

# 高功率固体激光性能仿真模型

王文义<sup>1</sup> 赵润昌<sup>1</sup> 粟敬钦<sup>1</sup> 莫磊<sup>1</sup> 李阳春<sup>2</sup> 王方<sup>1</sup> 刘兰琴<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)  
(<sup>2</sup> 中国工程物理研究院计算机应用研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 为实现高功率固体激光装置的能量平衡和功率平衡,开发了激光性能仿真模型为神光-III原型装置的运行提供实时预测。模型能够确定系统参数设置(注入能量、注入脉冲波形和参数诊断衰减设置等)。注入能量的预测采用基于以往实验数据的放大曲线拟合方法。平顶脉冲的注入波形预测采用循环迭代算法,整形脉冲波形的预测采用增益-通量曲线法。参数诊断衰减设置是通过基于 SG99 光传输放大模型的全光路模拟计算实现。对原型装置的仿真表明,能量预测偏差在 5% 以内;基频光束间能量分散度可控制在 10% 以内。模型已成为神光-III原型装置运行仿真的有效工具。

**关键词** 固体激光器; 仿真模型; 线性回归; 增益-通量曲线; 神光-III原型装置

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0023

## High-Power Solid-State Laser Performance Simulation Model

Wang Wenyi<sup>1</sup> Zhao Runchang<sup>1</sup> Su Jingqin<sup>1</sup> Mo lei<sup>1</sup> Li Yangchun<sup>2</sup>

Wang Fang<sup>1</sup> Liu Lanqin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)  
(<sup>2</sup> Computer Application Institute, China academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** To realize energy balance and power balance of high-power solid-state laser facility, laser performance simulation model (LPSM) is developed to provide real-time prediction for the Technical Integration Line (TIL). This model is used to determine the system setpoints, such as injection energy, injection pulse shape, attenuations, and laser diagnostic settings. Injection energy is predicted by fitting the amplification curve based on diagnostic energy feedback from previous TIL shots, input pulse shape for flat-top pulse output by iterative loop method, temporally shaped pulse shape by the method of gain-fluence curve, and laser power and energy for laser diagnostic settings by beam propagation and amplification code named SG99. Real-time adjustments of the model parameters allow the LPSM to predict energy within 5%, and provide energy balance within the eight beamlines less than 10% (root-mean-square) for shots varying from 0.5 to 4 kJ (1053 nm) per beamline. The LPSM has been a crucial tool in the commissioning of the TIL.

**Key words** solid-state laser; simulation model; linear regression algorithm; gain-fluence curve; technical integration line (TIL)

## 1 引 言

实现大型激光装置能量平衡和功率平衡,满足物理实验要求,需要对每束激光的特性进行精确控制。大型激光装置的安全稳定运行,需要对装置关键位置的激光通量分布、光束质量进行准确合理的评估,降低光学元器件的损伤风险。美国劳仑兹-里弗莫尔国家实验室已经建成指导国家点火装置(National

Ignition Facility, NIF)运行的激光性能运行模型(Laser Performance Operation Model, LPOM),指导 NIF 激光参数设置,光路自动准直控制,激光测量系统设置和光学元件损伤预测<sup>[1,2]</sup>。为此,设计和开发了神光-III原型装置(TIL)的激光性能仿真模型(Laser Performance Simulation Model, LPSM)。

**基金项目**: 国家 863 计划( )资助课题。

**作者简介**: 王文义(1975-),男,硕士,助理研究员,主要从事高功率激光装置的光传输、放大等方面的研究。

E-mail: wang-wen-yi@tom.cn

## 2 激光性能仿真模型描述

### 2.1 模型的组成和功能

LPSM 主要由计算模型和数据库两部分组成。计算模型包括频率转换模型,激光能量预测模型,激光脉冲时间波形预测模型和 SG99 光传输放大模型。数据库包括在线光学元件数据,增益参数数据和仿真结果。

