

“神光 II”装置激光输出波形的数值模拟*

刘仁红 蔡希洁 杨琳 张志祥 毕纪军

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

(2004 年 2 月 5 日收到, 2004 年 4 月 5 日收到修改稿)

推广应用“激光放大一维问题的解”的计算方法, 模拟计算了“神光 II”装置激光束放大链的传输波形, 并与实验结果进行比较, 符合较好. 为功率平衡的研究提供了有力工具.

关键词: 模拟计算, 激光束, 波形, 功率平衡

PACC: 4220, 4225B, 4255B, 4260

1. 引言

在“神光 II”精密化项目中, 为达到对靶丸表面均匀照射的目的, 八路激光的功率平衡是一项非常重要的工作. “神光 II”装置系统复杂, 在八路激光的功率平衡调试中影响因数众多. 因此, 有必要研究比较各种调试方法并进行实验^[1], 对各路光束进行能量功率平衡, 但“神光 II”装置的每一次发射造价昂贵, 而且装置的实验任务重, 可提供功率平衡实验的次数很少. 为了在尽可能少的调整次数内达到平衡指标, 用计算机模拟装置的实际发射是十分必要的. 此外, 在放大器的日常运行中, 为保持放大器工作在最佳状态, 通过计算机模拟来辅助调整放大器的工作参数, 也具有一定的作用. 本文在“激光放大一维问题的解”^[2]的基础上, 将单个、单路放大系统推广到多级、多路放大链情形, 对“神光 II”装置各路激光束的放大传输过程进行数值模拟.

2. 计算原理

文献 2 主要求解了包含损耗在内的激光放大方程,

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + c \frac{\partial}{\partial x}\right)\phi = \bar{\sigma} c \phi \Delta - \gamma \phi, \quad (1)$$
$$\frac{\partial \Delta}{\partial t} = -\bar{\sigma} c \phi \Delta,$$

其中 ϕ 为光子数密度, Δ 为反转粒子数密度, γ 为

光子在传输过程中的损耗, $\bar{\sigma}$ 为受激辐射截面. 取归一化参量,

$$\eta = \frac{x}{c} \gamma,$$
$$\tau = \left(t - \frac{x}{c}\right) \gamma,$$
$$I = \frac{\bar{\sigma} c \phi}{\gamma},$$
$$\sigma = \frac{\bar{\sigma} c \Delta}{\gamma},$$

由(1)式可得

$$\frac{\partial R}{\partial \eta} = \sigma_0(1 - e^{-R}) - R, \quad (2)$$

式中 $R = \int_{-\infty}^{\tau} I d\tau$ 为光脉冲在积分区间内的光子数

密度, $\sigma_0 = \frac{\bar{\sigma} c \Delta_0}{\gamma}$ 为初始时的反转粒子数密度. 求解

(2)式得

$$\eta = \int_{R_0}^R \frac{dR}{\sigma_0(1 - e^{-R}) - R}$$
$$= F(R, \sigma_0) - F(R_0, \sigma_0), \quad (3)$$

亦即

$$F(R, \sigma_0) = F(R_0, \sigma_0) + \eta, \quad (4)$$

$$R = F^{-1}(F(R, \sigma_0))$$
$$= F^{-1}(F(R_0, \sigma_0) + \eta), \quad (5)$$

$$I = \frac{\partial R}{\partial \tau}. \quad (6)$$

(3)~(6)式示出求解的全过程, 即给定 R_0 , 便算出

* 国家高技术研究发展计划(批准号 2002AA842110)资助的课题.

输入端的函数 $F(R_0, \sigma_0)$, 由每一节放大器的 $\eta = \frac{L}{c}\gamma$ 并根据(4)式求出输出端的函数 $F(R, \sigma_0)$. 又由(5)式反求出 R , 由(6)式得到输出脉冲波形 $I = \frac{\partial R}{\partial \tau}$.

