

# 多段阵列式放大器特性的计算模拟\*

冯国英 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)

**摘 要** 考虑了从电容器储能到激光介质储能的多个能量转换环节, 引入时间因子和三维空间放大自发辐射, 对多段阵列式放大器(MSA)性能作了详细的计算模拟, 包括多段阵列式放大器的中间和边缘闪光灯阵列间的泵浦平衡、储能、增益系数和增益分布等重要激光参数随时间的变化, 用利弗莫尔实验室的实验参数对本文的程序进行了校核, 并演示了该程序的预估能力。

**关键词** 多段阵列式放大器, 增益分布, 储能。

## 1 引 言

惯性约束聚变(ICF)对激光系统的设计提出了十分严格的要求, 多段阵列式放大器(MSA)作为主放大器是固体激光系统的主要组成部分, 不仅占总造价的很大比例, 而且对输出激光光束质量、能量等有很大的影响。近年来, 美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)、法国里梅尔实验室和俄罗斯瓦维洛夫光学中心等都在对这类多段阵列式放大器结构作深入研究<sup>[1-6]</sup>。建立完整的计算多段阵列式放大器性能模型是较为困难的, 必须从放电网络出发, 考虑闪光灯辐射的时间特性和空间特性、介质的吸收特性、泵浦腔构型和三维放大自发辐射等, 能量转换环节多, 需引入的参数非常多、计算量非常大。为便于校核, 还应当留出多个中间过程计算结果出口以进行单元实验校核。最后得到的软件必须能定量估算多段阵列式放大器的时间特性和空间特性。本文作者进行了物理模型的建立和复杂的总程序编制工作, 并作了优化设计。

## 2 基本原理

激光介质的储能效率由电光效率、光传输效率、光能吸收效率、量子效率及斯托克斯损耗、反转粒子数等转换环节决定, 具体的计算模拟由以下几个方面组成: 放电网络的计算模拟, 通过模拟不同参数的放电网络的放电过程, 计算出电容器储能到脉冲氙灯电能电效率; 脉冲氙灯的计算模拟, 通过模拟脉冲氙灯的放电特性及其不同放电电流强度下的光谱辐射, 计算出脉冲氙灯的电光效率和功率辐射谱, 计算中放电网络节数、电容、电感和脉冲氙灯参数等均可方便地改变; 泵浦腔的光传输模拟, 通过计算不同的泵浦腔构型、反射器反

\* 国家高技术惯性约束聚变委员会、惯性约束聚变青年科学基金和四川省青年科技基金会的资助课题。

收稿日期: 1998-02-17; 收到修改稿日期: 1998-06-01

射率和形状等情况下泵浦光辐射的传输, 计算出泵浦腔的光传输效率; 介质吸收光辐射的计算模拟, 通过计算不同掺杂浓度、厚度的激光介质对不同入射位置和方向的光的吸收特性, 计算出介质的吸收效率, 其中, 介质的谱吸收特性是根据实际介质的谱吸收曲线测量值用多个洛仑兹函数拟合得到; 放大自发辐射(ASE)的计算模拟, 通过计算激光介质在吸收光辐射的同时又在消耗反转粒子数, 可以计算出介质内的实际储能和放大的自发辐射对增益分布的影响等, 计算中, 介质的几何形状为矩形板、椭圆柱形等任意形状, 介质的受激发射截面和吸收系数可根据实际情况设定。其中的每一个环节都需要正确的计算模拟, 因为它关系到放大器激光性能模拟及预估的正确性。

## 2.1 时间因子的引入

不同的放电网络参数产生不同的放电脉冲波形。选择合适的电路参数和节数, 用龙格库塔方法解以下的(1)式, 可得供电电流波形<sup>[7]</sup>。在不同的放电电流波形下, 各时刻脉冲氙灯辐射谱和吸收谱不同, 从而影响氙灯的光传输效率、介质吸收效率等; 另外, 激光介质在接收闪光灯辐射增加反转粒子数密度的同时, 又由于自发辐射和放大的自发辐射(ASE)消耗反转粒子数, 这都与时间有很重要的关系。因此, 时间因子的引入对精确描述多段阵列式放大器性能是非常重要的。

