

# 高功率激光通过多程放大系统传输特性的计算模拟\*

张 彬 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 从 Frantz-Nodvik 方程出发, 采用脉冲分割和介质薄片损耗模型, 详细研究在不同的注入脉冲能量密度、放大器的增益恢复系数、增益分布、程间损耗和光束口径放大倍数的情况下, 激光脉冲通过多程脉冲放大系统的传输特性。

关键词: 多程脉冲放大系统 脉冲分割和介质薄片损耗模型 传输特性

## Numerical simulations of high-power laser beams passing through a multipass amplifier

Zhang Bin, L Baida

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

**Abstract:** Starting from Frantz-Nodvik equation and using the pulse-sequence and thin-slab-medium models, the propagation properties of laser beams passing through a pulsed-laser multipass amplifier with different initial pulse fluences, the recovery parameters, gain distributions, losses and beam expanding factors between passes have been studied in detail.

**Key words:** pulsed-laser multipass amplifier pulse-sequence and thin-slab-medium models propagation properties

### 引 言

由于多程激光放大系统能够有效地提高系统效率, 降低系统造价, 所以多程放大技术被广泛运用于强激光系统设计中(例如新一代 ICF 驱动器中的放大系统)<sup>[1,2]</sup>。脉宽为毫微秒和亚毫微秒量级的高功率激光在多程脉冲激光放大系统中传输时, 注入激光脉冲能量密度、放大器增益恢复系数、增益分布和程间损耗将直接影响激光脉冲的传输特性, 因此, 详细研究在不同的注入脉冲能量密度、放大器增益恢复系数、增益分布和程间损耗的情况下, 激光通过多程脉冲放大系统的传输特性是十分必要的, 以下将对此作较为详细的计算分析。

### 一、计 算 模 型

从 Frantz-Nodvik 方程出发, 在集中损耗近似下, 描述多程放大第  $k+1$  程的能量密度和增益的表达式为<sup>[3]</sup>

$$E_{k+1} = TE_s \ln \{ G_k [ \exp(E_k/E_s) - 1 ] + 1 \} \quad (1)$$

$$G_{k+1} = G_k \exp[-p(E_{k+1}/T - E_k)/E_s] \quad (2)$$

式中,  $E_s$  为饱和能量密度,  $T$  为损耗因子,  $p$  为恢复系数, 它描述多程放大器的驰豫效应和脉冲时间间隔对增益的影响。通常,  $1/2 \leq p \leq 1$ , 当  $p = 1$  时, 放大器增益完全没有恢复, 当  $p =$

\* 国家高技术青年科学基金和国家高技术惯性约束聚变主题青年基金项目资助。

1/2 时, 放大器增益完全恢复。将(1)式代入(2)式可得

$$G_{k+1} = [G_k \exp(p E_k / E_s)] / \{1 + G_k [\exp(E_k / E_s) - 1]\}^p \tag{3}$$

### 1. 脉冲分割模型

在分析激光脉冲通过放大介质的传输特性时, 可采用多程放大器的公式(1)和(3)进行计算, 计算时可将激光脉冲分割成  $m$  个子脉冲, 子脉冲的脉宽为

$$\delta = D / m \tag{4}$$

式中, 计算时间  $D$  应大于  $2\tau$  ( $2\tau$  为脉宽)。值得注意的是, 由于子脉冲间隔为零, 描述放大器增益恢复情况的参数  $p = 1$ , 即增益完全未恢复。

利用脉冲分割模型, 放大系统输入和输出脉冲能量密度可表示为

$$E_{in}(r, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{in}(r, 0, t) dt = \sum_{l=-m/2}^{m/2} I_{in}(r, 0) I_{in}(l\delta) \delta = \sum_{l=-m/2}^{m/2} E_{in}^l(r, 0) \tag{5}$$

$$E_{out}(r, z) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{out}(r, z, t) dt = \sum_{l=-m/2}^{m/2} I_{out}(r, z) I_{out}(l\delta) \delta = \sum_{l=-m/2}^{m/2} E_{out}^l(r, z) \tag{6}$$

式中,  $E_{in}^l(r, 0)$ ,  $E_{out}^l(r, z)$  分别为第  $l$  个子脉冲所对应的输入和输出能量密度。

### 2. 介质薄片损耗模型

薄片损耗模型是将放大介质分成许多等厚的薄片, 每一薄片均存在损耗和增益分布, 并将整个放大介质视为许多薄片介质的串接。假设整个放大介质的长度为  $L$ , 若分成  $n$  个薄片, 激光脉冲通过第  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) 片放大介质放大后的能量密度为

$$E_{out}[r, z = (il)/n] = T_i E_s \ln\{G_i [\tau, z = (il)/n] e^{E_{in}(x, y, (i-1)L)/E_s - 1} + 1\} \tag{7}$$

