

# 高功率激光通过脉冲放大器的变化\*

张 彬 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)

**提要** 采用脉冲分割模型详细研究了任意空间和时间分布波形的激光通过任意增益分布脉冲激光放大器后, 激光脉冲波形和能量密度的变化, 并将可用总损耗  $T$  表示的集中损耗近似和薄片损耗模型计算结果作了比较, 给出了集中损耗近似成立的条件。

**关键词** 脉冲激光放大器, 空间和时间分布波形, 增益分布, 集中损耗近似

## 1 基本概念

脉宽为 ns 和亚 ns 量级的高功率激光在脉冲激光放大器中传输时(典型例为惯性约束聚变(ICF)驱动器中的放大系统<sup>[1,2]</sup>), 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, 因此, 有必要对任意空间和时间分布波形激光通过任意增益分布的脉冲放大器的传输特性进行详细研究。此外, 一般对这类放大器的计算均采用集中损耗近似, 但在某些情况下, 集中损耗近似条件并不成立。本文采用薄片损耗模型代替集中损耗近似, 对计算结果作了详细的分析和比较, 并进一步给出了集中损耗近似成立的条件。

众所周知, 从 Frantz-Nodvik 方程<sup>[3]</sup>出发, 在集中损耗近似下, 即将放大介质的体损耗等效于通过介质放大后的总损耗因子  $T$ , 可推导出激光脉冲经长度  $L$  的放大介质后的输出能量密度公式<sup>[1]</sup>

$$E_{\text{out}}(x, y, z = L) = TE_{\text{in}} \ln \{ G(x, y, z = L) [e^{E_{\text{in}}(x, y, 0)/E_s} - 1] + 1 \} \quad (1)$$

式中,  $E_{\text{in}}$  和  $E_{\text{out}}$  分别为输入和输出能量密度, 而

$$E_s = \frac{h\nu}{2\sigma} \quad (2)$$

为饱和能量密度,  $\nu$  为激光频率,  $\sigma$  为受激发射截面。

$$T = \exp(-\alpha L) \quad (3)$$

为损耗因子,  $\alpha$  为损耗系数。

\* 国家高技术惯性约束聚变 No. 416-2. 3. 4 资助项目。

收稿日期: 1995 年 12 月 26 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 22 日

$$G(x, y, z = L) = \exp\left(\int_0^L g_0(x, y, z) dz\right) = \exp\left(\sigma \int_0^L N_0(x, y, z) dz\right) \quad (4)$$

为单程小信号增益,  $g_0(x, y, z)$  为放大介质的小信号增益系数,  $N_0(x, y, z)$  为初始反转粒子数密度。

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>[1]</sup>

$$E_{k+1} = TE_s \ln\{G_k[\exp(E_k/E_s) - 1] + 1\} \quad (5)$$

$$G_{k+1} = G_k \exp[-p(E_{k+1}/T - E_k)/E_s] \quad (6)$$

其中,  $p$  为恢复系数, 它描述多程放大器的弛豫效应和脉冲时间间隔对增益的影响。  $1/2 \leq p \leq 1$ , 当  $p = 1$ , 即抽空效应可以忽略不计, 放大器增益完全没有恢复, 当  $p = 1/2$ , 即不考虑终态抽空效应的影响, 放大器增益完全恢复。

## 2 激光脉冲经放大器的空间和时间分布的变化

在单程放大器中, 由于激光脉冲存在一定的持续时间, 随着激光脉冲前沿被放大并提取放

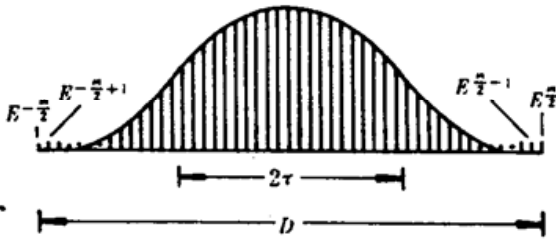


Fig. 1 A schematic illustration of the pulse-sequence model

大介质的储能, 反转粒子数密度也随之变化, 从而影响激光脉冲后沿的放大增益, 在分析激光脉冲通过放大介质传输后的变化特性时, 可采用多程放大器的公式(5), (6)<sup>[2]</sup>进行计算, 计算时可将图 1 所示的激光脉冲分割成  $m$  个子脉冲, 子脉冲的脉宽为:

