

# 混合加宽的宽带钕玻璃激光系统的放大特性研究<sup>\*</sup>

刘兰琴<sup>1)†</sup> 莫磊<sup>1)</sup> 罗斌<sup>2)</sup> 栗敬钦<sup>1)</sup> 王文义<sup>1)</sup> 王方<sup>1)</sup> 景峰<sup>1)</sup> 魏晓峰<sup>1)</sup>

1) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) 西南交通大学计算机与通信工程学院, 成都 610031)

(2008 年 1 月 16 日收到, 2008 年 9 月 17 日收到修改稿)

通过宽带激光脉冲放大的物理模型,以数值模拟为工具,研究分析了激光系统对不同带宽脉冲的放大能力,以及交叉弛豫时间对脉冲放大特性的影响.计算结果表明,随着带宽的增加,激光系统的输出能力逐渐降低,在其他条件相同时,带宽分别为 2.5 和 10 nm 时的输出能量比窄带输出(3000 J, 1 ns 脉宽)时分别减小了约 2%, 11% 和 27%;在带宽为几个纳米时完全非均匀加宽比完全均匀加宽的输出能量(3000 J, 1 ns 脉宽)降低了约 20%,初步确定了交叉弛豫时间的范围为 0—10 ns.

关键词:激光系统,宽带激光,放大过程,交叉弛豫

PACC: 9240C, 4260K, 4265K, 9265R

## 1. 引 言

80 年代中后期 Mourou 等<sup>[1]</sup>提出的啁啾脉冲放大 CPA 概念,较好地解决了激光脉冲放大过程中的非线性问题,成为高功率激光脉冲发展的一个重要里程碑.运用 CPA 技术,既可避免在放大过程中由于极高的峰值功率对光学元件的损伤以及介质的非线性效应使脉冲质量下降,又能保证足够的激光通量以提高放大器能量的提取效率.啁啾脉冲放大 CPA 技术与先进的高功率激光技术及优良的宽带激光增益介质相结合<sup>[2,3]</sup>,形成了全新一代的皮秒脉冲高功率激光系统<sup>[4]</sup>.利用宽带钕玻璃为放大介质,脉冲宽度一般展宽到皮秒或者数百飞秒量级,输出能量数十至数百焦耳,输出功率可达到  $10^{15}$  W 水平,聚焦功率密度高达  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>— $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>.这类系统的输出能量较高,主要用于惯性约束聚变研究<sup>[5]</sup>.在惯性约束聚变研究中,宽带激光还有可能解决纳秒级激光的负载能力与光束质量问题,实现束匀滑<sup>[6,7]</sup>,提高靶面辐照均匀性.另外,增大带宽还可以抑制 SRS, SBS 产生的激光散射份额等作用.

宽带激光脉冲的传输放大一直是大型激光系统研制所关注的问题之一,它是影响系统总体性能的因素之一.新的激光物理问题和传输放大是世界性

的热点研究内容<sup>[8-16]</sup>.自 20 世纪 60 年代初 Franzt 和 Nodvik<sup>[10]</sup>建立了适用于窄带激光放大的 F-N 速率方程后,伴随着啁啾脉冲放大技术的发展,1993 年 Chuang 等<sup>[11]</sup>对啁啾脉冲的传输问题进行了详细的研究,1998 年 Garnier 等<sup>[12]</sup>研究了非相干脉冲在色散和非线性介质中的传输放大问题,由均匀加宽的二能级系统推导了脉冲的放大模型;2003 年 Morice<sup>[13]</sup>研发了宽带传输软件 miro,放大模型为典型的均匀加宽模型,可较为全面地计算衍射、色散效应、增益饱和、增益窄化等问题;2006 年文双春等<sup>[14]</sup>对非均匀加宽系统中宽带激光脉冲的增益特性问题进行了研究,作者根据啁啾脉冲不同时刻对应着不同瞬时频率这一特点,从而把总的啁啾脉冲看成是由一系列时间上依次排列的准单色子脉冲所组成,每个子脉冲都有不同的中心频率和强度,当子脉冲的带宽与放大介质的带宽相比很小时,可利用已有的窄带模型来计算非均匀加宽系统中的每个子脉冲的放大.实际上,对钕玻璃等增益介质,往往是均匀加宽与非均匀加宽并存,其放大过程将更为复杂.

