

高功率激光放大器能流分布的模拟*

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 基于高功率激光放大器工作的动力学模型,开发了放大器能流分布的模拟软件,实现了对放大器主要性能的计算机模拟。软件采用了面向对象的程序设计方法,具有灵活构建光路的能力。通过与国外同类软件及“神光-1”装置的实验结果比较,表明本软件可以迅速而准确地仿真模拟各种激光放大器的能流分布。

关键词 高功率激光, 能流密度, 模拟, 对象

1 引 言

作为惯性约束聚变(ICF)驱动器的高功率激光放大器对于 ICF 的进一步深入研究起着关键作用。由于放大器构造复杂、造价高昂,所以在建造施工前必须进行准确的计算机仿真模拟,优化设计放大器的各项物理参数,以获得最佳的工程性能价格比。另一方面,在放大器的工作运行中,通过计算机模拟还可以辅助调整放大器的工作参数,保持放大器处于最佳工作状态,同时对于维护放大器,判明故障也具有参考作用。因此,自从惯性约束聚变提出以来,国外各著名实验室纷纷开发大量仿真计算程序用于模拟放大器的性能,指导放大器的设计和运行。例如,美国里弗莫尔国家实验室(LLNL)开发的 Malaprop 程序^[1]及俄罗斯 R. Serov 等开发的 Fresnel 模拟程序。然而,由于国外开发的软件存在一定范围的技术保密,特别是随着实验工作的深入进行,表述放大器工作的物理模型也在不断完善。为了准确模拟放大器的工作过程,结合实验独立开发完整的放大器仿真程序对于放大器的设计和稳定运行是很有必要的。

本文考虑了高功率激光放大器工作能级间弛豫作用的影响,采用包含弛豫作用的速率方程作为物理模型,开发了模拟放大器能流分布的“神光”能流模拟程序,实现了对国内外各种高功率激光器能流分布的仿真模拟。通过与国外同类软件及“神光-1”装置的实验结果相比较表明:该软件能够准确、灵活地模拟不同光路构型放大器的能流分布。目前,该能流模拟软件已用于我国新一代高功率激光放大器“神光-1”装置的原型设计。

2 物理模型

对于放大器的定量描述一般采用 Frantz-Nodvik 简化模型^[2],但对工作脉宽在 1 ns 左右

* 国家高技术 863-416-5-1 资助课题。

收稿日期: 1998-09-22; 收到修改稿日期: 1999-03-11

的高功率激光放大器, 需要把激光上下能级的 Stark 简并子能级作为单独的能级考虑, 所以速率方程组表示为^[3]

$$\begin{cases} \frac{\partial N_1(t)}{\partial t} = \phi\sigma[N_2(t) - N_1(t)] + \frac{1}{\zeta(1+k_1)}[N_1'(t) - k_1N_1(t)] - \frac{N_1(t)}{\tau} \\ \frac{\partial N_1'(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\zeta(1+k_1)}[N_1'(t) - k_1N_1(t)] \\ \frac{\partial N_2(t)}{\partial t} = -\phi\sigma[N_2(t) - N_1(t)] + \frac{1}{\zeta(1+k_2)}[N_2'(t) - k_2N_2(t)] \\ \frac{\partial N_2'(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\zeta(1+k_2)}[N_2'(t) - k_2N_2(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中 ϕ 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, $N_2'(t)$, $N_1'(t)$ 为亚稳态和终态其他 Stark 子能级的粒子总密度, σ 为增益介质的受激发射截面, c 为增益介质中的光速。放大过程中能级间的弛豫作用主要有两种: 一种是由于 Stark 能级分裂所引起的激光亚稳态及终态子能级间的热化效应, 另一种为激光下能级粒子向基态无辐射跃迁的排空效应, 考虑到 Stark 子能级间存在的玻尔兹曼关系, ζ 为描述热化效应快慢的热化时间, τ 表示激光下能级粒子向基态无辐射跃迁的排空时间, k_2 , k_1 分别代表激光亚稳态和终态的 Stark 子能级间的玻尔兹曼平衡比例系数。

无耗条件下光子输运方程表示为

$$\frac{\partial \mathcal{H}(z, t)}{\partial t} + c \frac{\partial \mathcal{H}(z, t)}{\partial z} = \sigma c \mathcal{H}(z, t) [N_2(t) - N_1(t)] \quad (2)$$