LPSM 除了能够比较准确地模拟 TIL 八路激光传输、放大和倍频等物理过程外,还具备三个主要功能,即根据发射要求预测激光参数、模拟发射及数据分析和报告。各系统在调试阶段,根据 LPSM 预测的激光参数调试激光器的运行参数满足激光能量和脉冲波形要求;通过模拟发射给出诊断位置的激

光参数(能量或功率)以保护测量设备的安全;数据分析和报告通过对比分析模拟和实验数据,判断模拟发射是否成功,并根据对比结果适当修正模拟参数以便更好地指导下次发射前的激光性能仿真。

### 2.2 模型的工作流程

LPSM 根据发射要求,调用实验数据库、光学元件数据库和增益参数数据库,预测脉冲能量和波形,然后把模拟发射结果(激光发射设置文件)发送给总控,并由总控发送到各个系统(前端、预放、主放、靶场和参数诊断),指导各个系统的激光参数设置。最后总控将发射后的参数诊断结果反馈给仿真系统,通过对比分析模拟和实验结果形成发射评估报告(图 1)。

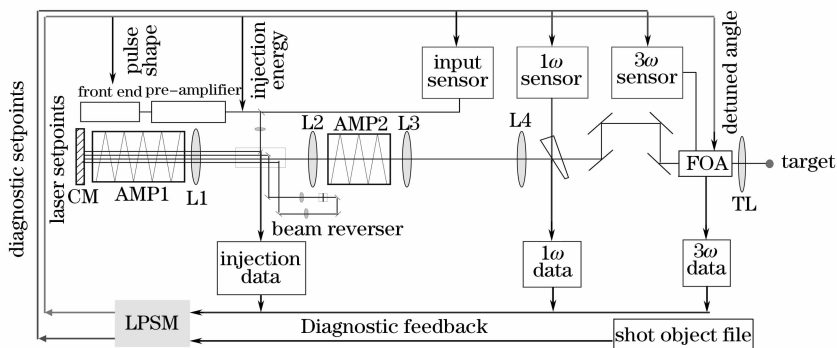


图 1 LPSM 工作流程图

Fig. 1 Illustration of the LPSM shot setup process

### 2.3 模型的关键算法

#### 2.3.1 激光能量预测

激光能量的预测按“由后至前”的顺序分步进行,即  $3\omega$  能量  $\rightarrow 1\omega$  能量  $\rightarrow 1\omega$  注入能量。 $3\omega$  能量到  $1\omega$  能量的预测通过经验的转换效率或按频率转换理论的反迭代计算实现; $1\omega$  能量到注入能量的预测采用基于 SG99 放大模型<sup>[3]</sup>的反迭代计算方法<sup>[4,5]</sup>或基于近期实验数据的曲线拟合方法。前者耗时较长,且参数齐全才能给出满意的结果;而后者在很大程度上可以减小参数不完全或不确定等因素造成的偏差,且计算快速。基于实验数据的曲线拟合方法,是通过以往实验测得的、放大器工作参数相同时的输入和输出能量数据拟合放大曲线求解注入能量。这里采用线性回归算法<sup>[6]</sup>,针对两种类型(无损耗的 F-N 方程<sup>[7]</sup>和指数衰减函数)的拟合方程对 TIL 的主放大级放大曲线进行了拟合。

线性回归算法具体过程如下:

1) 将曲线方程转化为线性方程  $y = y_0 + bx$  的形式,  $b = L_{xy}/L_{xx}$ ,  $y_0 = \bar{y} - b\bar{x}$ ,  $L_{xy}$  是  $X$ 、 $Y$  的离均

差积和,即

$$L_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}),$$

$L_{xx}$  是  $X$  的离均差平方和,即

$$L_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2,$$

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\},$$

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\};$$

2) 求解线性相关系数  $R$  最大时的各常数项  $[R = \sqrt{(L_{xy} \cdot L_{xy}) / (L_{xx} \cdot L_{yy})}]$ ,  $L_{yy}$  是  $Y$  的离均差平方和,即

$$L_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2.$$

对指数衰减型方程  $y = y_0 + a \exp(-x/t)$ , 首先令  $x' = \exp(-x/t)$ , 则  $y = y_0 + ax'$  (线性方程); 然后在常数项  $t$  的取值范围  $(0 \rightarrow +\infty)$  内循环判断  $R$  是否最大, 将  $R$  取最大值时的  $t$ 、 $b$ 、 $y_0$  带入原方程, 即得到拟合曲线方程。