$$\delta = D/m \quad (7)$$

其中, 计算时间  $D$  应大于  $2\tau$  ( $2\tau$  为脉宽)。这时值得注意的是: 1)  $k$  和  $k+1$  程脉冲分别对应于我们脉冲分割模型中(例如第  $l$  个,  $-\frac{m}{2} \leq l \leq \frac{m}{2}$ ,  $m$  为子脉冲总数)的输入和输出脉冲; 2) 描述放大器增益恢复情况的参数  $p = 1$ , 即增益完全未恢复。因此, 从(5), (6)式出发, 可以对任意空间和时间分布光脉冲通过任意增益分布的单程脉冲激光放大器、多级激光放大器、多程激光放大器的正问题, 即给定输入脉冲波形和能量密度分布, 放大系统参数, 求解输出脉冲的波形和能量密度分布作计算模拟。以计算激光脉冲通过单程脉冲放大器的正问题为例, 假设输入的激光脉冲场分布为:

$$U_{in}(x, y, z = 0, t) = U_{in}(x, y, 0)U_{in}(t) e^{i\phi(x, y, 0)} \quad (8)$$

式中,  $\phi(x, y, 0)$  为初始位相。于是, 光强分布为:

$$I_{in}(x, y, z = 0, t) = U_{in}(x, y, 0, t)U_{in}^*(x, y, 0, t) = I_{in}(x, y, 0)I_{in}(t) \quad (9)$$

则输入能量密度为:

$$E_{in}(x, y, z = 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_{in}(x, y, 0, t) dt = I_{in}(x, y, 0) \int_{-\infty}^{+\infty} I_{in}(t) dt \quad (10)$$

利用脉冲分割模型

$$E_{in}(x, y, 0) = I_{in}(x, y, 0) \sum_{l=-\infty}^{+\infty} I_{in}(l\delta) \delta = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} E'_{in}(x, y, 0) \quad (11)$$

式中

$$E'_{in}(x, y, 0) = I_{in}(x, y, 0)I_{in}(l\delta) \delta \quad (12)$$

于是, (10)式可写成

$$E_{in}(x, y, 0) = \sum_{l=-m/2}^{m/2} E'_{in}(x, y, 0) \tag{13}$$

由(5), (6)式, 得到计算放大器输出脉冲分割模型中第  $l$  子脉冲的能量密度  $E'_{out}(x, y, z = L)$ , 以及  $t = (l + 1)\delta$  时刻的增益  $G^{l+1}(x, y, L)$  的递推公式

$$E'_{out}(x, y, z = L) = TE_s \ln \{ G^l(x, y, L) [e^{E'_{in}(x, y, 0)/E_s} - 1] + 1 \} \tag{14}$$

$$G^{l+1}(x, y, L) = \frac{G^l(x, y, L) \exp[E'_{in}(x, y, 0)/E_s]}{1 + G^l(x, y, L) \{ \exp[E'_{in}(x, y, 0)/E_s] - 1 \}} \tag{15}$$

于是, 输出脉冲能量密度的空间分布为

$$E_{out}(x, y, L) = \sum_{l=-m/2}^{m/2} E'_{out}(x, y, L) \tag{16}$$

利用脉冲分割模型,  $t = l\delta$  时刻的输出光强的时间分布为:

$$I_{out}(x, y, L, l\delta) = \frac{E_{out}(x, y, L)}{\delta} = I_{out}(x, y, L) I_{out}(l\delta) \tag{17}$$