式中,  $T_i = \exp(-\alpha L/n)$  为第  $i$  片介质的损耗,  $G_i = \exp \int_{[(i-1)L]/n}^{il/n} g_0(r, z) dz$  为第  $i$  片介质的小信号增益,  $\alpha$  为损耗系数,  $g_0(r, z)$  为位置  $(r, z)$  处的小信号增益系数。

利用上述计算模型和公式(1)和(3)可分别对激光脉冲经过放大系统的传输及放大系统的逆问题进行数值计算<sup>[4,5]</sup>。在对多程放大系统进行数值计算时还应计及多程放大系统的程间损耗  $T'$  以及程间光束口径放大倍数  $M$ 。

## 二、数值计算

采用上述计算模型以及公式(1)和(3)对双程放大系统进行数值计算, 典型计算例示于图 1~ 4。图 1 给出不同增益恢复系数情况下,  $r = 0$  处的输入和输出脉冲时间波形。图 2 给出不同程间损耗情况下,  $r = 0$  处的输入和输出脉冲时间波形。图 3 给出不同程间光束口径放大倍数情况下,  $r = 0$  处的输入和输出脉冲时间波形。图 4 给出不同增益分布情况下的输入和输出脉冲能量密度分布。

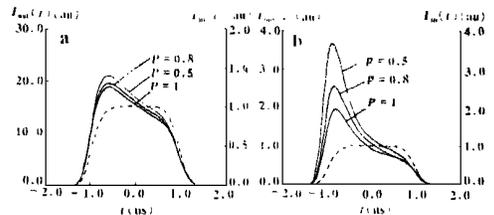


Fig. 1 The initial and output temporal pulse profiles at  $r = 0$  of a 2-pass amplifier with different recovery parameters:  $g_0(r) = 0.06 \text{ dB/cm}$ ,  $E_s = 2.7 \text{ J/cm}^2$ ,  $L = 36 \text{ cm}$ ,  $\alpha = 0.4\% \text{ cm}^{-1}$ ,  $2\tau = 2 \text{ ns}$ ,  $T' = 0.8$ ,  $M = 1.5$ , (a)  $E_{in}|_{r=0} = 0.1 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $E_{in}|_{r=0} = 3 \text{ J/cm}^2$   
—— output temporal pulse profile  $I_{out}(t)$  at  $r = 0$     - - - - initial temporal pulse profile  $I_{in}(t)$  at  $r = 0$

分析图 1~ 3 可知, 激光脉冲经多程放大系统后, 由于输入脉冲时间波形的前沿消耗的反转粒子数比其后沿多, 其输出脉冲波形前沿变得更陡而后沿更缓, 且注入能量密度越大, 增益

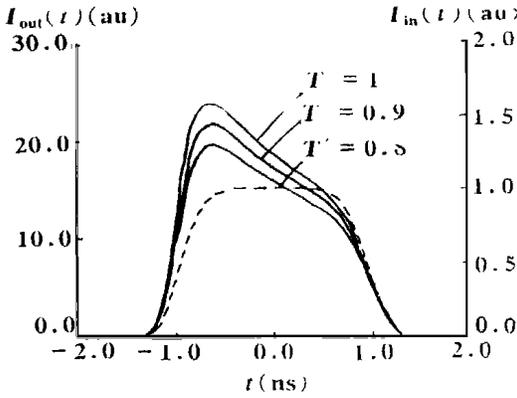


Fig. 2 The initial and output temporal pulse profiles at  $r = 0$  of a 2-pass amplifier with different loss factors between passes:  $g_0(r) = 0.06\text{dB/cm}$ ,  $E_s = 2.7\text{J/cm}^2$ ,  $L = 36\text{cm}$ ,  $\alpha = 0.4\% \text{cm}^{-1}$ ,  $2\tau = 2\text{ns}$ ,  $p = 0.8$ ,  $M = 1.5$ ,  $E_{\text{in}}|_{r=0} = 0.1\text{J/cm}$   
 ———— output temporal pulse profile  $I_{\text{out}}(t)$  at  $r = 0$   
 ..... initial temporal pulse profile  $I_{\text{in}}(t)$  at  $r = 0$