对宽带激光脉冲的传输而言,它和以往的窄带激光脉冲有所不同,除了受增益窄化、增益饱和、非线性自聚焦等效应的影响外,它还将受到色散、自相位调制、光谱增益窄化、光谱漂移等效应的影响.研究宽带激光脉冲传输的相关理论和定量计算方法等

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划和中国工程物理研究院科学技术发展基金(批准号 2007B08005)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: ly\_ly2008@yahoo.com.cn

对于宽带放大激光系统的设计、系统分析和性能优化非常重要. 为充分优化设计, 在合理的物理模型下利用数值模拟仿真技术来评价和优化激光放大系统的性能和设计参数, 对提高整个激光系统的性价比就具有重要的意义.

本文将针对铍玻璃等均匀加宽和非均匀加宽并存的介质, 引入交叉弛豫时间, 考虑混合加宽机制, 利用建立的宽带激光脉冲放大的物理模型, 通过开发宽带激光传输放大的模拟设计软件, 针对激光系统的光路排布特点, 以 9+6 排布的等效光路为例, 重点研究宽带啁啾铍玻璃激光系统中的两大问题: 评估激光系统对不同带宽脉冲的放大能力; 研究交叉弛豫时间对脉冲放大特性的影响.

## 2. 基本物理模型

宽带脉冲激光的放大过程和窄带脉冲激光系统有很大不同, 对于宽带脉冲激光的放大过程, 需要考虑的问题涉及激光光谱和放大介质的放大带宽之间的关系、放大介质的均匀加宽和非均匀加宽机制、与光谱相关的光强传输放大问题和反转粒子数的变化的表达问题等, 其中最难处理的是放大介质频率和激光本身频率的关系处理以及反转粒子数的交叉弛豫处理的问题<sup>[14,15]</sup>. 而现有的放大模型基本只考虑了均匀加宽的性质, 作者通过引入交叉弛豫时间来表征粒子数重新分布的快慢, 从而推导出了如下基于“整体非均匀加宽、局部均匀加宽”的比较完善的宽带激光脉冲放大的物理模型<sup>[16]</sup>:

$$\frac{\partial n_1(\nu)}{\partial t} = \int -\Delta n(\nu) \sigma g_{H}(\nu', \nu) \frac{K(\nu')}{h\nu'} d\nu' - \frac{n_1(\nu)}{\tau_1} - \frac{n_1 - (n_1 + n_1') \cdot (1 + k_1)^{-1}}{\tau_{p1}} \times g_N(\nu, \nu_0) - \frac{n_1(\nu) - n_1 g_N(\nu, \nu_0)}{\tau_{cr}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_2(\nu)}{\partial t} = \int \Delta n(\nu) \sigma g_{H}(\nu', \nu) \frac{K(\nu')}{h\nu'} d\nu' - \frac{n_2(\nu)}{\tau_2} - \frac{n_2 - (n_2 + n_2') \cdot (1 + k_2)^{-1}}{\tau_{p2}} \times g_N(\nu, \nu_0) - \frac{n_2(\nu) - n_2 g_N(\nu, \nu_0)}{\tau_{cr}} + \frac{n_1(\nu)}{\tau_1}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_1'}{\partial t} = -\frac{n_1'}{\tau_1'} + \frac{n_1 - (n_1 + n_1') \cdot (1 + k_1)^{-1}}{\tau_{p1}}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial n_2'}{\partial t} = -\frac{n_2'}{\tau_2'} + \frac{n_2 - (n_2 + n_2') \cdot (1 + k_2)^{-1}}{\tau_{p2}}, \quad (4)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} \right) K(\nu') = \left[ \int \Delta n(\nu) \sigma g_{H}(\nu', \nu) d\nu - \alpha \right] K(\nu'), \quad (5)$$