为简单起见, 在(17)式中略去了输出脉冲相对于输入脉冲的整体时间移动  $\Delta = L/v$  ( $v$  为介质中的光速)。因此, 由(16)和(17)式可分别得到输出激光的空间分布  $E_{out}(x, y, L)$  和  $t = l\delta$  时的时间分布  $I_{out}(x, y, L, l\delta) |_{x, y = \text{const}}$ 。

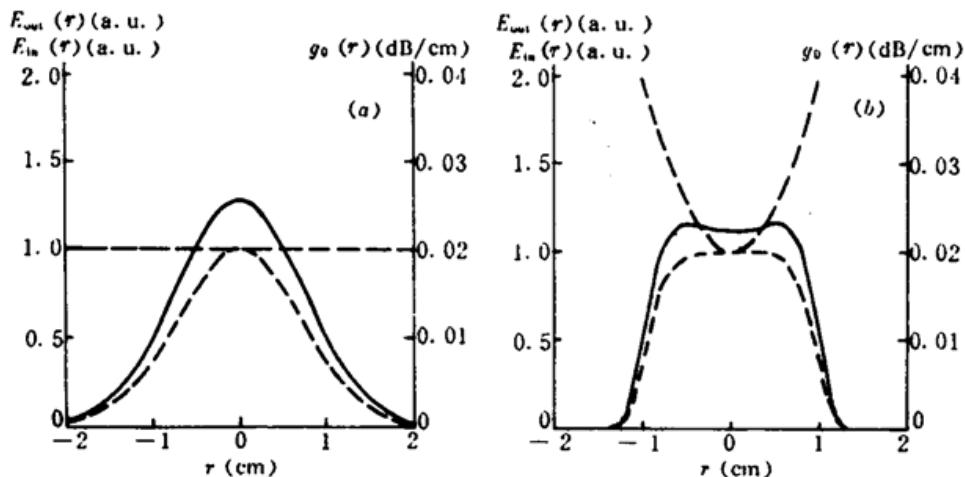


Fig. 2 The initial and output spatial pulse profiles

(a) the gain coefficient  $g_0 = 0.02 \text{ dB/cm}$ , the initial pulse has a Gaussian profile in both time and space domains, and  $E_{in}|_{r=0} = 1 \text{ J/cm}^2$ ; (b) the gain coefficient distribution  $g_0(r) = 0.02(1 + r^2) \text{ dB/cm}^2$ , the initial pulse has a 6-order super-Gaussian profile in both time and space domains, and  $E_{in}|_{r=0} = 5 \text{ J/cm}^2$ . The calculation parameters are  $\sigma = 3.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $E_s = 2.7 \text{ J/cm}^2$ ,  $\alpha = 0.4 \text{ \%cm}^{-1}$ ,  $T = 0.92$ , and  $2\tau = 2 \text{ ns}$ . “—”: output fluence  $E_{out}$ , “- - -”: gain coefficient distribution  $g_0(r)$ , “.....”: initial fluence  $E_{in}$ .

用(13)~(17)式对磷酸盐钕玻璃激光放大器进行数值计算, 典型例如图 2, 3 所示。数值计算将计算公式中的直角坐标化为柱坐标, 并针对空间分布为圆对称情况进行, 计算所用参数为发射截面  $\sigma = 3.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 损耗系数  $\alpha = 0.4 \text{ \%cm}^{-1}$ , 损耗因子  $T = 0.92$ , 饱和能量密度  $E_s = 2.7 \text{ J/cm}^2$ , 激光脉宽  $2\tau = 2 \text{ ns}$ 。图 2 为输入和输出能量密度的空间分布, 计算对增益均匀分布和非均匀分布(例如抛物线分布)进行; 其中, (a) 增益系数  $g_0 = 0.02 \text{ dB/cm}$ , 输入脉冲的空间和时间均为高斯分布, 且  $E_{in}|_{r=0} = 1 \text{ J/cm}^2$  ( $r$  为径向坐标); (b) 增益系数  $g_0(r) =$