3 主要计算环节及程序处理

3.1 损耗的计算

上述(2)式为无耗条件下的输运方程, 对于存在一定损耗的实际放大器而言, 不仅线性损耗对放大影响显著, 而且当光强较大时, 非线性损耗也将显著影响放大器的性能, 一般与光强的平方成正比, 故(2)式可表示为

$$\frac{\partial \mathcal{I}(x, t)}{\partial x} = (\beta - \alpha)I - \gamma I^2 \quad (3)$$

I 为光强, β 为增益介质的增益系数, α 为线性损耗系数, γ 为非线性损耗系数。计算中采用集中损耗近似处理。

3.2 增益系数空间非均匀的影响

由于增益介质中的粒子数在处于高反转时将产生显著的放大自发辐射(ASE), 放大自发辐射将会消耗亚稳态的粒子数, 造成增益空间分布的非均匀, 影响放大器的输出能量。在增益系数较高和增益介质片口径较大时将显著影响放大器的性能, 故模拟计算中, 采用空间网格法, 并拟合探针增益实验测量的数据得到空间网格内的增益系数。

3.3 多通放大的处理

多通放大过程中, 激光在经过增益介质时, 受激放大使得反转粒子数进一步减小, 同时在整个放大过程中及两程放大的间隔时间里, Stark 子能级间粒子数的弛豫作用又将补偿反转粒子数, 所以多通放大过程中增益介质的增益系数是随两种不同作用而变化的, 需要通过反转

粒子数密度与增益系数的关系求得。

3.4 B 积分的计算

B 积分是衡量自聚焦程度的大小, 表征局部自聚焦的强度及波面非线性像差大小的物理量, 是高功率放大器的一个重要参数。B 积分的表达式为

$$B(x) = \frac{8\pi^2}{\lambda_0 c} \times 10^7 \int_0^x \frac{n_2}{n_0} I(z) dz \tag{4}$$

n_2 为非线性折射率系数, n_0 为线性折射率。B 积分值越大则表明非线性自聚焦的程度越严重。由于空间光强的非均匀, 所以只需计算空间分布中 B 积分的最大值。

3.5 面向对象的程序设计方法

在整个光路中将存在多个光学元件, 为了程序计算的准确和维护的方便, 引入面向对象的设计方法。由于光学元件存在许多相同性质和操作, 所以首先建立光学元件基类。基类中包含所有光学元件的一般属性及操作函数, 对于具体光学元件将作为单独对象处理, 通过继承光学元件基类而得到光学元件的一般属性和操作, 同时又可以包含其特有参数及操作函数, 具有外部的封装性。类结构见图 1, 基类为 Elements 类, 派生的子类为光学元件类, 子类继承 Elements 类的公共属性及操作, 同时利用类的多态性完成各元件特有的具体操作与计算。