上述推导是对一级放大进行的. 我们容易将其推广到 n 级放大情形. 设 F_1, F_2, \dots, F_n 和 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ 分别为各级的函数与放大器贡献, $\gamma_{1,2}, \dots, \gamma_{n-1,n}$ 为光传输过程中的分光损耗、空间滤波器与光学隔离器等元件的损耗以及级间损耗, 参照(4)~(6)式可得多级放大的解

$$\begin{aligned} F_1(R_1, \sigma_{01}) &= F_1(R_{10}, \sigma_{01}) + \eta_1, \\ R_1 &= F^{-1}(F_1(R_{10}, \sigma_{01}) + \eta_1), \\ I_1 &= \frac{\partial R_1}{\partial \tau}. \end{aligned} \tag{7}$$

I_1 即为第二放大级的输入脉冲, 故有

$$R_{20} = \int I_{20} d\tau = \int \gamma_{1,2} I_1 d\tau = \gamma_{1,2} R_1.$$

由此可求出 $F_2(R_{02}, \sigma_{02}) \rightarrow F_2(R_2, \sigma_{02})$. 依次类推,

可求出 I_2, \dots, I_n .

$$\begin{aligned} R_2 &= F^{-1}(F_2(R_{20}, \sigma_{21}) + \eta_2), \\ I_2 &= \frac{\partial R_2}{\partial \tau}, \\ &\dots \\ R_{n0} &= \gamma_{n-1,n} R_{n-1}, \\ R_n &= F^{-1}(F_n(R_{n0}, \sigma_n) + \eta_n), \\ I_n &= \frac{\partial R_n}{\partial \tau}. \end{aligned} \tag{8}$$

即只要给出输入脉冲波形, 各级放大器参数及级间损耗, 就可求得放大链的输出脉冲波形.

3. “神光 II”装置放大链计算

以上是一维放大问题解法的原理计算, 现将这一求解方法应用于“神光 II”装置放大链的计算中, 并将数值计算结果与实际运行打靶的实验结果进行比对. 图 1 给出“神光 II”装置从第一次分光后的 B_{21} 放大器开始的上层第 1, 3, 5, 7 四路放大链的示意图.

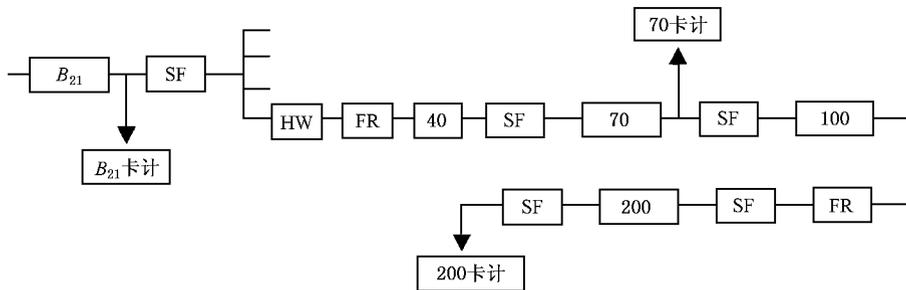


图 1 放大链示意图

图 1 中的 40, 70, 100, 200 表示不同口径的放大器, SF, FR 分别表示空间滤波器与隔离器, HW 为半波片衰减器; B_{21} 卡计、70 卡计、200 卡计分别为能量与波形的采样处. 数值模拟就是以 B_{21}, B_{22} (为下层第 2, 4, 6, 8 四路放大链输入端的放大器) 处测得的能量与波形作为输入, 计算经过 40, 70, 100, 200 四级放大后的输出能量与波形. 其中有 70 和 200 (末

级) 两处采样. 我们以第 1、第 2 路放大链为例, 取 3 发打靶数据进行模拟计算(数据编号分别为 03031911, 03032012, 03032115). 计算中采用的参数取值如表 1、表 2 所示, 其中放大器的小信号增益系数(与氙灯泵浦的充电电压有关)、系统分光比以及系统的透过率, 是应用我们的小能量测量系统³¹实验测得的.

