

激光脉冲放大器的增益通量曲线研究*

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 10 月 19 日收到; 2004 年 11 月 22 日收到修改稿)

提出利用放大器的增益通量曲线来全面描述放大器增益特性的方法. 并对单台放大器的增益通量曲线进行了研究, 从而进一步加深了对放大器的认识. 为功率平衡研究提供有力工具.

关键词: 放大器, 增益通量曲线, 功率平衡

PACC: 4225B, 4255B, 4260

1. 引 言

精密化课题之一就是神光 II 装置的能量平衡和功率平衡. 功率平衡的目标就是要实现多路激光输出能量和功率波形的高精度平衡. 神光 II 装置中的各级放大器是装置获得高功率激光输出的关键器件. 过去对放大器的研究侧重于能量增益, 对放大过程造成的脉冲波形变化研究较少, 还没有简明的描述手段. 对于功率平衡研究来说, 将放大器整体作为一个研究对象, 需要建立一种放大器增益特性的全面描述. 本文提出一种既能给出放大器的能量增益, 又能给出激光脉冲波形的瞬时功率增益的描述方法, 这就是放大器的增益通量曲线. 并对单元放大器的增益通量曲线进行了研究, 从而加深对放大器的认识, 为功率平衡的研究提供有力工具.

2. 放大器的增益通量曲线

光脉冲在增益介质中传输时满足如下放大输运方程^[1]

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

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. 参照文献

[1] 的解法, 取归一化参量 $\eta = \frac{x}{c} \gamma$, $\tau = \left(t - \frac{x}{c} \right) \gamma$, $I = \frac{\bar{\sigma} c \phi}{\gamma}$, $\sigma = \frac{\bar{\sigma} c \Delta}{\gamma}$, 方程(1)的解可写为

$$F(R, \sigma_0) = F(R_0, \sigma_0) + \eta, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} R &= F^{-1}(F(R, \sigma_0)) \\ &= F^{-1}(F(R_0, \sigma_0) + \eta), \end{aligned} \quad (3)$$

$$I = \frac{\partial R}{\partial \tau}, \quad (4)$$

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. 将(2)式两端对 τ 微分, 得到输出脉冲与输入脉冲的关系, 两者相比, 即得光脉冲信号的放大倍率 $G_1(\eta, \tau)$,

$$\begin{aligned} G_1(\eta, \tau) &= \frac{I(\eta, \tau)}{I(\tau)} = \frac{\frac{\partial F(R_0, \sigma_0)}{\partial R_0}}{\frac{\partial F(R, \sigma_0)}{\partial R}} \\ &= \frac{\sigma_0(1 - e^{-R}) - R}{\sigma_0(1 - e^{-R_0}) - R_0}. \end{aligned} \quad (5)$$

在不计及损耗的情况下, (3)式可用初等函数表示为

$$R = \ln[1 + (e^{R_0} - 1)e^{\sigma_0 \eta}], \quad (6)$$

代入(5)式得

$$G_1(\eta, \tau) = \frac{I(\eta, \tau)}{I(\tau)} = \frac{\sigma_0(1 - e^{-R})}{\sigma_0(1 - e^{-R_0})}$$

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA842110)资助的课题.

[†] Email: rhliu@opfilm.com

$$= \frac{e^{\sigma_0 \eta} e^{R_0}}{1 + (e^{R_0} - 1) e^{\sigma_0 \eta}} \quad (7)$$

上述结果是采用归一化参量后得到的,代入归一化前参量,则有

$$G_1(x, t) = \frac{\phi(x, t)}{\phi(t)} = \frac{e^{\sigma \Delta_0 x} e^{\int_0^t \phi(r) dr}}{1 + (e^{\int_0^t \phi(r) dr} - 1) e^{\sigma \Delta_0 x}} \quad (8)$$

令 $I = Ah\nu c\phi$ 为激光脉冲功率, A 为通光面积, L 为介质长度,由(8)式,可得

$$G_1(L, t) = \frac{I(L, t)}{I(t)} = G_s \frac{e^{\int_0^t I(r) dr}}{1 + (e^{\int_0^t I(r) dr} - 1) G_s} \quad (9)$$

式中 $G_s = e^{\sigma \Delta_0 L}$ 为放大器的初始小信号增益,信号放大率 $G_1(L, t)$ 即为放大器的瞬时功率增益. 将以 $G_1(L, t)$ 作为纵坐标, t 时刻激光脉冲对时间的积分

$E = \int_0^t I(t') dt'$, 即激光通量作为横坐标得到的曲线,称之为放大器的增益通量曲线.(9)式表明瞬时功率增益 $G_1(L, t)$ 与放大器的初始小信号增益有关,与入射激光通量有关,而与入射激光的波形无关.对于有损耗情形,增益通量曲线没有解析表达式,只能通过数值计算得到.