$$g_H(\nu', \nu) = \frac{1}{1 + 4 \left( \frac{\nu' - \nu}{\Delta\nu_H} \right)^2}, \quad (6)$$

$$g_N(\nu, \nu_0) = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{2}{\Delta\nu_N} \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_N} \right)^2 \right], \quad (7)$$

$$n_1 = \int n_1(\nu) d\nu,$$

$$n_2 = \int n_2(\nu) d\nu,$$

$$\Delta n(\nu) = n_1(\nu) - n_2(\nu). \quad (8)$$

## 3. 数值模拟分析

### 3.1. 光路排布与计算参数

针对某大型高功率激光系统的光路(见图1), 作者在文献[16]建立的宽带激光脉冲放大物理模型的基础上, 采用所开发的宽带激光脉冲传输放大模拟设计软件 CPAP, 将对宽带激光脉冲的放大能力进行评估, 并对交叉弛豫时间的影响进行初步研究.

数值模拟分析中使用的基本参数如下:

激光中心波长为 1053 nm, 空间光束为方形 8 阶超高斯光束, 放大器铍玻璃片厚度为 4 cm, 小信号增益系数  $0.05^{-1}$ , 吸收系数为  $0.0045 \text{ cm}^{-1}$ , 受激发射截面为  $3.9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 增益介质荧光线宽为 20 nm, 热化时间为 50 ns, 上能级寿命为 0.35 ns, 线性折射率为 1.528, 非线性折射率为  $1.15 \times 10^{-13} \text{ esu}$ .

### 3.2. 采样精度、计算精度与计算速度问题

由于宽带激光脉冲传输放大过程涉及空间传输、时间传输、光谱增益放大等问题, 而且是时空耦合的, 因此存在时空采样精度、计算精度与计算速度相互制约的问题. 另外, 还存在增益介质光谱采样精度影响计算精度与计算速度的问题. 例如, 在计算宽带啁啾激光脉冲传输放大时, 若时间采样点  $N_t$  一定, 激光带宽越窄, 其采样精度越高, 则增益介质光谱采样精度要求也越高. 设激光带宽为  $\Delta\omega_L$ , 脉冲

宽度为  $\Delta\tau$  ,激光带宽采样精度为  $d\omega_L$  ,时间采样精度为  $dt$  ,则有  $\frac{\Delta\omega_L}{\Delta\tau} = \frac{d\omega_L}{dt}$  . 在激光传输放大过程中 ,只有当介质增益谱的采样精度  $d\omega_a$  与激光带宽采样精度  $d\omega_L$  相当时 ,才能保证计算结果的准确性 . 设介质增益谱线宽为  $\Delta\omega_a$  ,增益谱的采样点数为  $N_s$  ,即  $d\omega_L = \frac{\Delta\omega_a}{N_s}$  ,则有  $\frac{\Delta\omega_L \cdot dt}{\Delta\tau} = \frac{\Delta\omega_a}{N_s}$  ,所以  $N_s = \frac{\Delta\omega_a \Delta\tau}{\Delta\omega_L \cdot dt}$  . 由此可见 ,介质增益谱的采样点实际上是 与介质增益谱线宽、激光脉宽成正比 ,与激光带宽、脉冲采样精度成反比 . 也就是说 ,在介质增益谱

线宽、激光脉宽、脉冲采样精度一定的情况下 ,激光带宽越窄 ,则增益光谱采样点数越多 ,从而使模拟计算非常慢 耗时很长 .

