

# 增益介质光性参数对高功率激光放大系统性能的影响

王 韬 范滇元

(中国科学院上海光机所高功率激光物理国家实验室 上海 201800)

**提要** 针对具体的放大器构型,详细研究了增益介质的光性参数对于放大器总体性能的影响,所得的结果对于优化放大器的设计有参考作用。

**关键词** 高功率激光,增益介质,优化

## 1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)驱动器的建造中,为了充分提高整体性能,优化设计,需要对放大器增益介质的光性参数做仔细的分析。增益介质的光性参数是指显著影响输出激光的性能的物理参数。对于要求工作在高功率、大能量状态的激光放大器,分析研究光性参数具有两方面的意义:一方面通过分析这些物理参数与放大器性能间的敏感度,确定影响放大器性能的主要因素,获得对放大器中光学元件的参数要求,再通过优化设计以达到平衡工程难度,降低工程费用,获得最佳的性能价格比的目的。同时,对放大器中光学元件材料的研究方向具有一定的指导作用;另一方面,由于各物理参数的测量值与实际值存在一定的误差,参数敏感度分析可以预先估计由这种误差所造成的对整个放大系统模拟计算的误差程度,为工程设计把握一定的冗余量。国外的一些著名实验室曾针对增益介质的光性参数的作用做了许多理论和实验工作<sup>[1~3]</sup>,但在放大器的具体设计建造中,光性参数对于放大器性能的影响程度往往和放大器的具体构型相联系。本文将针对我国用于ICF驱动器的新一代高功率激光放大器“神光-III”的基本构型,就多程放大器中部分较敏感的物理参数进行数值分析,讨论其对放大器总体性能的影响,对优化放大器的设计具有一定的指导意义。

## 2 理论模型

### 2.1 多程放大单元模拟计算的模型

多程放大器能流分布计算的光路排布如图 1,输入光束经多程放大器四次放大后再经助推放大器放大,最后实现输出。由于高功率激光放大器工作在大通量下,而激光脉宽与激光上下能级的弛豫时间接近,所以必须考虑弛豫效应的影响<sup>[4]</sup>。为了简化计算,考虑到激光下能级的热化效应与排空效应的作用相同,可以把下能级的热化作用统一归并用排空时间表示。忽略

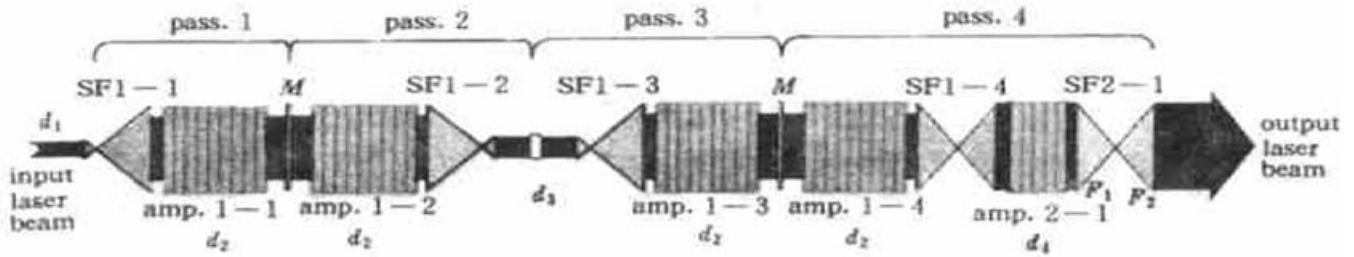


图 1 多程放大系统的能流计算的等效光路图

Fig. 1 Schematic drawing of the multipass laser amplifier for fluence calculation

亚稳态自发辐射的作用, 速率方程可表示为<sup>[4]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial N_1(t)}{\partial t} = \phi \sigma [N_2(t) - N_1(t)] - \frac{N_1(t)}{\tau} \\ \frac{\partial N_2(t)}{\partial t} = -\phi \sigma [N_2(t) - N_1(t)] + \frac{1}{\zeta(1+k_2)} [N_2'(t) - k_2 N_2(t)] \\ \frac{\partial N_2'(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\zeta(1+k)} [N_2'(t) - k_2 N_2(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\phi$  为增益介质内的光子密度,  $N_2(t)$ ,  $N_1(t)$  分别为激光上下能级的粒子密度,  $N_2'(t)$  为激光亚稳态其他 Stark 子能级的粒子密度,  $\zeta$  为激光上能级的热化时间,  $\tau$  为激光下能级排空时间,  $\sigma$  为受激发射截面,  $c$  为增益介质中的光速,  $k_2$  表示亚稳态激光上能级和 Stark 子能级间的玻尔兹曼分布关系。不难得到, 当弛豫作用的时间与激光脉冲宽度相比相对较长, 热化和排空效应的影响可以忽略时, 方程就简化到 Frantz-Nodvik 方程<sup>[5]</sup>。