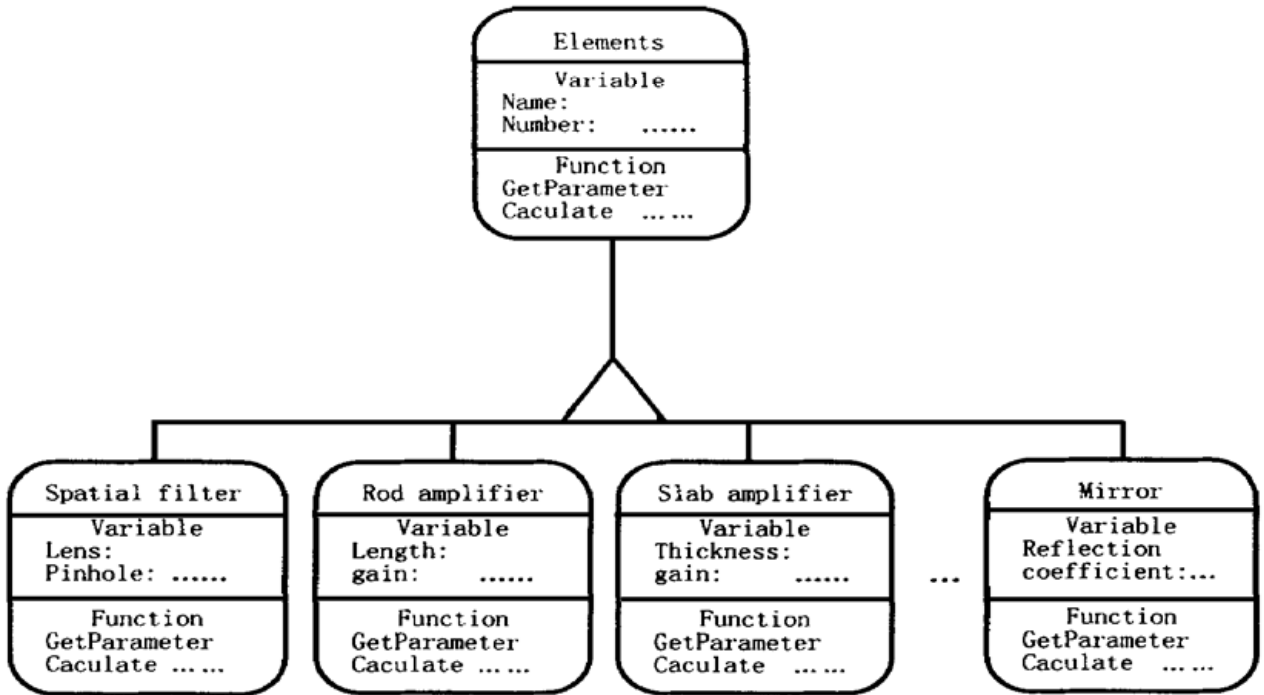


图 1 元件基类与派生类的关系简图

Fig. 1 Simplified diagram for relation between element base class and derived class

3.6 光路构型的动态形成及程序流程

定义元件序号作为元件基类的数据, 该属性将为各元件子类所继承, 并作为在光路中计算的顺序号。整个光路构成一元件对象的列表, 增添、减少光学元件及修改光路构型就是对列表的操作。计算时, 各对象间的计算参数经过公共数据区传递, 并按照元件序号计算各个光学元件, 从而达到沿光路计算的目的。这样就使所计算的光路是动态形成的, 避免了只能对固定光路进行计算, 增加了程序的灵活性。同时采用科学计算可视化的程序设计方法, 利用鼠标的拖拉操作完成光路的构建与调整, 增强了程序的易用性。程序的计算流程参见图 2。