表 1 给出了不同空间、时间采样精度下的计算耗时问题 . 以 2 nm/1 ns 的激光脉冲为例 ,空间采样为 128 × 128 ,时间采样为 128 ,增益光谱采样点将大于 256 个点 ,用 IBM Eserver206 ,主频 3.4 GHz (4CPU) 内存 4 G 的计算机计算 ,则计算一个数据点要耗时 5 h . 对 5 nm/1 ns 的激光脉冲 ,计算一个数据点耗时 1.7 h . 如果为 10 nm/1 ns ,则增益光谱采样点减小 ,计算耗时减小 ,如果针对 1 nm/1 ns ,增益光谱采样点需成倍增加 耗时将更多 .

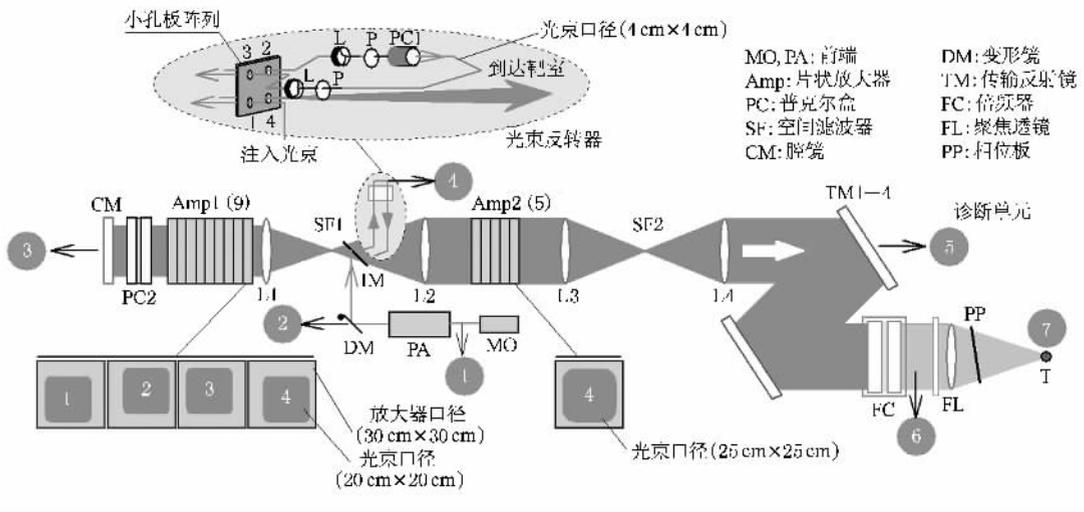


图 1 高功率激光系统光路示意图

表 1 不同空间、时间采样下的计算耗时

空间采样点	16 × 16	32 × 32	64 × 64	128 × 128	128 × 128	128 × 128	128 × 128	32 × 32	64 × 64	64 × 64
时间采样点	128	128	128	128	64	32	16	64	64	32
0.7 J 2 nm·ns <sup>-1</sup>	计算时间/min	4	18	72	294	72	18	5	5	17
	输出能量/J	2334	2312	2310	2310	2355	2437	2583	2356	2355
0.7 J 5nm·ns <sup>-1</sup>	计算时间/min	2	6	25	102	27	7	2	2	7
	输出能量/J	2123	2104	2103	2103	2146	2224	2364	2147	2146

因此 ,如何平衡时空采样精度以及增益光谱采样精度从而节省计算时间 ,同时又能保证计算结果的准确性 ,是目前宽带激光脉冲传输放大数值计算中普遍遇到的问题 . 程序的并行化能够节省一定的时间 ,但能否从根源上解决计算耗时问题 ? 还需要进一步做相关算法研究 .

另外 ,通过表中数据可以看出 : 1) 空间采样对输出能量影响较小 ,但会对波面调制度与对比度影响比较大 ; 2) 时间采样对输出能量影响大于空间采样

的影响 ,因为时间采样与增益光谱采样相关 .

