

高功率激光通过多级和多程脉冲放大器的传输特性

张 彬 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 采用脉冲序列模型和薄片模型, 对任意空间和时间分布波形的激光通过任意增益分布多级和多程脉冲放大系统的传输特性作了详细研究。

关键词: 多级和多程脉冲激光放大器 空间和时间分布波形 传输特性

Propagation properties of high-power laser beams passing through multistage and multipass pulsed-laser amplifiers

Zhang Bin, L Baida

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

Abstract: By using the pulse-sequence model and the slab model that the active medium is divided into a series of thin slabs with certain gain distribution and loss factor, the propagation properties of laser beams with arbitrary spatial and temporal profiles passing through multistage and multipass pulsed-laser amplifiers with arbitrary gain distribution have been studied in detail.

Key words: multistage and multipass pulsed-laser amplifiers spatial and temporal profiles propagation properties

一、引 言

实际工作中常采用多级和多程激光放大系统以获取高功率激光^[1,2]。脉宽为纳秒和亚纳秒量级的高功率激光在多级和多程脉冲激光放大系统中传输时, 由于受到增益非均匀分布、增益饱和和介质吸收等的影响, 光脉冲的时间波形和空间分布将明显发生变化。本文中使用脉冲序列模型和薄片模型, 在较为一般情况下研究任意空间和时间分布波形激光通过任意增益分布多级和多程脉冲放大系统的传输特性, 所得结果对高功率激光放大器设计有参考意义。

二、多级激光放大系统

通常, 多级激光放大系统的主要单元有: (1) 放大器, 提供足够增益, 以放大输入激光; (2) 空间滤波器, 其主要作用是消除激光束中的高频调制, 抑制小尺度自聚焦, 改善光束质量以及实现一定程度的光隔离; (3) 光束变换器, 其作用是实现激光束的变换; (4) 注入和输出镜等。在计算模拟多级激光放大系统时, 可根据放大系统的总体排布图, 逐级进行计算。具体来说, 假设放大系统有 n 级, 第 i ($1 \leq i \leq n$) 级放大介质的长度为 L_i , 若分成 m 个薄片, 激光脉冲通过第 j ($1 \leq j \leq m$) 片放大介质放大后的能量密度为

$$E_{j, \text{out}}^i(x, y, z = z_i + jL_i/m) = T_j^i E_s \ln \{ G_j^i(x, y, z = z_i + jL_i/m) [e^{E_{j, \text{in}}^i(x, y, z_i + (j-1)L_i/m)/E_s} - 1] + 1 \} \quad (1)$$

式中, $T_j^i = \exp(-\alpha L_i/m)$ 和 $G_j^i(x, y, z = z_i + jL_i/m) = \exp[\sigma \int_{z_i + [(j-1)L_i/m]}^{z_i + jL_i/m} N_0(x, y,$

$z) dz]$ 分别为第 i 级放大器中第 j 片介质的损耗因子和小信号增益, α 为放大介质的吸收系数, σ 为发射截面, E_s 为饱和能量密度, N_0 为初始反转粒子数密度, z_i 为第 i 级输入面的位置坐标。

由于各级放大器间均存在空间滤波器和光束变换器等, 会引入一定的损耗, 因此, 第 $i+1$ 级放大器的输入能量密度与前级 (第 i 级) 放大器的输出能量密度的关系为

$$E_{1,in}^{i+1}(x, y, z_i + L_i + l_i) = T_i E_{m,out}^i(x, y, z_i + L_i) \quad (2)$$

式中, l_i 为两级间的距离, T_i 为两级间引入的损耗, 包括因扩束引起能量密度的减小。

以上给出的是能量密度的传输公式, 在计算空间分布和时间波形变化时, 对激光脉冲采用脉冲序列模型^[3], 即将激光脉冲看作由 k 个间距为零的子脉冲组成的脉冲序列, 于是, 第 i 级放大器中第 j 片介质的输出脉冲能量密度的空间分布为

$$E_{j,out}^i[x, y, z_i + (jL_i/m)] = \sum_{l=-k/2}^{k/2} E_{j,out}^{i,l}[x, y, z_i + (jL_i/m)] \quad (3)$$