对无损耗的 F-N 方程

$$F_{out} = F_s \ln\{1 + G_0[\exp(F_{in}/F_s) - 1]\},$$

为方便可将方程变为

$$E_{out} = E_s \ln\{1 + G_0[\exp(E_{in}/E_s) - 1]\},$$

这样  $E_{out}$  为输出能量,  $E_{in}$  为输入能量,  $E_s$ 、 $G_0$  是待求常数。令  $x = \exp(E_{in}/E_s)$ ,  $y = \exp(E_{out}/E_s)$ , 则 F-N 方程变为  $y = y_0 + G_0 x$ ,  $y_0 = 1 - G_0$ 。然后, 在  $E_s$  的取值范围 ( $0 \rightarrow +\infty$ ) 内寻找  $R$  最大时的  $G_0$ 。

放大曲线拟合结果(图 2)表明:线性回归算法能够准确求解这两种拟合方程的各常数项;在一定范围内( $1\omega$  输出能量大约在 4.5 kJ 以下)指数衰减函数和 F-N 方程的拟合曲线都能够很好地吻合实验数据;但当注入能量很大时根据 F-N 方程得到的拟合曲线不能反映能量放大的增益饱和特性,而指数衰减方程恰好相反,因而实际应用过程中,指数衰减函数拟合更具有普适性。

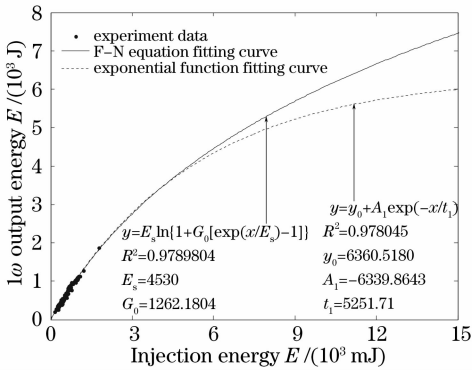


图 2 指数函数和 F-N 方程的拟合曲线对比

Fig. 2 Fitting curve comparison between exponential function and F-N equation

### 2.3.2 激光脉冲波形预测

激光脉冲波形预测也按“由后至前”的顺序分步进行,即  $3\omega$  脉冲波形  $\rightarrow 1\omega$  脉冲波形  $\rightarrow$  注入脉冲波形。对整形脉冲,因  $1\omega$  强度不同其转换效率也不同,所以  $1\omega$  脉冲波形预测通过理论计算的“ $I + \Pi$ ”类频

率转换效率曲线和发射要求的  $3\omega$  脉冲波形共同求解(图 3)。对于平顶脉冲,频率转换过程对平顶脉冲畸变影响很小,即可近似认为基频光也为平顶脉冲,此时可以简化  $1\omega$  脉冲波形求解过程。

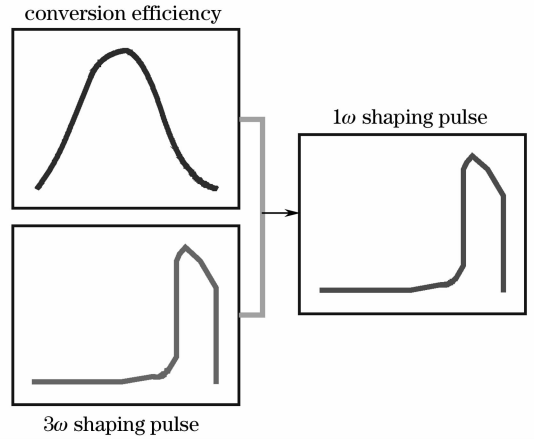


图 3 由  $3\omega$  脉冲波形求解  $1\omega$  脉冲波形

Fig. 3 Retrieval of  $1\omega$  temporal pulse shape by  $3\omega$  temporal pulse shape