初步计算认为空间采样 32 × 32 与 128 × 128 的输出能量差异小于 1.0% ,因此为节省计算时间 (0.7 J , 2nm·ns<sup>-1</sup> 耗时由 5 h 缩短至 18 min , 0.7 J , 5nm·ns<sup>-1</sup> 耗时由 1.7 h 缩短至 6 min) ,通常能量计算中可以取空间采样 32 × 32 ,时间采样 128 来计算 .

### 3.3. 激光系统对不同带宽脉冲放大能力的评估

激光系统具有基本功能的设计要求 ,即系统必

须具备足够的输出能力(包括增益能力、负载能力),确保系统在常规运行期间能够稳定输出达到设计要求的激光能量.因此,利用光传输放大模拟软件,完成激光系统总体输出能力即放大能力的评估,是建造高能拍瓦激光系统的起步,同时也是系统的优化设计提供的基础.

图2给出了介质线宽为完全均匀加宽( $C_r = 0$ )时不同放大带宽下激光系统的输出能力与注入能量的关系.计算参数除以上说明的基本参数外,注入脉冲为高斯型脉冲,时间计算窗口为4.8 ns,脉冲宽度为1 ns,空间计算窗口为10 cm,光束口径为7 cm.SG99使用的参数除时间切片为50、脉冲形状为其自定义的与高斯型脉冲接近的激光脉冲外,其他与CPAP相同.图中 $b_0$ 为啁啾量,单位为nm/ns.

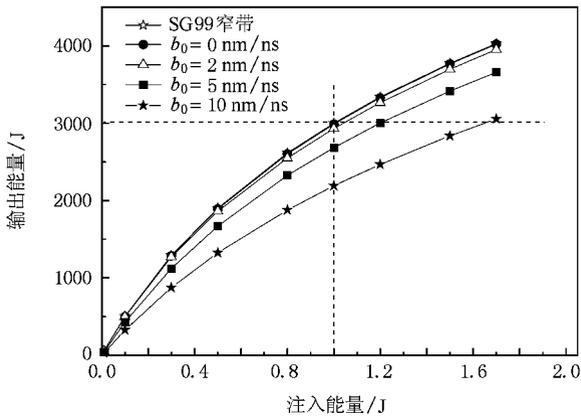


图2 不同带宽下激光系统的放大能力

由图2可以看出,在均匀加宽条件下,窄带激光系统的放大能力最高,随着带宽的增加,系统放大能力逐渐降低.当系统在窄带下输入为1.0 J,输出达到3000 J/1ns时,在相同输入条件下,不同宽带的激光脉冲其输出能力随带宽降低:2 nm输出能量减小2%,5 nm减小11%,10 nm将减小约27%.在大带宽下,要得到与窄带相同的输出能量,必然要大大增加注入能量.

### 3.4. 交叉弛豫时间对脉冲放大特性的影响

交叉弛豫是处于同一能级上的不同粒子之间的相互作用,它使这些粒子在与激光作用后重新形成某种分布,交叉弛豫时间主要用来表征激光作用后粒子数变化的快慢.当交叉弛豫作用很快时(趋近于0),对应于均匀加宽;交叉弛豫时间很慢时(取交叉弛豫时间为无穷大),对应于非均匀加宽.交叉弛豫

时间不同,放大过程的跃迁粒子数分布不同,反转粒子数的烧孔效应程度不同,脉冲的放大特性也会有所不同.

图3给出了不同交叉弛豫时间下激光系统的输出能量与注入能量的关系,计算条件见第3.1节.