$0.02(1 + r^2)$  dB/cm, 输入脉冲的空间和时间均为 6 阶超高斯分布, 且  $E_{in}|_{r=0} = 5 \text{ J/cm}^2$ , 图中短虚线对应输入能量密度分布, 实线对应输出能量密度分布, 长虚线对应增益分布。图 3 为输入和输出脉冲在  $r = 0$  处光强的时间波形。其中, (a) 输入脉冲的空间和时间均为高斯分布, 且  $E_{in}|_{r=0} = 1 \text{ J/cm}^2$ , (b) 输入脉冲的空间和时间分布均为 6 阶的超高斯分布, 且  $E_{in}|_{r=0} = 5 \text{ J/cm}^2$ 。图中虚线对应输入时间波形, 实线对应输出时间波形。

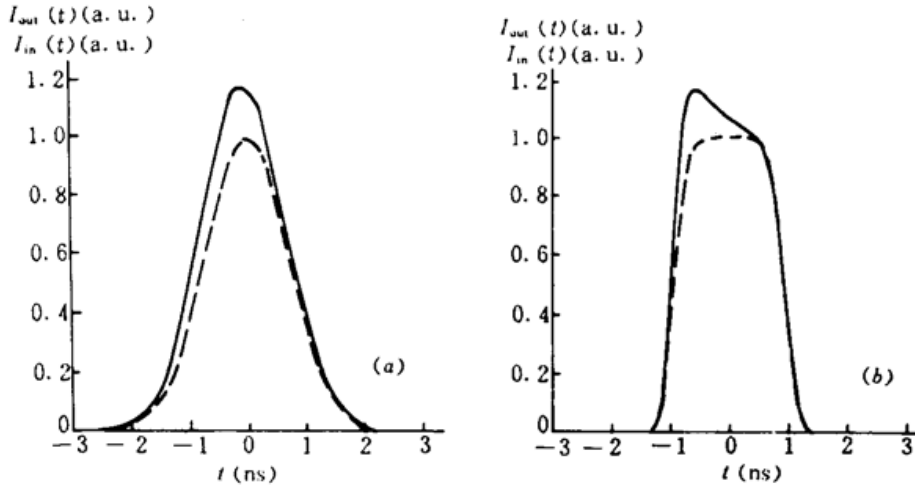


Fig. 3 The initial and output temperature pulse profiles at  $r = 0$

(a) the gain coefficient  $g_0 = 0.02$  dB/cm, the initial pulse has a Gaussian profile in both time and space domains, and  $E_{in}|_{r=0} = 1 \text{ J/cm}^2$ ; (b) the gain coefficient distribution  $g_0(r = 0) = 0.02(1 + r^2)$  dB/cm<sup>2</sup>, the initial pulse has a 6-order super-Gaussian profile in both time and space domains, and  $E_{in}|_{r=0} = 5 \text{ J/cm}^2$ . The calculation parameters are  $\sigma = 3.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $E_s = 2.7 \text{ J/cm}^2$ ,  $\alpha = 0.4 \text{ \%cm}^{-1}$ ,  $T = 0.92$ , and  $2\tau = 2 \text{ ns}$ . “—”: output fluence  $I_{out}(t)$  at  $r = 0$ , “----”: initial temporal pulse profile  $I_{in}(t)$  at  $r = 0$

分析图 2 可知, 对于增益分布非均匀(如抛物线分布)的情况, 输入能量密度  $E_{in}|_{r=0} = 5 \text{ J/cm}^2$ (比饱和能量密度远大)的激光脉冲通过放大器后, 其空间分布将被展宽, 并产生畸变[见图 2(b)], 当增益分布均匀时, 比  $E_s$  远小的激光脉冲( $E_{in}|_{r=0} = 1 \text{ J/cm}^2$ )通过放大器后, 其空间分布并不产生明显畸变[见图 2(a)]. 由图 3 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, 并且, 输入能量密度越大, 由于增益饱和效应所引起时间波形的畸变越厉害。