考虑放大过程中的线性及非线性损耗吸收, 光子输运方程为

$$\frac{dI(t, z)}{dz} = I(t, z) \{ [N_2(t) - N_1(t)] - \alpha \} - \gamma I^2 \quad (2)$$

$I$  代表光强,  $\alpha$  为增益介质的吸收系数,  $\gamma$  为非线性吸收系数, 分别表示增益介质线性吸收和非线性吸收的作用。对于整个放大器能流分布的计算就是对 (1), (2) 两式的完全求解。计算中假设增益系数的空间分布均匀, 激光脉冲形状为高斯型。对损耗的计算采用薄片近似。

## 2.2 计算参数

计算中所采用的参数如下:

脉冲宽度:  $t_p = 3.0 \text{ ns}$  (为高斯型); 片状放大器的小信号增益系数:  $\beta = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ ; 钕玻璃片的厚度:  $4 \text{ cm}$ ; 多程放大器增益介质片数: 9; 助推放大器增益介质片数: 5; 光学元件损耗: 钕玻璃片吸收系数:  $\alpha = 0.004 \text{ cm}^{-1}$ ; 透镜的透过率:  $T = 0.99$ ; 空间滤波器小孔透过率:  $T = 0.90$ ; 电光开关的透过率:  $T = 0.90$ ; 全反射镜的反射率:  $R = 0.99$ 。以上参数均为“神光-1”放大器的典型设计参数。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 受激发射截面

增益介质的受激发射截面直接影响小信号增益系数, 对输出能量影响较大。从理想三能级模型和四能级模型的计算中都可以看出, 放大器的输出能量与受激发射截面积成正比。对于包

含弛豫作用时的情况则介于两者之间, 计算结果见图 2。从优化设计的角度而言, 在同样的泵浦条件下, 如果不考虑自发辐射放大(ASE)所造成的增益塌边, 受激发射截面的增大将显著增加输出能量。同时, 计算还给出了受激发射截面与输出能量之间的敏感关系。计算假设在同样泵浦条件下, 受激发射截面变化 10% 时对于输出能量的影响, 结果表明随着受激发射截面的增大, 两者间的敏感程度逐渐降低。这主要是由于受激发射截面的增大导致饱和能密度的减小, 在大能量输出时形成了强烈的饱和效应从而降低了两者的敏感度。但是, 对于“神光-1”放大器设计采用的增益介质, 受激发射截面取值将在  $3.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  左右, 这将造成输出能量有 10% 左右的变化。由于受激发射截面是通过测量小信号增益间接计算得到, 存在一定的误差, 这必将导致能流模拟存在相当的计算误差, 所以必须在工程设计中加以考虑。

### 3.2 粒子弛豫时间

增益介质粒子间弛豫作用的程度采用热化时间和排空时间来描述<sup>[6]</sup>。热化时间表征当受激放大能级间粒子分布偏离平衡态时粒子恢复平衡的速度。排空时间则表征激光下能级向基态跃迁的速度。弛豫作用对放大器性能的影响程度与激光的脉冲宽度有关, 图 3 的计算结果表明, 在弛豫时间小于激光脉宽时, 输出能量随弛豫时间的减小将显著地增大。弛豫时间短有利于充分提取增益介质的储能。在热化时间远小于激光脉宽时, 输出能量的增长将趋于平缓, 这主要是由于快速的热化效应已使得各子能级的粒子全部用于放大, 能量的提取受限于增益