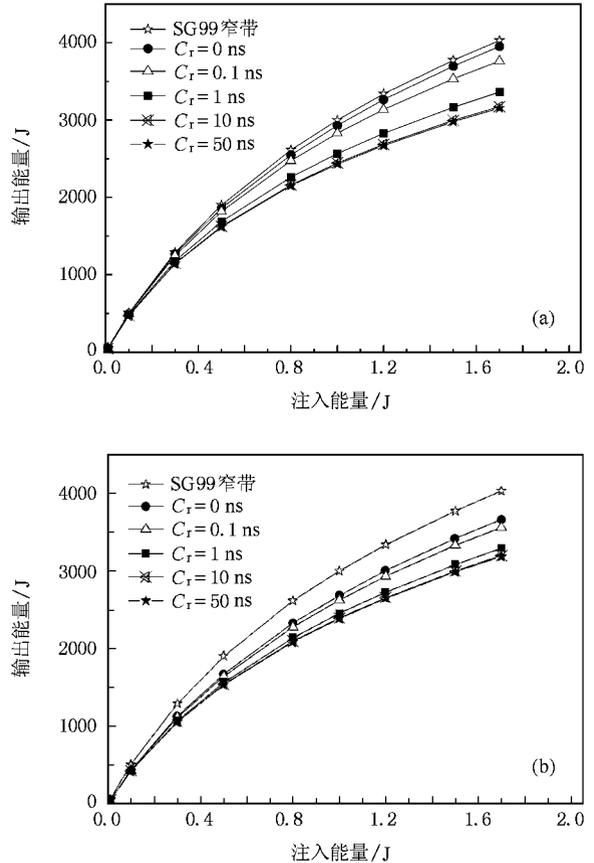


图3 不同交叉弛豫时间下激光系统的放大能力 (a)  $t = 1$  ns,  $b_0 = 2$  nm/ns (b)  $t = 1$  ns,  $b_0 = 5$  nm/ns

由图可知,宽带条件下(啁啾量 $b_0 = 2$  nm/ns),不同的交叉弛豫时间对系统输出能力的影响非常大.随着交叉弛豫时间的增加,激光系统的输出能力明显下降.在带宽为几个纳米时完全非均匀加宽比完全均匀加宽的输出能量(3000 J, 1 ns脉宽)降低了约20%.也就是说,在非均匀加宽下,因为反转粒子数的烧孔效应使得增益和提取效率减小,因此放大器的增益下降了.当交叉弛豫时间大于10 ns后不再影响到系统的输出能力.因此可初步判定交叉弛豫时间的作用范围为0—10 ns(0对应于完全均匀加宽,10 ns对应于完全非均匀加宽).同时,随着带宽的增加,交叉弛豫时间的影响向非均匀加宽方向靠近,可以预见,当激光带宽与增益带宽可比时,交叉弛豫时间的影响将退化.

## 4. 结 论

本文以宽带激光脉冲传输放大物理模型为基础,采用所开发的宽带光传输软件 CPAP,通过数值模拟,针对某大型激光系统的光路特点,指出对于宽带激光脉冲,其时空采样精度、光谱采样精度、计算精度与计算速度之间相互制约,是目前宽带激光传

输放大数值模拟面临的问题之一,通过对均匀加宽条件下激光系统对不同带宽脉冲放大能力的评估,得到放大能力随带宽降低的一般规律,通过分析交叉弛豫时间对宽带激光脉冲的放大特性影响,初步确定了交叉弛豫时间的作用范围应为 0—10 ns 之间。