3. 数值分析

以“神光 II”装置放大链中 $\phi 40$ 棒状放大器为例,计算了不考虑和考虑损耗情况下的增益通量曲线.计算中的参数取值为:放大器通光口径为 $\phi = 34.3\text{mm}$,受激辐射截面 $\bar{\sigma} = 3.8 \times 10^{-20} \text{cm}^2$,小信号增益系数 $\beta_0 = \bar{\sigma} \Delta_0 = 0.088 \text{cm}^{-1}$,吸收系数 $\alpha = 0.004 \text{cm}^{-1}$ 增益介质有效长度 $L = 280\text{mm}$,计算结果如图 1 所示.图中可看出瞬时功率增益 $G_1(L, t)$ 的初始值即为放大器的小信号增益值 G_s .随着入射通量的不断增加,能量不断被提取,增益介质内的反转粒子数不断被消耗,激光脉冲的瞬时功率增益随之逐步下降,增益通量曲线呈现出饱和趋势.有损耗情形的增益通量曲线比无损耗情形的增益通量曲线低,这是因为在放大过程中要克服损耗,使得瞬时功率增益比无损耗时的低.图 1 表明激光脉冲在放大媒质中传输时,由于脉冲各部分的通量不同,因而增益不同.前沿部分的通量比后沿部分的通量小,故前沿部分比后沿部分具有较大的增益,这就使得脉冲

在放大过程中发生了形变.由(9)式,令

$$s = \frac{G_1(L, \tau)}{G_1(L, 0)} = \frac{e^{\int_0^\tau I(r) dr}}{1 + (e^{\int_0^\tau I(r) dr} - 1) G_s}$$

其中 $G_1(L, 0), G_1(L, \tau)$ 分别为脉冲前、后沿的功率放大增益.此即文献[2]中定义的增益饱和特征参量,用于评价由于增益饱和而造成的脉冲波形畸变程度. s 的取值范围应为 $(0, 1)$, 当 $s = 1$ 时表明不存在增益饱和,脉冲的前后沿都能得到充分放大, s 越小,增益饱和现象越明显,由于增益饱和造成的波形畸变也就越严重.图 2 给出了增益饱和特征参量 s 随激光通量的变化.可以看出随着激光通量的增加, s 值减小;初始小信号增益愈大,其值下降愈快.在入射激光通量较小时,增益饱和特征参量 s 的变化速率很快,此时改变输入激光通量可以显著地影响激光输出波形.