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{d}{dt} \left( \sum_1^n i_m \right) + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt + K_0 \sqrt{\sum_1^n i_m + R_1 \sum_1^n i_m} &= V_0 \\ L_2 \frac{d}{dt} \left( \sum_2^n i_m \right) + \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2 dt - \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt + R_2 \sum_2^n i_m &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ L_n \frac{d}{dt} \left( \sum_n^n i_m \right) + \frac{1}{C_n} \int_0^t i_n dt - \frac{1}{C_{n-1}} \int_0^t i_{n-1} dt + R_n \sum_n^n i_m &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $L_m$ 、 $C_m$ 、 $R_m$  是各支路的电路参数, 支路电流为  $i_m$ ,  $K_0$  为氙灯参数,  $V_0$  为储能电容的充电电压,  $t$  为时间参数。

作为计算和校核的例子, 设计了 4LC 放电网络, 各支路的电容均为  $100 \mu\text{F}$ , 各支路电感均为  $40 \mu\text{H}$ , 各支路电阻均为  $0.1 \Omega$ , 氙灯的内径为  $\Phi 6 \text{ mm}$ , 极间距为  $100 \text{ mm}$ , 氙气的压强为  $2.666 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。流过灯的放电电流波形和灯光波形的计算结果如图 1(a) 和图 1(b) 所示。实验测得氙灯灯光波形如图 1(c) 所示。由图可见, 闪光灯灯光波形相对分布和脉宽的理论计算值与实验结果是相符的。

## 2.2 模型的简化

多段阵列式放大器与普通的泵浦腔不同, 有多根闪光灯、多段激活介质和多种几何排布方式, 以及多种反射器形状。文献[2]从实验的角度出发, 分别对“V”型(一片长)、“X”型(两片长)和“菱形”(两片长)三种最基本的构型进行实验, 外推出  $N$  ( $N$  为奇数) 片长多段阵列式放大器的平均增益系数  $\alpha_v$ :

$$\alpha_v = [\alpha_x + \alpha_l + (N - 2)\alpha_i]/N, \quad \alpha_i = \alpha_l + \alpha_x - \alpha_v \quad (2)$$

式中,  $\alpha_l$ 、 $\alpha_x$  和  $\alpha_v$  分别对应于“菱形”、“X”型和“V”型时测得的增益系数。 $\alpha_i$  为外推得到的中间

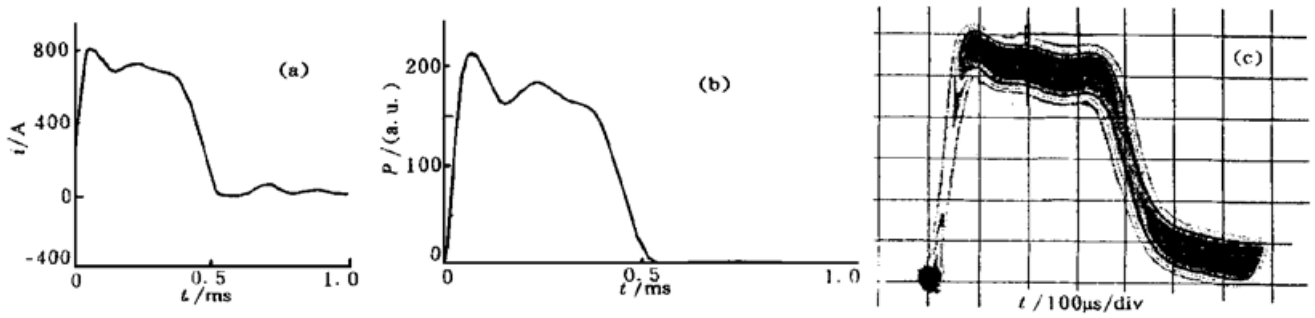


Fig. 1 Calculated (a) discharge current and (b) light power of flashlamp vs time. (c) Measured flashlamp pulse profile

片的增益系数。利弗莫尔实验室(LLNL)的5片长多段阵列式放大器的实验结果表明,外推值比实际值高,其原因是(2)式中没有考虑放大的自发辐射对增益分布的影响。由于5片长放大器的中间片的增益系数高,其放大的自发辐射衰减速率高于“菱形”、“X”型和“V”型片的衰减速率。若直接对它进行计算模拟,计算量相当大,因此,化整为零,分离出单片长(以  $e_0$  表示)、两端头(以  $e_1$  和  $e_2$  表示)和中间片( $m$  表示)等几个基本的模块,分别对它们进行计算模拟,计算中可明显看到中间片和端头处激光片的增益分布受放大的自发辐射的影响是不同的,得到增益系数  $\alpha_{e_0}$ 、 $\alpha_{e_1}$ 、 $\alpha_{e_2}$  和  $\alpha_m$  后再针对不同的片数  $N$  组合得到平均增益系数  $\alpha'_N$ :

$$\alpha'_N = \begin{cases} \alpha_{e_0} & N = 1 \\ [\alpha_{e_1} + \alpha_{e_2} + (N - 2)\alpha_m] / N & N = \text{奇数} \\ 2\alpha_{e_1} + (N - 2)\alpha_m \quad \text{or} \quad 2\alpha_{e_2} + (N - 2)\alpha_m & N = \text{偶数} \end{cases} \quad (3)$$