### 3 集中损耗近似条件

以上对放大器的计算分析均采用集中损耗近似, 但激光脉冲通过放大介质传输的实际物理过程是激光脉冲被放大的同时具有损耗, 因此, 作计算时应采用薄片模型, 即将增益介质分成若干等厚的薄片, 而且, 薄片越多, 精度越高。不过当放大介质较短, 单程损耗较小时采用集中损耗近似和薄片损耗模型计算的结果差别很小, 可简单地采用集中损耗近似进行计算, 从而避免薄片损耗模型计算所带来问题的复杂化。

薄片损耗模型计算方法类似于积分计算, 此方法将放大介质分成许多等厚的薄片, 在每一片有一损耗和增益分布, 并将整个放大介质视为许多小片介质的串接, 按多级放大进行处理, 逐级计算。具体来说, 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:

$$E_{\text{out}}(x, y, z = iL/n) = T_i E_s \ln[G_i(x, y, z = iL/n) e^{E_{\text{in}}(x, y, (i-1)L/n)/E_s} + 1] \quad (18)$$

式中,  $T_i = \exp(-\alpha \frac{L}{n})$  为第  $i$  片介质的损耗,  $G_i = \exp\left[\sigma \int_{(i-1)L/n}^{iL/n} N_0(x, y, z) dz\right]$  为第  $i$  片介质的小信号增益。

分别采用集中损耗近似和薄片损耗模型进行数值计算的结果表明, 当放大介质参数一定时, 即增益系数和损耗系数之比  $g_0/\alpha$  给定时, 介质越长, 单程损耗越大, 集中损耗近似和薄片损耗模型计算的差异越大。在所选取参数情况下, 当损耗因子  $T > 0.92$  时, 采用两种计算方法计算结果的相对差异  $< 1\%$ , 而当损耗因子  $T < 0.8$  时, 采用两种计算方法计算结果的相对差异将  $> 7\%$ 。图 4 给出在不同的损耗因子  $T$  的情况下, 采用集中损耗近似和薄片损耗模型的计算结果, 图中短虚线对应输入能量密度分布, 实线对应集中损耗计算结果, 长虚线对应薄片损耗模型计算结果, 计算所用参数为初始反转粒子数密度  $N_0 = 1.68 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 损耗系数  $\alpha = 0.4\% \text{ cm}^{-1}$ , 输入脉冲空间和时间均为 6 阶超高斯分布, 且  $E_{\text{in}}|_{r=0} = 1 \text{ J/cm}^2$ , (a)  $T = 0.7$ , (b)  $T = 0.8$ , (c)  $T = 0.9$ 。由图可知, 因  $T = 0.7$  和  $T = 0.8$  时的损耗较大, 采用集中损耗近似和薄片损耗模型计算所得结果差别较大。因此, 当损耗较大时, 应采用薄片损耗模型进行数值计算。图中, 薄片损耗模型的计算结果大于集中损耗近似的结果是由于在输入能量密度和放大介质长度相同的情况下, 输入脉冲通过放大介质传输过程中能量密度不断增大, 从输入端到输出端的各薄片所损耗的能量密度逐渐增大, 薄片损耗对能量密度的减小作用比集中损耗对能量密度的减小作用要小, 从而使薄片损耗模型计算所得的输出激光能量密度值大于集中损耗计算值。