$1\omega$  平顶脉冲的注入脉冲波形预测采用基于 SG99 放大模型的反迭代算法实现:因增益饱和和效应的影响,  $1\omega$  平顶脉冲的注入脉冲波形必然是指数上升形脉冲,通过改变指数形脉冲对比度的反迭代计算即可得到平顶脉冲输出。对于  $1\omega$  整形脉冲的注入脉冲波形预测则采用增益-通量曲线<sup>[8]</sup>(Gain-fluence curve, GFC)算法实现。GFC 算法的理论基础是在输入能量、脉宽相同时窄带脉冲激光的能量放大过程与脉冲形状无关,因此可根据相同输入条件下、基于平顶脉冲的 GFC 算法求解相同输出能量下的注入脉冲波形(图 4)。

这里,某时刻增益  $G(i)$  等于该时刻的输出功率  $P_{out}(i)$  除以输入功率  $P_{in}(i)$ , 即  $G(i) = P_{out}(i) / P_{in}(i)$ ; 某时刻通量等于该时刻与之前各个时刻的能量和

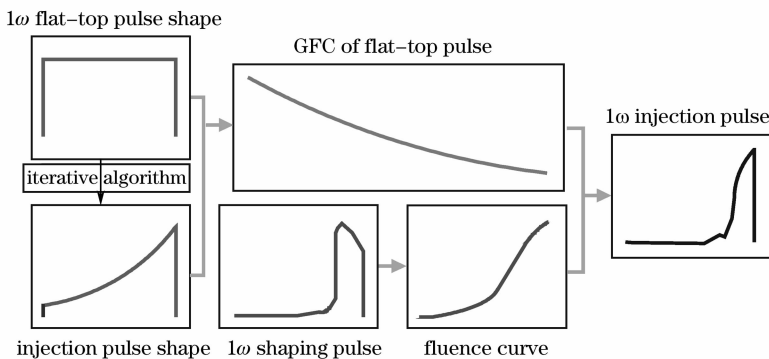


图 4 由  $1\omega$  输出脉冲波形求解注入脉冲波形

Fig. 4 Retrieval of injection temporal pulse shape by  $1\omega$  temporal pulse shape

$\sum_{k=1}^i E(k)$  除以光束面积  $S$ , 即  $F(i) = \sum_{k=1}^i E(k)/S$ .

以  $1\omega$  双台阶整形脉冲为例, 用 GFC 算法求解其注入脉冲波形(图 5)。双台阶脉冲宽度 3 ns(第一台阶 2 ns, 第二台阶 1 ns), 第二台阶与第一台阶的强度比为 3:1, 脉冲总能量 2200 J[图 5(f)中实线]。首先, 采用循环迭代计算 3 ns, 2200 J 时的平顶脉冲波形[图 5(b), 其注入波形为图 5(a)], 并计算平顶脉冲的增益通量曲线[图 5(c)]和台阶脉冲的通量曲线

[图 5(d)]。然后, 根据台阶脉冲的通量曲线从平顶脉冲的增益通量曲线上找到台阶脉冲各个时刻的增益, 再结合台阶脉冲各个时刻的输出能量, 即可给出其各个时刻对应的注入能量, 从而得到台阶脉冲的注入波形[图 5(e)]。将台阶脉冲的注入波形代入 SG99 放大模型进行计算, 得到对应的输出脉冲波形, 可以看出 SG99 软件给出的结果[图 5(f)中虚线]与期望的台阶脉冲一致。