### 2.3 三维放大的自发辐射的计算模拟

为更真实地反映放大的自发辐射对激光介质储能和增益分布的影响,考虑了激光介质的三维形状、包边材料和包边部位的影响,设计了三维的放大自发辐射计算模型。激光介质内的储能以自发辐射的形式随机向  $4\pi$  空间辐射荧光,荧光在介质内沿直线前进,到达激光片的被泵浦面(表面被抛光)时遵从菲涅耳折反射定律,当荧光到达包边部位时被吸收,如图 2 (a) 所示。计算结果表明,由于片的长宽厚各不相同,放大的自发辐射对片的各个方向上增益分布的影响是不同的,介质内储能随时间而变化,储能达到最大时刻时片全口径上增益系数分布如图 2(b) 所示,在同一方向的不同位置上,增益分布形状和具体数值都是不同的。

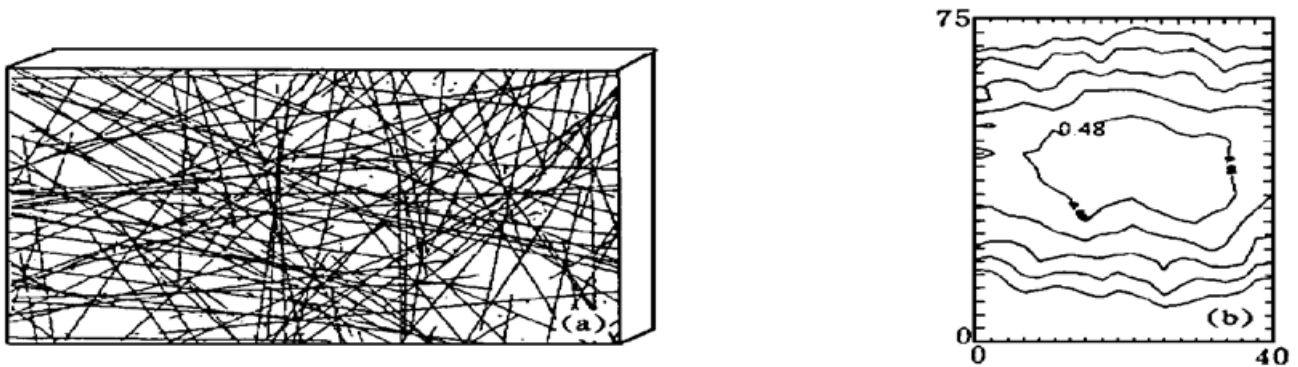


Fig. 2 (a) Schematic diagram of three-dimensional spatial ASE calculation. (b) Calculated gain coefficient distribution across the aperture of the slab

### 3 典型的计算结果

#### 3.1 泵浦平衡的研究

闪光灯阵列平衡泵浦有助于减小泵浦引入的光束偏转。利用文献[2]的实验参数,即在利弗莫尔实验室的单束元激光系统中,分别点亮片两侧的氙灯列阵,分别研究片上的增益分布和平均增益系数可以较清楚地看出泵浦是否平衡。氙灯内径为 2.5 cm,弧长为 91.4 cm,灯内充有气压为  $2.67 \times 10^4$  Pa 的 Xe 气,单次闪光的爆炸能量为 60 kJ。采用单网络 LC 回路来驱动两只串联的氙灯,每个回路的电容和电感分别为 208  $\mu$ F 和 140  $\mu$ H,脉冲长度  $3(LC)^{1/2}$  为 500 ms。每组中央氙灯列阵有 16 支灯,侧面氙灯列阵有 10 支灯。激光玻璃片由肖特公司制造(LG-750),尺寸为 4.0 cm  $\times$  42.4 cm  $\times$  76.4 cm,包边玻璃采用掺铜的 LG-750 玻璃。计算所得中央灯列阵和边缘灯列阵分别工作时的平均增益系数与灯爆炸系数的关系曲线如图 3 所示。计算结果表明,在不同爆炸系数下平均增益系数达到最大值的时刻是不同的,且随着爆炸系数的增大,达到最大爆炸系数的时刻逐渐超前。从图 3 可以看到,在氙灯爆炸系数从 0.05 到 0.25 整个范围内,边缘氙灯列阵和中央氙灯列阵的泵浦平衡在 5% 以内,中间氙灯列阵单独泵浦激光片得到的平均增益系数稍高于边缘氙灯列阵泵浦片所得到的平均增益系数,这与文献[2]所得的实验结果定量相符。