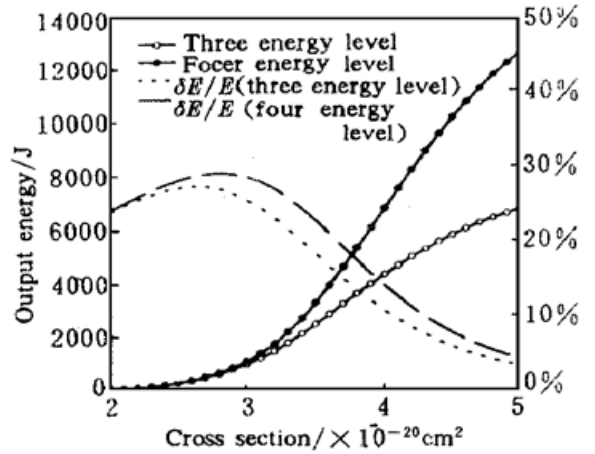


图 2 受激发射截面与放大器输出能量的关系及相互间的敏感关系

Fig. 2 Output energy of the amplifier vs stimulated emission cross section

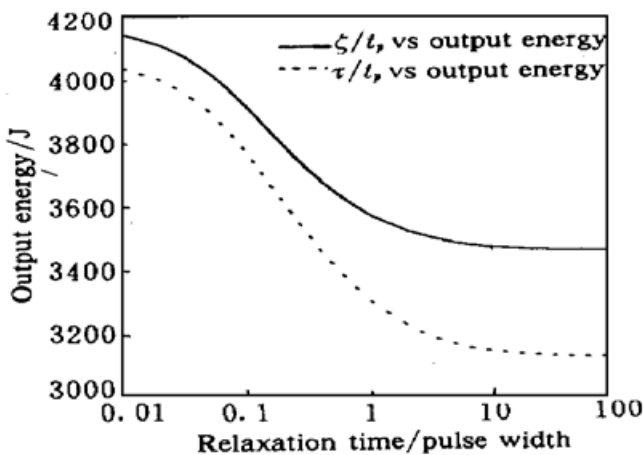


图 3 弛豫作用与放大器输出能量的关系曲线

$\zeta/t_p$  为热化时间与激光脉冲宽度之比

$\tau/t_p$  为下能级排空时间和激光脉冲宽度的比

Fig. 3 Output energy of the amplifier vs ratio between relaxation time and pulse width

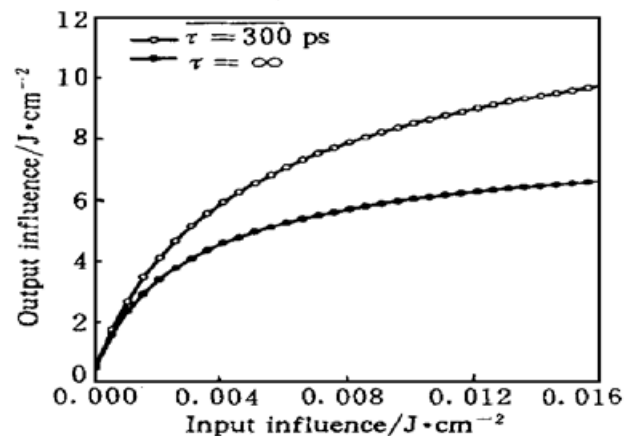


图 4 下能级排空时间对于放大器输入输出能密度关系的影响。考虑下能级排空效应的影响 ( $\tau = 300 \text{ ps}$ ), 不考虑排空效应的影响 ( $\tau = \infty$ )

Fig. 4 The laser output fluence dependence of the input fluence with different terminal lifetimes

饱和效应。对于激光下能级,迅速的排空效应使在整个脉冲的放大过程中始终保持较大增益系数,从而增大输出能量。根据最新直接测量的结果<sup>[2]</sup>,磷酸盐钕玻璃的下能级排空时间在 300 ps 左右,这时下能级的排空效应对于放大器的输出将产生显著的影响。图 4 给出了在考虑下能级排空效应和忽略下能级排空效应时能流输入、输出关系的比较。计算显示,排空效应对放大器的影响相当大,排空时间选取的精确与否对于放大器的能流计算的准确非常重要。另一方面,如果通过改变钕玻璃的掺杂参数提高弛豫速度,将会显著提高放大器输出能量。

### 3.3 非线性吸收

由于钕玻璃介质的非线性吸收和光强的平方成正比,造成在激光脉冲波形不同位置的非线性吸收不同,所以非线性吸收不仅影响放大器的增益,而且影响输出脉冲的形状,导致输出脉冲的形状发生畸变,半宽度变宽。增益介质中的光强较大时,非线性吸收所带来的影响将更为显著。图 5 计算了非线性吸收对于输入、输出能流密度关系所造成的影响。当放大器工作在较低能流密度时,非线性吸收的影响可以忽略不计,而工作在较高能流密度时,非线性的影响就必须加以考虑。由于非线性损耗系数  $\gamma$  值随钕玻璃介质中钕离子掺杂浓度的增大而变大,所以应在保证泵浦效率的前提下尽可能采用较低的掺杂浓度。