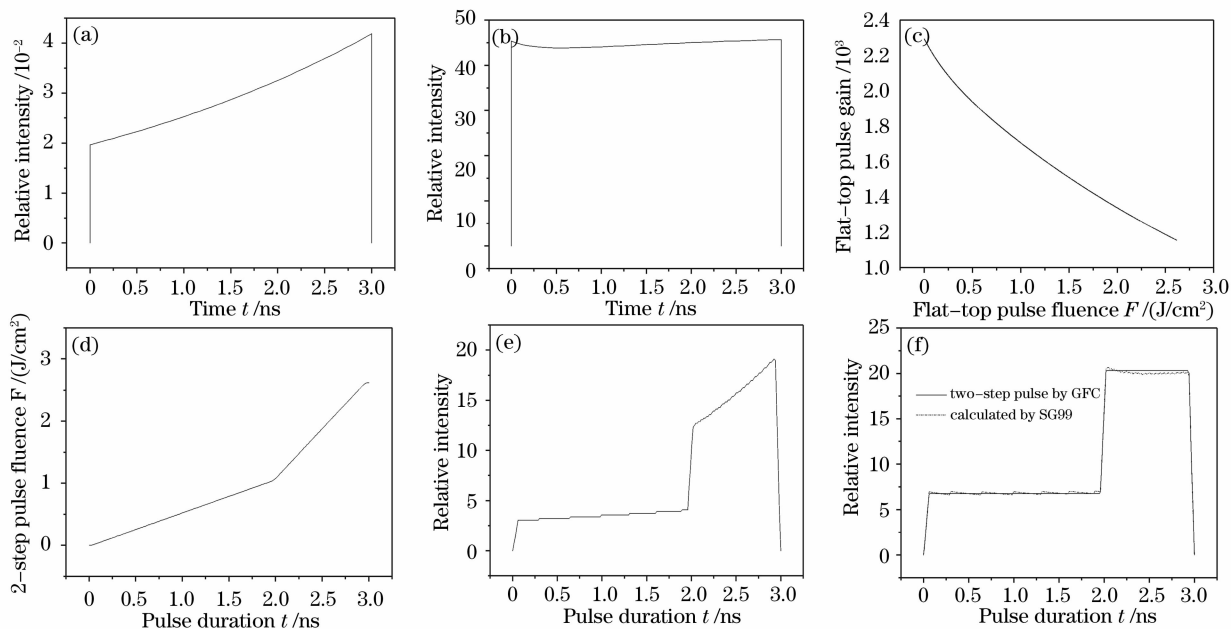


图 5 双台阶脉冲时间波形反演实例

Fig. 5 Example of two-step pulse temporal shape inversion

### 3 结 果

通过对 2007 年全年发射结果的统计表明: 预测能量偏差可控制在 5% 以内; 对于绝大部分发次, 束间能量分散度(用均方根表示)可控制在 10% 以内(典型的束间能量分散度可达到 2%, 图 6)。束间能

量分散度不大于 10% 的发次预放占总发次的 95%、主放占 97%、三倍频占 90%(图 7)。

对脉冲时间波形的预测情况, 以三倍频平顶脉冲为例说明, 典型的实验结果见图 8。该发次八束激光的平均脉宽(半峰全宽)为 1.1 ns, 平均能量为

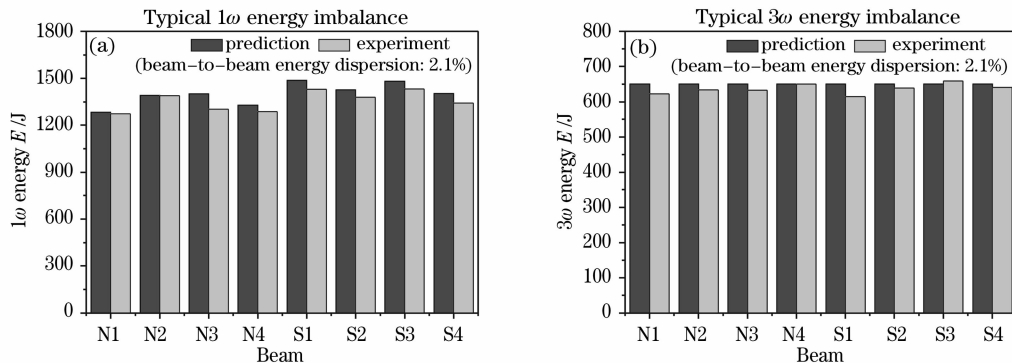


图 6 典型的同一发射能量预测结果与实验结果对比:  $1\omega$  (a),  $3\omega$  (b)

Fig. 6 Typical energy contrast between prediction and experiment for the same shot:  $1\omega$  (a),  $3\omega$  (b)