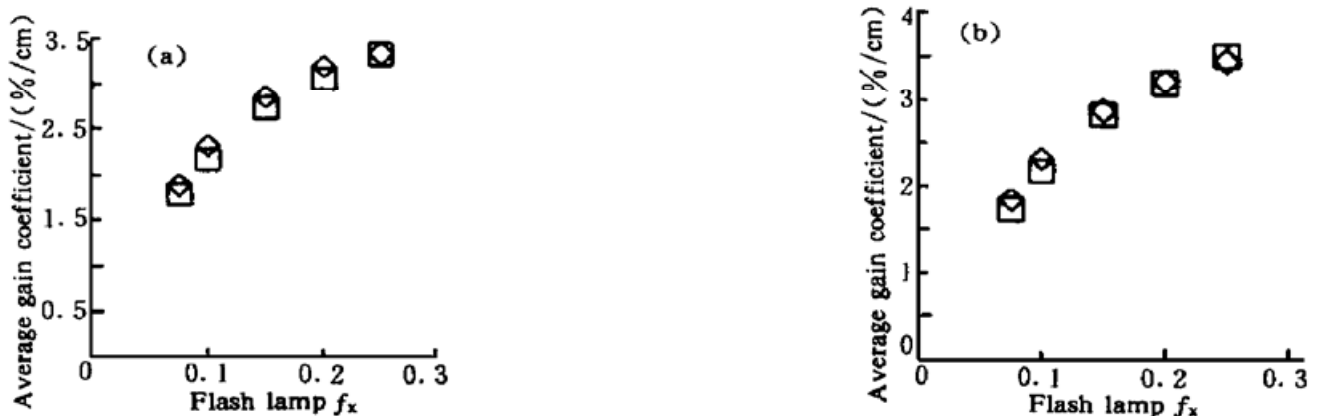


Fig. 3 Average gain coefficient vs flash-lamp explosion fraction. (a) Only the central array was fired (in the diamond configuration); (b) Only one of the side arrays was fired (in the X configuration). (□): experimental results at LLNL, (◇): our calculated results)

#### 3.2 储能和增益分布随时间的变化

由于闪光灯泵浦波形及放大的自发辐射的影响,不同时刻介质内的储能和增益分布是不同的。利用通光口径为 40 cm 的单束元放大器的实验参数,当灯的爆炸系数  $f_x = 0.2$  时,计算了菱型、X 型和 V 型放大器单元在片的垂直方向的中部的水平增益分布,如图 4 所示,图中可见,在光传输方向为单片长的 V 型放大器中水平方向增益分布是对称的,而在光传输方向为 2 片长的放大器中由于端头漏光效应的叠加,水平方向增益分布是不对称的,数值计算结果在定量上与实验相符。本文作者直接计算了端头片由于端头漏光效应泵浦较弱、放大的自发辐射影响较小时的水平增益分布,还计算了中间片泵浦较强、放大的自发辐射影响较大时的水平增益分布。这样,在光传输方向上有  $N$  片长的多段阵列放大器的增益分布就可由端头和中间片的结果组合而得到,较文献[2]中由“V”型、“X”型和“菱型”的实验值外推得到的结果(偏大)更接近真实值,因为中间片由于得到泵浦光更强,放大的自发辐射的消泵浦作用