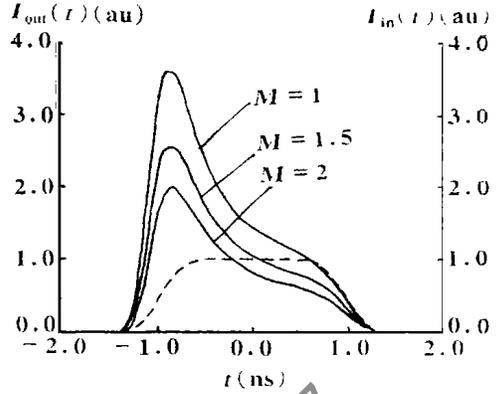


Fig. 3 The initial and output temporal pulse profiles at  $r = 0$  of a 2-pass amplifier with different the beam expanding factors:  $g_0(r) = 0.06\text{dB/cm}$ ,  $E_s = 2.7\text{J/cm}^2$ ,  $L = 36\text{cm}$ ,  $\alpha = 0.4\% \text{cm}^{-1}$ ,  $2\tau = 2\text{ns}$ ,  $p = 0.8$ ,  $T' = 0.8$ ,  $E_{\text{in}}|_{r=0} = 3\text{J/cm}$   
 ———— output temporal pulse profile  $I_{\text{out}}(t)$  at  $r = 0$   
 ..... initial temporal pulse profile  $I_{\text{in}}(t)$  at  $r = 0$

饱和效应越明显, 脉冲波形畸变越大, 激光脉冲经多程放大系统的放大倍数越小。同时, 由图 1 可知, 激光脉冲经多程放大系统的传输特性随增益恢复系数的变化而变, 增益恢复系数越大, 由于多程放大器的弛豫效应和脉冲时间间隔的影响, 使放大介质增益恢复的情况越差, 激光脉冲经过第一程放大后, 在第二程放大中所能提取的反转粒子数越少, 因此, 放大系统的放大倍数越小。分析图 2, 图 3 可知, 激光脉冲经多程放大系统的传输特性随程间损耗和光束口径放大倍数的不同而变化较大, 对于相同的注入激光脉冲和放大系统初始增益以及增益恢复系数, 程间损耗和光束口径放大倍数越大, 放大系统的损耗越大, 因此, 激光脉冲所能提取的能量越小, 放大系统的放大倍数越小。由图 4 可知, 激光脉冲通过多程放大系统传输, 对于均匀增益分布情况, 当注入能量密度远小于饱和能量密度时 (见图 4a), 激光脉冲几乎被线性放大,

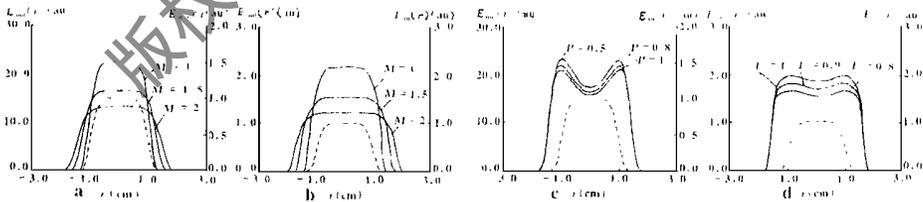


Fig. 4 The initial and output spatial pulse profiles of a 2-pass amplifier under different gain distributions:  $E_s = 2.7\text{J/cm}^2$ ,  $L = 36\text{cm}$ ,  $\alpha = 0.4\% \text{cm}^{-1}$ ,  $2\tau = 2\text{ns}$ ,  $a-p = 0.8$ ,  $T' = 0.8$ ,  $E_{\text{in}}|_{r=0} = 0.1\text{J/cm}$ ,  $g_0(r) = 0.06\text{dB/cm}$ ;  $b-p = 0.8$ ,  $T' = 0.8$ ,  $E_{\text{in}}|_{r=0} = 3\text{J/cm}$ ,  $g_0(r) = 0.06\text{dB/cm}$ ;  $c-T' = 0.8$ ,  $M = 1.5$ ,  $E_{\text{in}}|_{r=0} = 0.1\text{J/cm}$ ,  $g_0(r) = 0.06(1 + r^2/4)\text{dB/cm}$ ;  $d-p = 0.8$ ,  $M = 1.5$ ,  $E_{\text{in}}|_{r=0} = 3\text{J/cm}$ ,  $g_0(r) = 0.06(1 + r^2/4)\text{dB/cm}$   
 ———— output fluence profile  $E_{\text{out}}(r)$  ..... initial fluence profile  $E_{\text{in}}(r)$

