级粒子数:  $N_1(t_j) = \frac{\phi_j(G_j - 1)}{h\omega L}$ 。 (14)

$N_1(t_j)$  作为方程 (3) 的前提条件, 由此得出粒子通过增益介质的增益, 循环计算该方程可得出系统模型的总增益。即信号脉冲两次通过增益介质所获得的增益:

$$G = \sum_{j=1}^2 G_j。$$

其中,  $G_1 = \frac{\phi_s}{\phi_1} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp\left(\frac{\phi_1}{\phi_s}\right) - 1 \right] \cdot \exp[g_1(t_1)L] \right\}$ , (15)

$G_2 = \frac{\phi_s}{\phi_2} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp\left(\frac{\phi_2}{\phi_s}\right) - 1 \right] \cdot \exp[g_2(t_2)L] \right\}$ 。 (16)

图 5 为泵浦功率不同的情况下, 系统模型增益与信号光输出功率之间的关系图。

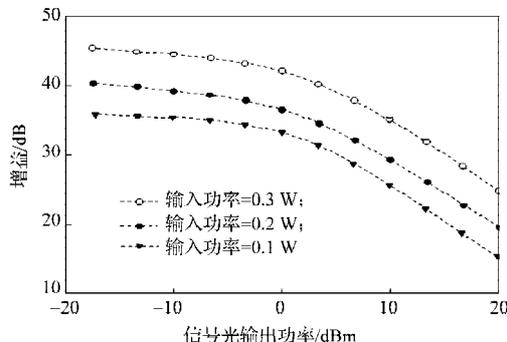


图 5 不同泵浦功率下, 系统模型的增益与信号光的输出功率之间的关系

Fig. 5 The relationship between the gain of system model and signal output power with different pump power

从图 5 中可以看出, 放大系统的增益随着信号光输出功率的增加而降低, 该结论与光放大器的增益饱和特性一致。由放大器的增益特性可知: 信号光的输出功率越高, 放大系统越接近增益饱和, 由此造成的自发辐射 (ASE) 损耗增加, 所以系统的增益降低。

## 5 结论

本文利用偏振有关的分束器输出特性和偏振旋转反射特性, 构建了一种双程脉冲激光放大系统。

基于该系统建立了双程放大系统理论模型, 从理论上分析了脉冲激光通过增益介质放大的输出特性, 确定了系统模型的品质因数  $Q$ 。数值模拟结果表明: 随着输入脉冲的重复频率增加, 增益介质内的 ASE 能量减少, 这说明重复频率越高, 对上能级粒子数的攫取能力越强, 受激辐射转化为信号光光子的几率大幅增加。该结论与已有研究<sup>[10-12]</sup>结论相吻合。并且放大器达到增益饱和后, 增益随着信号光输出功率的增加而减少。这与放大器理论是一致的<sup>[7]</sup>。因实验条件和平台有限, 针对该系统的实验研究以及对理论结果的进一步验证, 需要在后续工作中继续开展。

## 参考文献:

- [1] Brooks C D, Teodoro F D. Multimegawatt Peak-Power, Single-Transverse-Mode Operation of a 100  $\mu$ -m Core Diameter, Yb-doped Rodlike Photonic Crystal Fiber Amplifier[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(11): 111119-111121.
- [2] Wang Yong. Dynamic Characteristics of Double-Clad Fiber Amplifiers for High-Power Pulse Amplification [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(10): 2262-2270.
- [3] Marciante 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.
- [4] Brilliant N A, Beach R J. Narrow-Line Ytterbium Fiber Master-Oscillator Power Amplifier[J]. Opt. Soc. Am., 2002, 19(5): 981-991.
- [5] Hwang Yiyuh, Lee Chauhwang, Wang Jyhyng. Dynamic Model of Multipass Ultrashort-Pulse Laser Amplifiers and Its Application[J]. Applied Physics, 2002, 75: 477-479.
- [6] Teodoro F D, Brooks C D. 1.1 MW Peak-Power, 7 W Average-Power, High-Spectral-Brightness, Diffraction-Limited Pulses from a Photonic Crystal Fiber Amplifier[J]. Optics Letters, 2005, 30 (20): 2694-2696.
- [7] 金艳丽. L波段掺铒光纤放大器增益控制技术[D].天津: 南开大学, 2007.  
Jin Yanli. Study on Bium-Doped Fiber Amplifier Gain Control Technology[D]. Tianjing: Nankai University, 2007.
- [8] 安 伟. 1 053 nm 掺 Yb 光纤放大器脉冲放大实验研究[J]. 量子电子学报, 2002, 9(3): 254-257.  
An Wei, 1053 nm Yb-Doped Fiber Amplifier Pulse Amplification Experimental Study[J]. Journal of Quantum Electronics, 2002, 9(3): 254-257.

(下转第 108 页)