$t = l\delta$ 时刻的输出光强的时间分布为

$$I_{j,out}^{i,l}[x, y, z_i + (jL_i/m), l\delta] = E_{j,out}^{i,l}[x, y, z_i + (jL_i/m)] / \delta = I_{j,out}^i[x, y, z_i + (jL_i/m)] I_{j,out}^l(l\delta) \quad (4)$$

式中, $\delta = D/k$ (5)

其中, 计算时间 D 应大于脉宽。计算放大器输出脉冲序列中第 l 子脉冲的能量密度 $E_{j,out}^{i,l}(x, y, z_i + jL_i/m)$, 以及 $t = (l+1)\delta$ 时刻的增益 $G_j^{i,l+1}[x, y, z_i + (jL_i/m)]$ 的递推公式

$$E_{j,out}^{i,l}[x, y, z_i + (jL_i/m)] = T_j E_{in}^i \{ G_j^{i,l+1}[x, y, z_i + (jL_i/m)] \times \{ e^{E_{j,in}^{i,l}[x, y, z_i + (j-1)L_i/m]/E_s} - 1 \} + 1 \} \quad (6)$$

$$G_j^{i,l+1}\left(x, y, z_i + \frac{jL_i}{m}\right) = \left[G_j^{i,l}\left(x, y, z_i + \frac{jL_i}{m}\right) \sqrt{\left[1 + e^{G_j^{i,l}\left(x, y, z_i + \frac{jL_i}{m}\right)} \right]} \right] \times \left\{ \frac{\exp\left[E_{j,in}^{i,l}\left(x, y, z_i + \frac{(i-1)L_i}{m}\right) / E_s \right]}{\exp\left[E_{j,in}^{i,l}\left(x, y, z_i + \frac{(j-1)L_i}{m}\right) / E_s \right]} - 1 \right\} \quad (7)$$

因此, 由 (1)~(4) 式可得到输出激光的空间分布和 $t = l\delta$ 时的时间分布。

对三级磷酸盐钕玻璃棒状放大系统用 (1)~(4) 式进行的数值计算例见图 1 和图

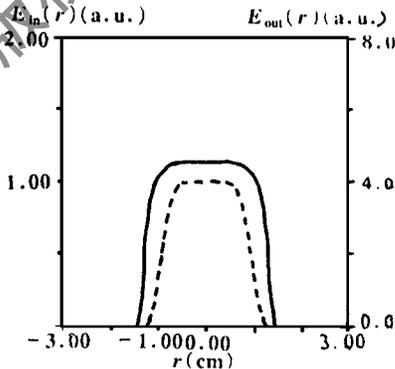


Fig. 1 The initial and output spatial pulse profiles of a 3-stage amplifier

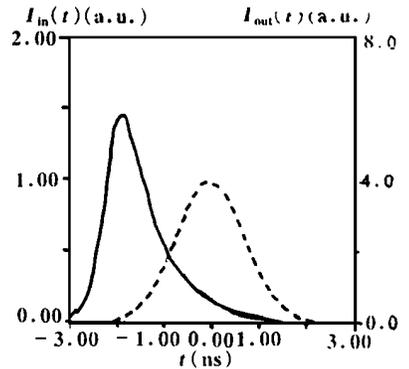


Fig. 2 The initial and output temporal pulse profiles of a 3-stage amplifier at $r = 0$

2. 计算所使用参数为: 受激发射截面 $\sigma = 3.5 \text{ cm} \times 10^{-20} \text{ cm}$, 动态吸收系数 $\alpha = 0.4\% \text{ cm}^{-1}$, 三

级放大器尺寸分别为 $i20\text{mm} \times 350\text{mm}$, $i40\text{mm} \times 350\text{mm}$ 和 $i70\text{mm} \times 350\text{mm}$, 设光束口径为放大器横向尺寸的 90%。增益均匀分布, 各放大器的小信号增益系数分别为 $g_0 = 0.16\text{dB/cm}$, 0.084dB/cm 和 0.044dB/cm 。各级间空间滤波器的插入损耗为 $T_i = 0.8$ 。图 1 给出输入和输出激光脉冲的能量密度空间分布。输入脉冲的空间为 6 阶超高斯分布, 时间为高斯分布, 且 $E_{in}|_{r=0} = 1\text{J/cm}^2$ 。图 2 为输入和输出脉冲在 $r = 0$ 处光强的时间波形。输入脉冲的空间为 6 阶超高斯分布, 时间为高斯分布, 且 $E_{in}|_{r=0} = 1\text{J/cm}^2$ 。图 1 和图 2 中虚线对应输入时间或空间波形, 实线对应输出时间或空间波形。