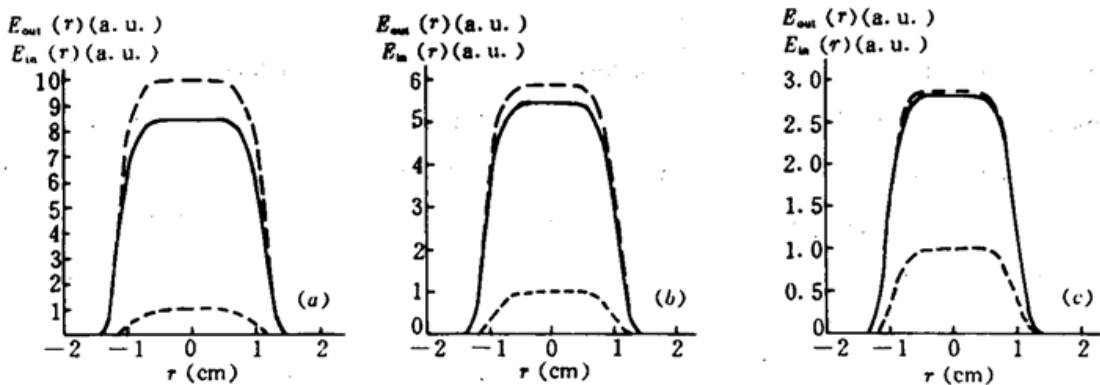


Fig. 4 The initial and output spatial pulse profiles calculated by total-loss-factor approximation and thin-slab-loss-model. The calculation parameters are  $N_0 = 1.68 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\sigma = 3.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $E_s = 2.7 \text{ J/cm}^2$ ,  $\alpha = 0.4\% \text{ cm}^{-1}$ ,  $2\tau = 2 \text{ ns}$ , and  $E_{\text{in}}|_{r=0} = 1 \text{ J/cm}^2$

(a)  $T = 0.7$ ; (b)  $T = 0.8$ ; (c)  $T = 0.9$ . “.....”: initial fluence  $E_{\text{in}}$ ; “----”: output fluence  $E_{\text{out}}$  calculated by thin-slab-loss-model, “—”: output fluence  $E_{\text{out}}$  calculated by total-loss-factor approximation

## 4 结束语

本文对激光通过脉冲放大器后的能量密度、空间和时间波形的变化进行了详细的研究, 并通过集中损耗近似和薄片损耗模型计算结果的定量比较, 给出了集中损耗近似成立的条件, 容易证明我们所用的基本方程(14), (15)式与分别从 F-N 方程和在忽略放大器孔径衍射效应前提下从傍轴波动方程出发推出的描述激光在脉冲放大器中时间和空间波形变化的方程是完全一致的。采用脉冲分割模型和已编制的程序还可用于计算单程、多级和多程脉冲激光放大器的

能量提取效率以及单程、多级和多程放大器的逆问题(给定输出脉冲分布和放大器参数,求输入脉冲分布)等<sup>[5]</sup>,所得结果对高功率激光放大器的设计有参考意义。

**致谢** 感谢邓锡铭院士、范滇元院士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 W. H. Lowdermilk, J. E. Murray. The multipass amplifier; Theory and numerical analysis. *J. Appl. Phys.*, 1980, 51: 2436
- 2 范滇元, 余文炎. 高功率多程放大器. *J. Lasers*, 1980, 7: 1
- 3 W. W. Simmons, J. T. Hunt, W. E. Warren. Light propagation through large alser systems. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, QE-17: 1727
- 4 L. M. Frantz, J. S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier. *J. Appl. Phys.*, 1963, 34: 2346
- 5 B. Lü, B. Zhang. Inverse problem of laser amplifier. (to be published)

## Changes in High-power Laser Beams Passing through a Pulsed-laser Amplifier

Zhang Bin Lü Baida

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

**Abstract** By using the pulse-sequence model, changes in pulse profiles and fluence of laser beams of arbitrary spatial and temporal profiles after passing through a pulsed-laser amplifier with an arbitrary gain distribution have been studied in detail. Moreover, numerical calculations have been performed and compared for two cases: (1) the losses can be substituted approximately by a total loss factor  $T$ , and (2) the medium is divided into a series of thin slabs with certain gain distributions and loss factors  $T_i$  ( $T = \prod_i T_i$ ). As a result, the condition of the total-loss-factor approximation has been given.

**Key words** pulsed-laser amplifier, spatial and temporal profiles, gain distribution, total-loss-factor approximation