表 1 放大级基本参数

放大级	光束口径 ϕ/mm	有效长度 L/mm	受激辐射截面 $\sigma/10^{-20} \text{cm}^2$	线性损耗系数 α/cm^{-1}	小信号增益系数 β/cm^{-1}	
					第 1 路	第 2 路
40	34.33	280	3.8	0.004	0.088(13.5 kV)	0.087(14 kV)
70	62.45	350	3.8	0.004	0.046(14.5 kV)	0.046(14 kV)
100	90	17.93	3.8	0.005	0.068(23 kV)	0.059(19 kV)
200	182.48	28.68	3.8	0.005	0.051(21 kV)	0.051(21 kV)

表 2 放大链系统参数

放大链	分光比	半波片 透过率/%	B_{21} —70 放大 级透过率/%	70—200 放大 级透过率/%
第 1 路	0.1328	88	9.3	36 (03031911)
				35 (03032012)
				36 (03032115)
第 2 路	0.1052	99	7.8	49 (03031911)
				47 (03032012)
				49 (03032115)

图 2 所示分别为 3 发打靶实验中 B_{21} 、 B_{22} 放大器的输出波形,此即为模拟计算中第 1 路和第 2 路的输入波形.

第 1 路和第 2 路模拟计算的输出波形结果分别如图 3 和图 4 所示.

表 3 给出了第 1 路和第 2 路模拟计算的能量输出结果与实验测量值比较.