分析图 1 可知, 对于增益均匀分布的情况, 激光脉冲通过多级放大系统后, 其空间分布无明显畸变。由图 2 可见, 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, 使放大器输出脉冲的时间波形变成前沿陡而后沿缓的波形。

三、多程激光放大系统

在集中损耗近似下, 描述多程放大第 k 程的输出能量密度和第 $k+1$ 程增益的表达式为^[3]

$$E_{out}^k = T^k E_s \ln \{ G^k [\exp(E_{in}^k/E_s) - 1] + 1 \} \quad (8)$$

$$G^{k+1} = G^k \exp[-p(E_{out}^k/T^k - E_{in}^k)/E_s] \quad (9)$$

式中, 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。 $1/2 \leq p \leq 1$, 当 $p = 1$, 放大器增益完全没有恢复, 当 $p = 1/2$, 放大器增益完全恢复。

第 k 程输出能量密度与第 $k+1$ 程输入能量密度的关系为 $E_{in}^{k+1} = T'^k E_{out}^k$ (10)

式中, T'^k 为两程之间的空间滤波器引入的损耗因子, 计算中还应计及因扩束引起能量密度的减小。

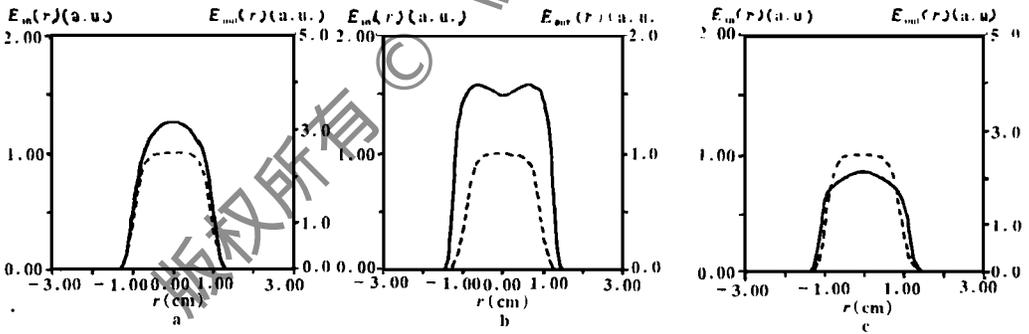


Fig. 3 The initial and output spatial pulse profiles of a 3-pass amplifier

采用脉冲序列模型和薄片模型可同时计算输出脉冲的空间分布、时间波形和能量密度。数值计算对三程磷酸盐铍玻璃片状放大系统进行, 典型例示于图 3 和图 4。计算所使用参数为: 放大介质有效长度为 200mm , 中心处的初始增益系数 $g_{00} = 0.06\text{dB/cm}$, 第一、二程间的空间滤波器的损耗因子为 $T = 0.8$, 光束面积放大 1.5 倍, 第二、三程间的平面反射镜的损耗因子为 $T = 0.98$, 设第二、三程的恢复系数 p 相同, 其余参数同前。图 3 给出输入和输出激光脉冲的能量密度空间分布。计算对增益非均匀分布(如抛物线分布)进行, a. $p = 0.5$, 增益系数 $g_0 = g_{00}(1 - r^2/4)\text{dB/cm}$, 输入脉冲的空间和时间均为 6 阶超高斯分布, 且 $E_{in}|_{r=0} = 1\text{J/cm}^2$; b. $p = 0.5$, 增益系数 $g_0 = g_{00}(1 + r^2/4)\text{dB/cm}$, 输入脉冲的空间为 6 阶超高斯分布, 时间为一复杂分布(称为“脚板型”)^[4], 且 $E_{in}|_{r=0} = 3\text{J/cm}^2$; c. $p = 1$, 增益系数 $g_0 = g_{00}(1 - r^2/4)\text{dB/cm}$,