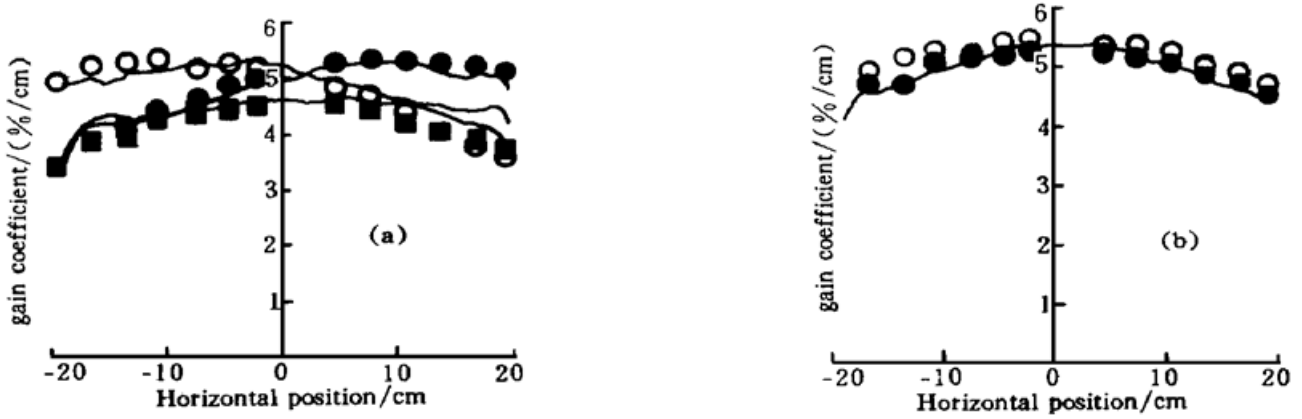


Fig. 4 Calculated horizontal gain distributions for (a) the V, diamond and X amplifier test configurations ( “●”, “○”, “■”: experimental results at LLNL, “—”: our calculated results), and (b) the five-slab-long Beamlet amplifiers ( “●”: experimental results at LLNL, “○”: predicted “extrapolated” performance, “—”: our calculated results)

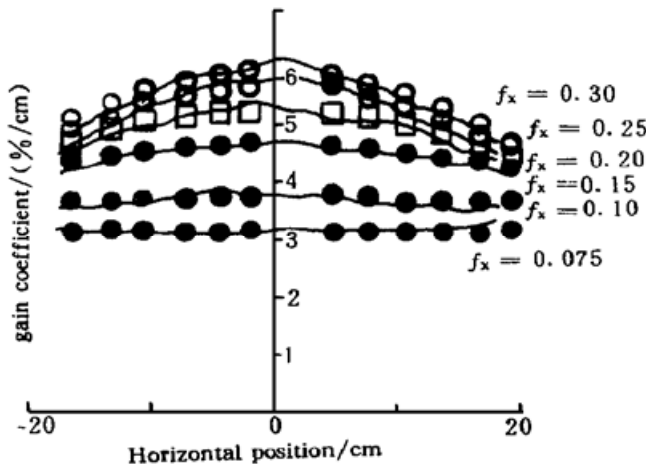


Fig. 5 Calculated horizontal gain distributions on the five-slab-long beamlet amplifier at six different flash-lamp explosion fractions. ( “●”, “○”, “■”: experimental results at LLNL, “—”: our calculated results)

则更强。计算所得在灯的 6 种爆炸系数下, 5 片长单束元放大器的平均增益系数水平增益分布如图 5 所示, 图中符号表示实验测量值和外推值。从图 5 中可以看到, 当灯的爆炸系数  $f_x = 0.075$  时, 增益小, 增益分布是均匀的, 随着灯的爆炸系数增加, 增益系数变大, 平均增益系数增加, 放大的自发辐射优先使激光玻璃片的边缘产生消泵浦作用, 且随着片的平均增益系数的增大, 消泵浦作用更加严重, 这与文献[2]的实验结果(图 4 中用符号表示)在定量上是相符的。本文作者还计算了当灯的爆炸系数  $f_x = 0.3$  时, 单束元放大器的储能和水平增益分布随时间的变化, 如图 6 所示。随着时间的增加, 激光介质内的储能增加, 当增益足够高时, 放大的自发辐射变得明显, 消耗大量储能, 随着时间的增加, 储能不但不增加,