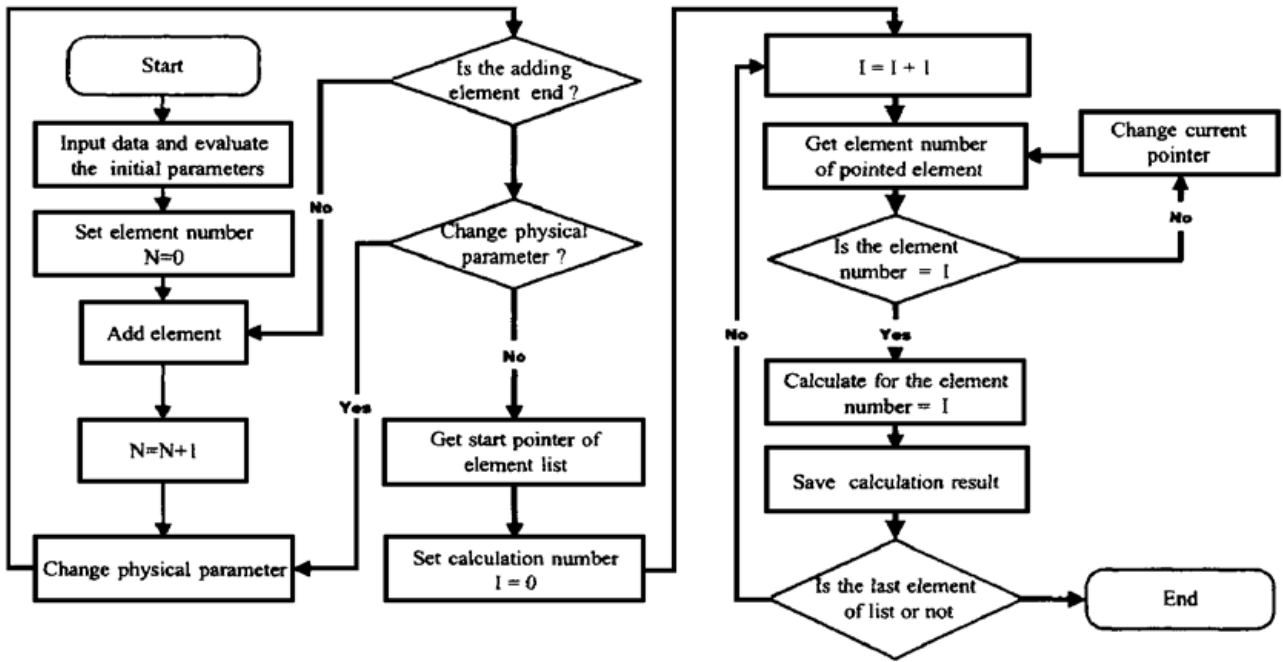


图 2 放大器能流模拟程序的流程图

Fig. 2 Flow diagram for simulation program of amplifier

4 模拟结果的比对

采用“神光”能流模拟软件,参照美国国家点火装置(NIF)的光路构型^[4]进行模拟计算,结果分别与美国劳伦斯·里弗莫尔用于NIF设计的Chainop程序及俄罗斯的Fresnel模拟程序计算得到的结果相比较(见表1),计算所采用的主要参数:

受激发射截面 $\sigma = 3.36 \text{ cm}^2$; 小信号增益系数 $\beta = 0.05 \text{ cm}^{-1}$; 线性损耗系数 $\alpha = 0.004 \text{ cm}^{-1}$; 增益介质厚度 $d = 3.363 \text{ cm}$; 增益介质折射率 $n_0 = 1.528$; 放大器增益介质片数为 $9.5 \dots 5$; 输入能量 $E_{in} = 1.6864 \text{ J}$; 能级热化时间 $\zeta = 100 \text{ ns}$; 下能级排空时间 $\tau = 1 \text{ ns}$; 非线性损耗系数 $\gamma = 1.65 \times 10^{-3} \text{ cm/GW}$ 。

表 1 不同程序的计算结果的比较

Table 1 Comparison of simulated results by different programs (J)

No.	Chainop(NIF)		Fresnel		SG	
	Input energy	Output energy	Input energy	Output energy	Input energy	Output energy
Amp(1st pass)	1.68	4.08	1.68	4.08	1.68	4.10
Amp(1st pass)	3.69	8.95	3.69	8.98	3.72	9.10
Amp(1st pass)	8.91	44.6	8.94	44.7	9.07	44.9
Amp(2nd pass)	44.1	218	44.3	218	44.9	221
Amp(2nd pass)	217	516	218	520	220	527
Amp(3rd pass)	420	950	429	974	429	985
Amp(3rd pass)	946	3850	971	3937	981	3803
Amp(4th pass)	3810	9040	3898	9217	3765	8920
Amp(4th pass)	9000	13700	9181	14050	8884	13860
Amp(2nd pass)	12400	18300	12830	19000	12570	18800

可以看出: 计算结果较为一致, 特别是在前两程放大过程中, 计算的误差很小, 总体而言, 最大相对误差不大于 3%。为了验证对实验的模拟准确性, 我们又对我国神光-1 装置第四路的部分实验结果进行了模拟计算。该装置主放大器为 $\phi 200$ mm 同轴双程放大方式, 激光首先经由 $\phi 100$ mm 棒状放大器放大后注入主放大器。由于测量原因, 不能直接给出放大器增益介质的增益和损耗参数, 所以首先依靠小信号测量总体损耗折算损耗系数, 故损耗参数较实际值大, 再通过实验测量结果拟合得到 $\phi 100$ mm, $\phi 200$ mm 片状放大器的增益系数, 最后模拟计算出放大器的输出能量。以 $\phi 70$ mm 棒状放大器输出能量的实验值作为模拟计算的能量输入参数, 能量模拟结果见表 2, 模拟得到的输出能量与实验结果基本相符。