输入脉冲的空间和时间均为 6 阶超高斯分布, 且 $E_{in}|_{r=0} = 1\text{J}/\text{cm}^2$ 。图 4 为输入和输出脉冲在 $r=0$ 处光强的时间波形。a. $p=0.5$, 增益系数 $g_0 = g_{00}(1 - r^2/4)$ dB/cm, 输入脉冲的空间和时间均为 6 阶超高斯分布, 且 $E_{in}|_{r=0} = 1\text{J}/\text{cm}^2$; b. $p=0.5$, 增益系数 $g_0 = g_{00}(1 + r^2/4)$ dB/cm, 输入脉冲的空间为 6 阶超高斯分布, 时间为“脚板型”分布, 且 $E_{in}|_{r=0} = 3\text{J}/\text{cm}^2$; c. $p=1$, 增益系数 $g_0 = g_{00}(1 - r^2/4)$ dB/cm, 输入脉冲的空间和时间均为 6 阶超高斯分布, 且 $E_{in}|_{r=0} = 1\text{J}/\text{cm}^2$ 。图 3 和图 4 中虚线对应输入时间或空间波形, 实线对应输出时间或空间波形。

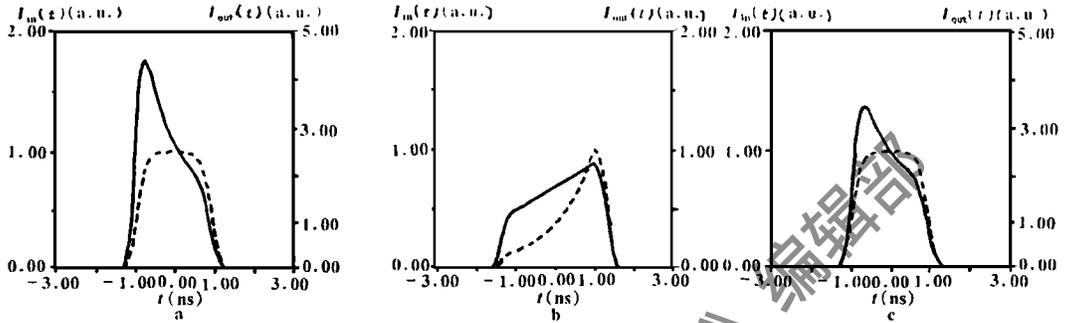


Fig. 4 The initial and output temporal pulse profiles of a 3-pass amplifier at $r=0$

分析图 3 可知, 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。由图 4 可见, 如果输入“脚板型”脉冲, 相应输出脉冲的时间波形将变成比输入时间波形前沿更陡而后沿缓的波形。同时, 由图 3 和图 4 可以看出, 增益完全恢复($p=0.5$)多程放大系统的放大倍数比增益完全未恢复($p=1$)时大, 这是因为 $p=0.5$ 时第二、三程的增益比 $p=1$ 时大的缘故。

四、结 束 语

本文采用序列脉冲模型和薄片模型对激光脉冲通过多级和多程脉冲放大器的传输特性作了数值计算和分析研究。文中所用方法的优点是可同时计算激光脉冲的时间和空间分布的变化。并且, 在损耗较大时, 它能得出比集中损耗近似更为准确的结果。我们所编制的计算程序用我国激光聚变驱动器的有关数据校验, 得到了一致的结果。本文所用模型还可用以研究多级和多程放大器的逆问题, 即对于给定的输出脉冲和放大器参数, 求输入脉冲波形和能量密度, 有关工作将另文发表。

本工作得到国家高技术惯性约束聚变主题项目资助, 作者感谢与邓锡铭院士, 范滇元院士, 林尊琪教授和张小民副研究员对本文有关问题所作的十分有益的讨论。

参 考 文 献

- 1 Lowdermilk W H, Murray J E. J A P, 1980; 51(5): 2436~ 2444
- 2 范滇元, 余文炎. 中国激光, 1980; 7(9): 1~ 6
- 3 张 彬, 吕百达. 中国激光, 1996; A23(12): 1061~ 1066
- 4 Lawson J K, Speck D R, Burkhart S C et al. Appl Opt, 1992; 31(24): 5061~ 5069

作者简介: 张 彬, 女, 1969 年 9 月出生。助教, 硕士。主要从事激光光束的传输变换的研究。

收稿日期: 1996-01-17 收到修改稿日期: 1997-04-04