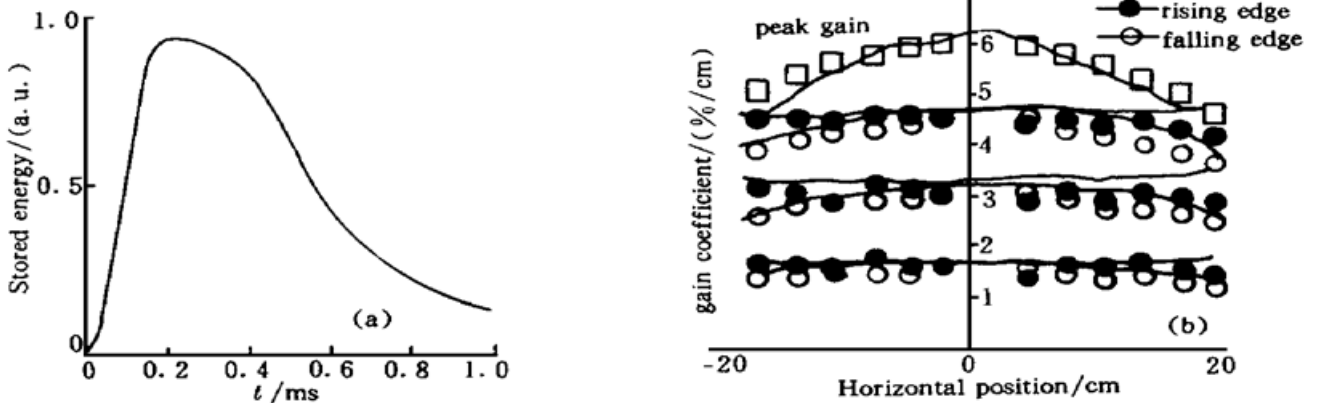


Fig. 6 (a) Calculated stored energy of laser medium vs time. (b) Calculated horizontal gain distributions at different time, when  $f_x = 0.3$ . ( “●”, “○”, “■”: experimental results at LLNL, “—”: our calculated results)

反而逐渐减小。图 6(a) 中, 在  $t = 290 \mu\text{s}$  时刻, 介质的平均增益系数最大, 储能最大, 在这一时刻通过介质的脉冲激光可获得最大的增益和带走最大的能量。对于单网放电, 在实际操作时, 一般约在灯光波形下降 1/3 的时刻注入激光。若为了提高氙灯寿命或多通放大, 使用多节网络产生特殊放电波形, 则需通过软件的精确模拟找到合适的注入时刻。不同时刻水平增益分布如图 6(b) 所示, 与文献[2]的实验结果定量相符。

**结 论** 报道了计算多段阵列放大器性能的总程序。该程序考虑了多种因素对多段阵列放大器增益性能的影响, 不仅考虑了时间特性, 还考虑了空间分布特性, 可直接从放电网络电容器的储能计算出放大器的储能、储能效率、增益和增益分布等多个重要激光参数随时间和空间的变化, 显示了较强的预估能力。文中还用已公布的利弗莫尔实验室的实验结果作了比较, 保证了计算结果的准确性。该程序针对我国研制的多段阵列式放大器的特点作适当改变后, 可用于新一代高功率固体激光驱动器主放大器的设计和计算模拟。

对中国科学院上海光学精密机械研究所范滇元院士和林尊琪教授对本项工作进行的有益讨论和帮助致以衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Powell H T, Eriandson A C, Jancatis K S *et al.*. Flashlamp pumping of Nd-glass disk amplifiers. *Proc. SPIE*, 1990, **1277**: 103~ 120
- [2] Erlandson A C, Rotter M D, Frank D N *et al.*. Design and performance of beamlet amplifier. *UCRL-LR-105821-95-1*, 1995, 18~ 28
- [3] Murray J E, Powell H T, Woods B W. Optimized flashlamp pumping of disc amplifiers. *Proc. SPIE*, 1986, **609**: 95~ 108
- [4] Van Wonterghem B M, Caird J A, Barker C E *et al.*. Recent results of the national ignition facility beamlet demonstration project. *Proc. SPIE*, 1995, **2633**: 22~ 28
- [5] Jancatis K S, Haney S W, Munro D H. A 3-dimensional ray-trace model for predicting the performance of flashlamp-pumped laser amplifiers. *Proc. SPIE*, 1997, **3047**: 106~ 112
- [6] Donnat P, Treimany C, L'hullier N *et al.*. The miro software: a brief presentation. *Proc. SPIE*, 1997, **3047**: 102~ 105
- [7] 波尔科夫 N B, 巴枯连柯 B M 著, 沃新能校. 激光器的电源. 北京: 科学出版社, 1980. 132~ 137

## Numerical Simulation of the Multi-Segment Amplifier

Feng Guoying      Lü Baida

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

(Received 17 February 1998; revised 1 June 1998)

**Abstract** Considering the transformation from stored energy of electric capacitors to that of the laser medium, and introducing the temporal factor and three-dimensional spatial amplified spontaneous emission (ASE), numerical calculations have been performed to simulate the characteristics of the multi-segment amplifier (MSA), including temporal changes in the pumping balance between central and side flashlamp arrays, stored energy, gain coefficient and gain distribution of the MSA. The present numerical codes have been verified with the experimental data of LLNL, demonstrating the ability of the predicted performance for the MSA.

**Key words** multi-segment amplifier, gain distribution, stored energy.