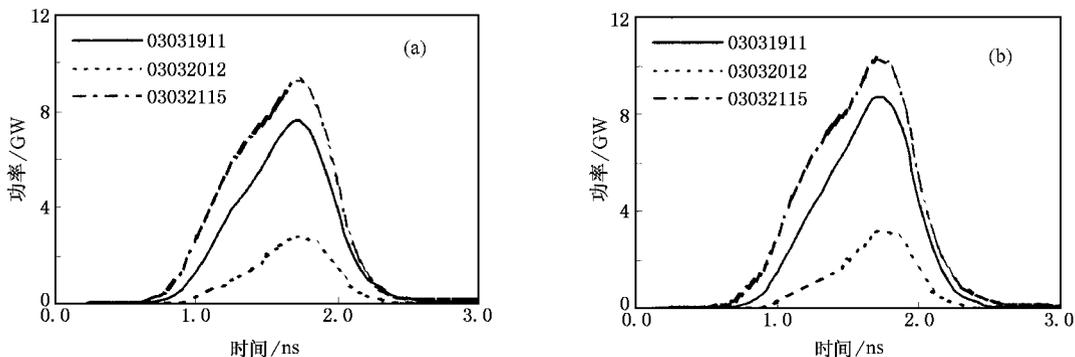


图 2 输入波形 (a)为第 1 路,(b)为第 2 路

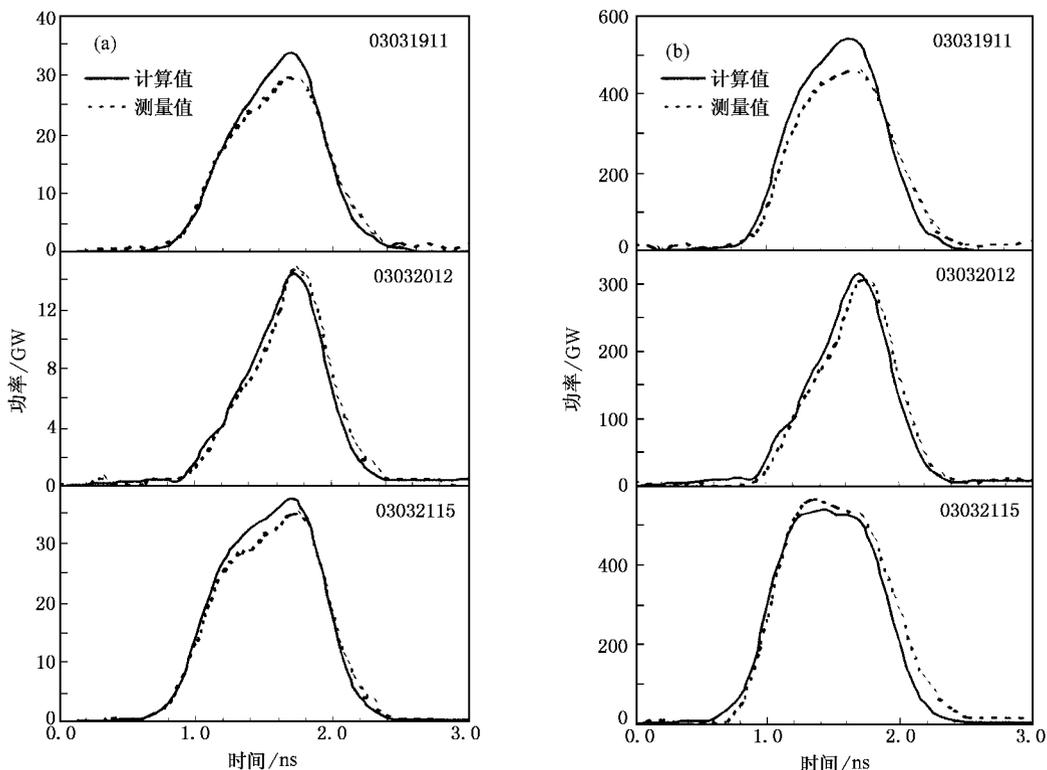


图 3 第 1 路的计算波形 (实线)与测量波形 (虚线) (a)为 70 放大级的输出,(b)为末级的输出. 3 发打靶实验数据编号为 03031911、03032012、03032115