其空间分布无明显畸变, 而当注入能量密度大于饱和能量密度时 (见图 4b), 由于增益饱和效应的影响, 空间分布将产生畸变, 且被展宽。对于增益分布非均匀 (如抛物线分布) 的情况, 激

光脉冲通过多程放大系统后,其空间分布将产生明显畸变,当放大系统中的能量密度较小时(见图 4c),激光脉冲几乎被线性放大,因此,由于增益分布非均匀性所引起的输出脉冲空间分布的畸变较大,而对于能量密度较大的情况(见图 4d),由于增益饱和效应的影响,使增益分布非均匀性所引起的输出脉冲空间分布的畸变反而较小,但此时放大系统的放大倍数远小于能量密度小时的放大倍数。另外,为了进一步说明用计算模拟对放大系统进行最佳化设计的重要性,图 5 给出多程放大系统的参数设计不合理时的计算例,其中 a 为激光脉冲通过放大系统后不同程数的时间波形变化;b 为不同程数的空间分布变化。与图 2 的计算参数相比较,图 5 的计算参数中只是程间损耗和注入激光脉冲的能量密度更大,而其它参数完全相同。分析图 5 可知,如果多程放大系统的参数设计不合理,例如程间损耗设计太大,对于能量密度较大的激光脉冲,由于增益饱和效应的影响以及程间损耗较大,激光脉冲经多程放大系统后不能有效地被放大,且激光脉冲经单程放大的倍数比经多程放大的倍数更大,这在多程放大系统的设计中是很不合理的,由此可见,在多程放大系统的实际设计时,必须通过数值计算来选取合理的放大系统参数,以使多程放大系统的每一程均能对激光脉冲进行有效地放大。因此,用计算模拟对放大系统进行最佳化设计是十分必要的。

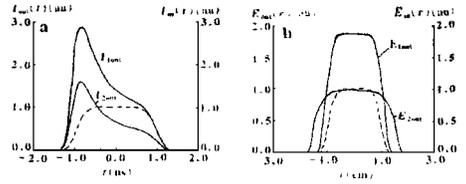


Fig. 5 The numerical simulation example of pulsed laser passing through a 2-pass amplifier when the designed parameters are not suitable.  $g_0(r) = 0.06\text{dB/cm}$ ,  $E_s = 2.7\text{J/cm}^2$ ,  $L = 36\text{cm}$ ,  $\alpha = 0.4\% \text{cm}^{-1}$ ,  $2\tau = 2\text{ns}$ ,  $p = 0.8$ ,  $T' = 0.7$ ,  $M = 1.5$ ,  $E_{\text{out}}|_{r=0} = 5\text{J/cm}$ , a—temporal profile b—fluence profile ———— output temporal or fluence profile ..... initial temporal or fluence profile

### 三、结 束 语

对激光脉冲通过多程脉冲放大系统传输特性进行了详细的研究,数值结果表明,激光脉冲经多程放大系统后的传输特性与注入能量密度,放大系统的增益分布,放大介质的增益恢复系数,程间损耗和光束口径的放大倍数等因素有关。

### 参 考 文 献

- 1 Lowdermilk W H, Murray J E. J A P, 1980; 51: 2436
- 2 范滇元, 余文炎. J Lasers, 1980; 7: 1
- 3 Simmons W W, Hunt J T, Warren W E. IEEE J Q E, 1981; 17: 1727
- 4 张彬, 吕百达. 中国激光, 1996; A23: 1061
- 5 L B D, Zhang B. Opt. Commun., 1996; 130: 279

作者简介: 张 彬, 女, 1969年9月出生。副研究员, 博士生。主要从事激光光束的传输变换研究。

收稿日期: 1996-11-18 收到修改稿日期: 1997-04-25

### • 产品简讯 •

## 紫外激光反射镜

美国新墨西哥州阿尔伯克基的 CVI Laser 公司提供一种用于 Nd:YAG 或 Nd:YLF 激光器的五次谐波的反射镜, 波长 213nm, 可当天发货。正入射镜, 光束旋转镜和分束镜的波长范围在 209~ 213nm, 直径从 0.5~ 4.0in。该公司也可以在其它尺寸熔融石英基底上镀膜。

於祖兰 巩马理 供稿