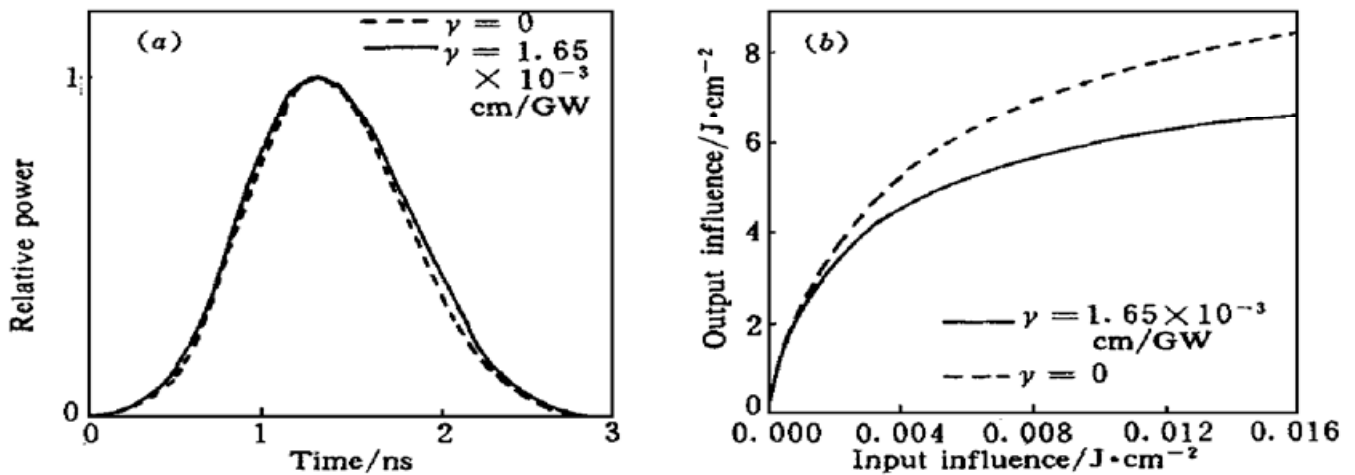


图 5 非线性吸收对于放大器性能的影响

(a) 激光脉冲形状; (b) 输入、输出能流关系

Fig. 5 Dependence of the performance of the amplifier on non-linear absorption

(a) Laser pulse time shape; (b) Dependences output fluence on input fluence

## 4 小 结

通过对影响放大器性能较显著的参数进行敏感度模拟分析后,可以得到以下一些结论:增益介质的受激发射截面积、激光上能级的热化时间、下能级的排空时间、非线性吸收系数是显著地影响放大器性能的物理因素。受激发射截面的增大与系统的输出能量成正比关系,激光上能级的热化时间和下能级的排空时间的作用相同,弛豫时间越快,输出能量越大,非线性吸收系数可以影响光束的空间分布和时间分布,在光强较大时必须加以考虑。此外,从计算中可以看出,由于上述参数对放大器有较显著的影响,要想准确地模拟放大器的工作状态,在放大器工作与参数较敏感区域就要求尽可能准确地得到上述参数的测量值,并且必须将模拟计算的程序与实际放大器的工作情况进行校核,建立准确的放大器模型以保证计算结果的可靠。

致谢 感谢中国工程物理研究院核物理与化学研究所张小民研究员和景峰博士的有益讨论和帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Peter C. Magnante. Influence of the lifetime and degeneracy of the  $^4I_{11/2}$  level on Nd-glass amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1972, **QE-8**(5): 440~ 448
- 2 Camille Bibeau, Stephen A. Payne, Howard T. Powell. Direct measurements of the terminal laser level lifetime in meodymium-doped crystals and glasses. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(10): 1981~ 1992
- 3 Camile Bibeau, John B. Trenholme, Stephen A. Payne. Pulse length and terminal-level lifetime dependence of energy extraction for neodymium-doped phosphate amplifier glass. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(8): 1487~ 1496
- 4 Wang Tao, Fan Dianyuan. Dynamics study for high power laser amplifier. *Acta Optica Sinica* (光学学报), (to be published) (in Chinese)
- 5 L. M. Frantz, J. S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(8): 2346~ 2349
- 6 Fan Dianyuan, Yu Wenyan. High power multi-pass amplifier. *Journal of Lasers* (激光), 1980, **7**(9): 1~ 6 (in Chinese)

## Influence of Laser Medium on Performance of the High Power Laser Amplifier

Wang Tao Fan Dianyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** Starting from laser rate equations including influence of energy level relaxation, influence of laser medium on the high power laser amplifier was studied in detail. An analysis of increasing efficiency of the amplifier was presented. The result obtained would be useful for the optimum design of the amplifier.

**Key words** high power laser amplifier, laser medium, optimum