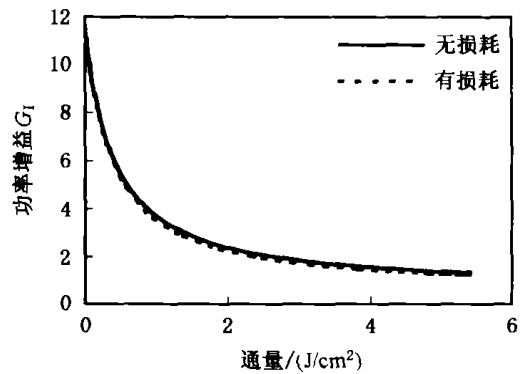


图 1 放大器增益通量曲线

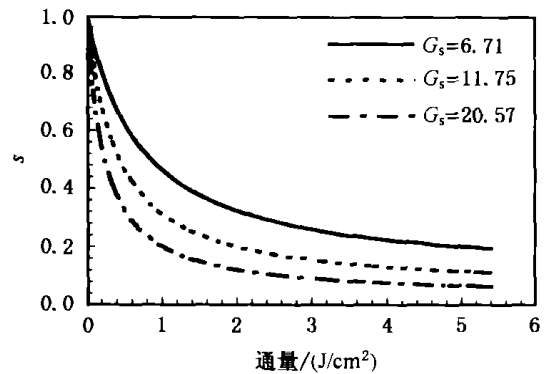


图 2 激光通量对输出波形的影响

图 3 给出的是小信号增益取不同值时的增益通量曲线.曲线 1,2 对应的小信号增益值分别为 $G_{s1} = 11.75, G_{s2} = 6.71$.图中看出小信号增益大的增益通量曲线变化较陡,小信号增益小的增益通量曲线变化较缓.随着激光通量的增加,两者逐渐趋于一致.

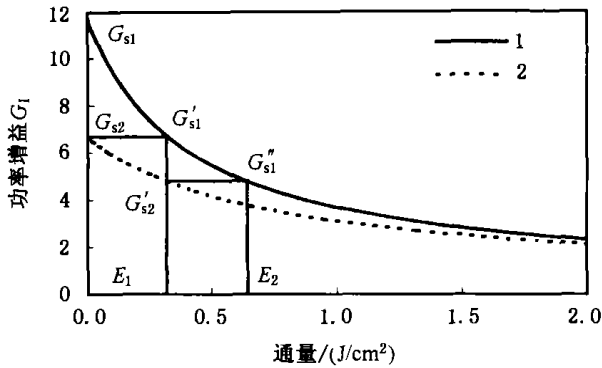


图3 增益通量曲线与小信号增益的关系

当入射激光通量增大到 E_1 时,对于曲线 1,瞬时功率增益由 G_{s1} 减小到 G'_{s1} ;对于曲线 2,瞬时功率增益由 G_{s2} 减小到 G'_{s2} .当入射光通量增大到 E_2 时,对于曲线 1,瞬时功率增益由 G'_{s1} 减小到 G''_{s1} .由(9)式可以证明,当 $G'_{s1} = G_{s2}$, $G''_{s1} = G'_{s2}$ 时, $E_2 = 2E_1$.也就是说曲线 2 通过平移后即与曲线 1 重合.这表明所有放大器都运行在同一根增益通量曲线上,只是工作区间不同而已.当放大器的介质确定以后,不同工作参数(如氙灯抽运电压、触发延迟时间等)就决定了放大器运行在同一根增益通量曲线的不同工作区

间.工作区间的起始点由放大器的小信号增益决定,工作区间的范围则由输入的总通量确定.放大器增益通量曲线的不同部分其增益饱和和特征参量是不同的,改变小信号增益值的大小可以选择工作区的起始点,即可调整增益饱和和参量的大小,从而改变波形的畸变程度.改变输入通量,就是调整工作区间的大小.通过这两个参数的调整可以控制单台放大器的输出功率波形和能量.

4. 小 结

从增益通量曲线可以得到放大器所有的增益特性.对特定的输入通量 E 而言,在区间 $(0-E)$ 之间的瞬时功率增益的平均值就是通常所说的积分能量增益,于是可获得常用的放大器输入输出能量曲线和增益输入能量曲线.如果已知输入激光脉冲波形,通过积分求出输入激光通量,进而找到相应的瞬时功率增益值,即可得到输出激光波形.反之已知输出激光波形,同样可求得输入激光脉冲波形.增益通量曲线反映了激光系统的本质,给出了放大特性的全面描述,特别有利于脉冲波形畸变的分析和讨论,为功率平衡的研究提供了有力的工具.

[1] Liu R H and Tan W H 1995 *Acta Phys. Sin.* **44** 1029 (in Chinese)
[刘仁红、谭维翰 1995 物理学报 **44** 1029]

[2] Tang L J, Cai X J and 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]

Study on gain fluence curve of a laser pulse amplifier^{*}

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 19 October 2004; revised manuscript received 22 November 2004)

Abstract

This paper discusses a method of characterizing the gain of the laser pulse amplifier using its gain fluence curves, and studies gain fluence curves of a single amplifier. These help us to understand the characteristics of the amplifier and provide a powerful tool for the investigation of the power balance.

Keywords: amplifier, gain fluence curves, power balance

PACC: 4225B, 4255B, 4260

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