表 2 模拟计算结果与“神光-1”放大器实验数据的比较

Table 2 Comparison of simulated result and experimental result for SG-1

No.	Input energy /J	Output energy /J	Gain coefficient/cm ⁻¹		Loss coefficient /cm ⁻¹
			$\phi 100$ mm	$\phi 200$ mm	
Experimental data	21.32	24.16	.....	.....	.....
Simulated results	21.32	25.91	0.0597	0.0	0.00665
Experimental data	27.56	157.0	.....	.....	.....
Simulated results	27.56	162.0	0.0597	0.036	0.00665
Experimental data	29.06	152.6	.....	.....	.....
Simulated results	29.06	170.4	0.0597	0.036	0.00665
Experimental data	16.58	103.6	.....	.....	.....
Simulated results	16.58	99.0	0.0597	0.036	0.00665

5 结束语

由于影响放大器性能的物理参数较多, 特别是部分物理参数的影响较显著, 所以必须进行准确实验校核。在上述所做的模拟计算中, 由于实验条件所限, 增益介质的能级热化时间和排空时间均采用了磷酸盐玻璃的典型值, 这在一定程度上带来了误差, 另一方面, 计算中并未考虑小尺度自聚焦所造成的局部饱和效应的影响, 光束传播过程中的波前畸变也未考虑, 这些因素也将导致计算的不准确, 所以物理模型仍需不断完善。

致谢 感谢西南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 William W. Simmons, John T. Hunt, William E. Warren. Light propagation through large laser systems. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9): 1727~ 1744
- 2 L. M. Frantz, J. S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(8): 2346~ 2349
- 3 Wang Tao, Fan Dianyan. Dynamics study for high power laser amplifier. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(4): 468~ 473 (in Chinese)
- 4 B. M. Van Wonterghem, C. E. Barker, J. R. Murray *et al.*. System description and initial performance results for beamlet. *ICF Annual Report 1995*: 1~ 17, Lawrence Livermore National Laboratory. Livermore, CA, UCRL-LR-105820-95
- 5 William Ford, William Topp. *Data Structures with C++*. Prentice-Hall International, Inc. 1996: 409~

434

Simulation of Fluence Distribution for High Power Laser Amplifier

Wang Tao Fan Dianyuan

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

Abstract Based on physical model of high power laser amplifier, simulation software used to analyze laser fluence distribution and performance of amplifier was developed. The object-oriented design method is applied in the software and different laser amplifier can be simulated. By comparison with the simulated results by the other simulation softwares and experimental results of SG⁻ laser amplifier, it can be showed that this software can simulate different laser amplifier flexibly and truly.

Key words high power laser amplifier, fluence, simulation, object

钛宝石激光器抽运 Cr⁴⁺, Yb³⁺·YAG 晶体薄片获得 1.03 μm 自调 Q 激光输出

我们最近进行了用钛宝石激光器抽运 Cr, Yb·YAG 晶体的实验, 获得了 1.03 μm 自调 Q 激光输出。实验所用的 Cr, Yb·YAG 晶体是本课题组用提拉法生长的, Cr 和 Yb 的浓度分别为 0.5 at.-% 和 10 at.-%。用 Ar⁺ 离子激光器抽运的钛宝石激光器作为抽运源, 抽运光波长为 940 nm, 功率为 1 W 左右。激光腔设计成折叠腔, 抽运光经过一个焦距为 75 mm 的透镜和腔镜后, 聚焦在 10 mm×10 mm×1 mm 的 Cr, Yb·YAG 晶体薄片上。晶体薄片固定在热沉板上, 热沉板通恒温循环水冷却。腔镜的一面镀 940 nm 增透膜, 另一面镀 940 nm 增透膜和 1.03 μm 高反膜。晶体的输入面镀 940 nm 和 1.03 μm 增透膜, 另一面镀 940 nm 和 1.03 μm 高反膜, 激光经过一个输出耦合率为 3% 的输出耦合镜后输出, 腔长为 23 cm。在室温下, 当输入功率为 750 mW 时, 实际入射到晶体上的抽运功率为 675 mW, 得到平均功率为 32 mW, 脉宽 (FWHM) 为 500 ns 的 1.03 μm 自调 Q 激光输出脉冲。晶体的振荡阈值功率约为 500 mW, 脉冲斜率效率为 3.5%, 脉冲重复率为 40 kHz。

下一步我们将采用 LD 抽运, 以期获得更高效率和功率的激光输出, 有关工作正在进行中。

本课题得到上海科技启明星项目(编号: 97QE14027)资助。

中国科学院上海光机所 上海 201800

董俊 邓佩珍 刘玉璞 张影华 徐军 陈伟

2000-01-26 收稿