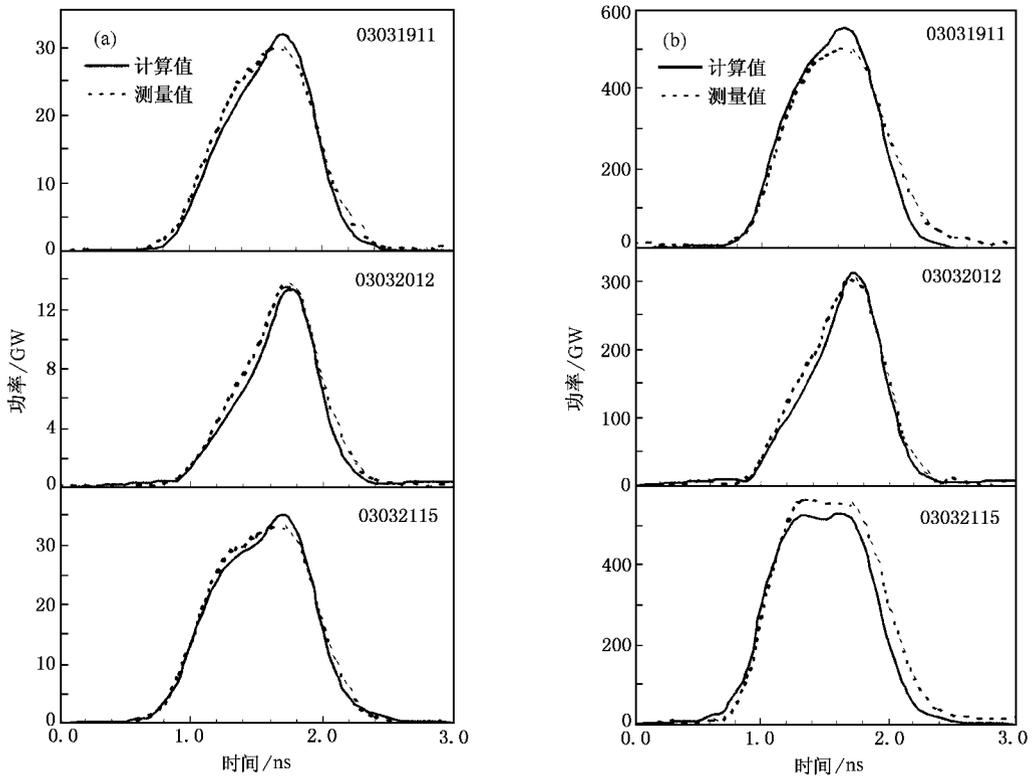


图 4 第 2 路的计算波形(实线)与测量波形(虚线)(a)为 70 放大的输出,(b)为末级的输出. 3 发打靶实验数据编号为 03031911, 03032012, 03032115

表 3 能量测量值与模拟计算值

编号	第 1 路		第 2 路	
	测量值/J	计算值/J	测量值/J	计算值/J
03031911 $B_{21, 22}$ 输出	5.97		6.73	
	26.91	27.28	27.03	25.30
	356.44	374.10	389.75	375.74
03032012 $B_{21, 22}$ 输出	2.02		2.21	
	10.57	10.34	10.17	9.27
	181.35	182.82	188.09	176.36
03032115 $B_{21, 22}$ 输出	8.03		8.91	
	33.30	34.81	32.56	31.94
	464.71	432.30	482.18	431.88

4. 结果及讨论

由图 3、图 4 和表 3 可以看出,数值模拟计算与实验结果较为一致,低能量与高能量相比,结果相

符得更好. 从图 3、图 4 可见:第一发(编号 03031911)计算值高于测量值;第三发(编号 03032115)在 70 处的输出计算值大于测量值,而未级的输出计算值则低于测量值;第三发的末级输出已表现出明显的增益饱和现象.

由于影响放大器性能的物理参数较多,一些参数选取的是放大器增益介质的常用值,没有准确的实验校核. 计算中使用的透过率数据与打靶时的实际透过率也会因为系统存在的波动而有一定的起伏. 这些在一定程度上带来了误差. 此外,我们的计算是从考虑损耗情况下的一维激光放大方程出发,还有一些细致因素并未考虑,这也使得数值计算与实验值之间存在差异. 但目前的数值计算结果还是能够较好地反映系统的实际运行情况,由此我们可以了解到各个放大器的基本工作状态和存在的问题. 这将在功率平衡的物理研究中起到重要作用.

- [1] Tang L J , Cai X J , Lin Z Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1075 (in Chinese) [唐立家、蔡希洁、林尊琪 2001 物理学报 **50** 1075]
- [2] Liu R H , Tan W H 1995 *Acta Phys. Sin.* **44** 1029 (in Chinese) [刘仁红、谭维翰 1995 物理学报 **44** 1029]
- [3] Yu T Y , Cai X J , Liu R H *et al* 2002 *Chin. J. Lasers A* **29** 267 (in Chinese) [于天燕、蔡希洁、刘仁红等 2002 中国激光 A **29** 267]

Numerical simulation of output pulse shape for “ Shengguang II ”*

Liu Ren-Hong Cai Xi-Jie Yang Lin Zhang Zhi-Xiang Bi Ji-Jun

(National Laboratory on High Power Laser Physics , Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China)

(Received 5 February 2004 ; revised manuscript received 5 April 2004)

Abstract

Power balance between laser beams is important for high-power laser system. This paper uses a calculation method as an exact solution for laser amplification to simulate the output pulse shape of “ Shengguang II ” laser facility. The results are preferable , as compared with the results of the experiments.

Keywords : simulative calculation , laser beam , pulse shape , power balance

PACC : 4220 , 4225B , 4255B , 4260

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2002AA842110).