939 J。图中各脉冲波形按各自能量归一；可以看出，整体上八路脉冲波形一致(图8中零时刻脉冲功率均方根值约为4%)。

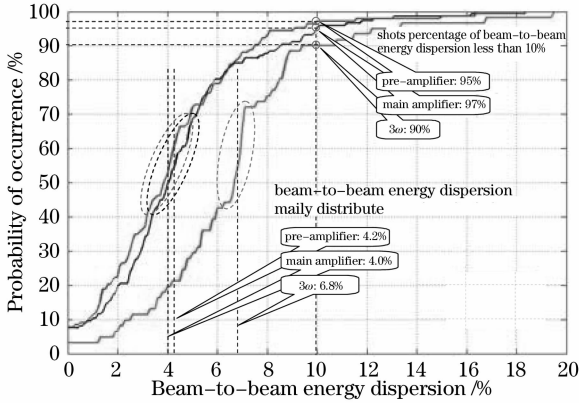


图7 TIL 能量不平衡统计

Fig. 7 TIL energy imbalance statistic graph

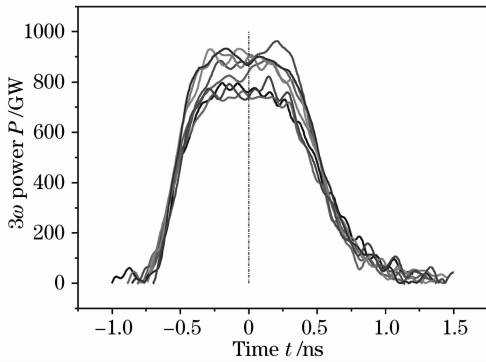


图8 TIL 三倍频脉冲时间波形一致性

Fig. 8  $3\omega$ -pulse-shape uniformity on TIL

## 4 结 论

通过对 TIL 激光性能仿真技术的研究,确定了

仿真工作流程,解决了关键算法,结合 TIL 实验验证了这些算法的正确性和实用性。LPSM 有效地支撑了 TIL 的成功运行,也为后续装置的模拟运行系统设计提供了很好的参考和依据。

## 参 考 文 献

- 1 M. Shaw, W. Williams, R. House *et al.*. Laser performance operations model[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12): 2885~2895
- 2 C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3276~3303
- 3 Wang Wenyi, Su Jingqin, Jing Feng *et al.*. Study on the models multi-pass amplification of nanosecond light pulse[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(suppl.): 324~326
- 王文义, 栗敬钦, 景峰等. 纳秒级光脉冲多程放大物理模型研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(增刊): 324~326
- 4 Zhang Bin, Lü Baida. Analyzing the inverse problem of the multi-pass laser amplifier system containing a spatial filter by using successive iteration method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(12): 1764~1769
- 张彬, 吕百达. 用逐次逼近迭代法分析含空间滤波器的多程激光放大系统的逆问题[J]. *光学学报*, 1998, **18**(12): 1764~1769
- 5 Zhang Bin, Lü Baida. Inverse problem of the multi-stage and multi-pass pulse laser amplifier [J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **A24**(6): 495~500
- 张彬, 吕百达. 多级和多程脉冲激光放大器的逆问题[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(6): 495~500
- 6 Xiong Junjiang, Guo Aimin, Qiu Huayong. Orthogonal polynomial and three parameter exponent function model to treat fatigue crack growth curve [J]. *Chin. J. Applied Mechanics*, 2002, **19**(2): 110~113
- 熊峻江, 郭爱民, 邱华勇. 疲劳裂纹扩展曲线的正交多项式与三参数指数函数拟合法[J]. *应用力学学报*, 2002, **19**(2): 110~113
- 7 L. M. Frantz, J. S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(8): 2346~2349
- 8 Liu Renhong, Cai Xijie, Yang Lin *et al.*. Study on gain fluence curve of a laser pulse amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(7): 3140~3143
- 刘仁红, 蔡希洁, 杨琳等. 激光脉冲放大器的增益通量曲线研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(7): 3140~3143