本文的研究结果将为设计和优化新一代宽带高能皮秒拍瓦激光系统和宽带纳秒激光系统提供理论依据。

- 
- [ 1 ] Strickland D , Mourou G 1985 *Opt . Comm .* **56** 219
- [ 2 ] Pery M D , Stuart B C , Pennington D M 1998 *UCRL-JC-129760* February
- [ 3 ] Peng H S 2006 *Chinese Journal of Lasers* **33** 865 ( in Chinese ) [ 彭翰生 2006 *中国激光* **33** 865 ]
- [ 4 ] Kitagawa Y , Sentoku Y , Akamatsu S 2002 *Phys . Plasmas* **9** 2202
- [ 5 ] Basov N G 1991 *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena* **10** 25
- [ 6 ] Rothenberg J E 1997 *J . Opt . Soc . Am . B* **14** 1664
- [ 7 ] Haynam C A , Wegner P J , Auerbach J W 2007 *Appl . Opt .* **46** 3276
- [ 8 ] Song X Z , Liu H J , Wang Y S , Zhao W 2008 *Acta Phys . Sin .* **57** 271 ( in Chinese ) [ 宋啸中、刘红军、王屹山、赵卫 2008 *物理学报* **57** 271 ]
- [ 9 ] Liu H G , Zhang R B , Zhu C , Chai L , Wang Q Y 2008 *Acta Phys . Sin .* **57** 2981 ( in Chinese ) [ 刘华刚、章若冰、朱晨、柴路、王清月 2008 *物理学报* **57** 2981 ]
- [ 10 ] Franzl L M , Nodvik J S 1963 *J . Appl . Phys .* **34** 2346
- [ 11 ] Chuang Y H , Zheng L , Meyerhofer D D 1993 *IEEE J . Quantum . Electron .* **29** 270
- [ 12 ] Garnier J , Videau L , Goue' dard C , Migus A 1998 *J . Opt . Soc . Am . B* **15** 2773
- [ 13 ] Morice O 2003 *Opt . Eng .* **42** 1530
- [ 14 ] Lei D J , Liu H L , Fu X Q , Wen S C 2006 *Science Technology and Engineering* **6** 2245 ( in Chinese ) [ 雷大军、刘海兰、傅喜泉、文双春 2006 *科学技术与工程* **6** 2245 ]
- [ 15 ] Fu X Q 2005 ( Ph. D. Dissertation ) ( Shanghai : Fudan University ) ( in Chinese ) [ 傅喜全 2005 ( 博士学位论文 ) ( 上海 : 复旦大学 ) ]
- [ 16 ] Liu L Q , Su J Q , Luo B , Wang W Y , Jing F , Wei X F 2007 *Acta Phys . Sin .* **56** 6749 ( in Chinese ) [ 刘兰琴、粟敬钦、罗斌、王文义、景峰、魏晓峰 2007 *物理学报* **56** 6749 ]

# Amplification of hybrid-widen linewidth of broadband pulses in Nd :glass laser systems \*

Liu Lan-Qin<sup>1)†</sup> Mo Lei<sup>1)</sup> Luo Bin<sup>2)</sup> Su Jing-Qin<sup>1)</sup> Wang Wen-Yi<sup>1)</sup> Wang Fang<sup>1)</sup> Jing Feng<sup>1)</sup> Wei Xiao-Feng<sup>1)</sup>

<sup>1</sup> *Research Center of the Laser Fusion ,China Academy of Engineering Physics ,Mianyang 621900 ,China )*

<sup>2</sup> *School of Computer and Communication Engineering ,Southwest Jiaotong University ,Chengdu 610031 ,China )*

( Received 16 January 2008 ; revised manuscript received 17 September 2008 )

## Abstract

Base on physical amplification models established to describe the broadband laser pulse amplification processes , using numerical simulation methods , we analyse the amplification abilities of the Nd :glass laser system under different spectral linewidths. The results indicate that the output energies decrease with the increasing spectral linewidth. Compared with narrowband laser pulse of 3000 J/1ns ,under the same conditions , the output energies of broadband laser pulse will reduce 2% , 11% and 27% for 2nm , 5nm and 10nm laser pulses ,respectively. The influences of cross relaxation on the amplification processes are also studied. The output energies of completely nonhomogeneous broadening will reduce about 20% compared with that of completely homogeneous broadening. Then , the range of cross relaxation time is estimated to be 0—10 ns.

**Keywords** : laser system , broadband laser , amplification process , cross relaxation

**PACC** : 9240C , 4260K , 4265K , 9265R

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China and the Development Foundation of Science and Technology of China Academy of Engineering Physics , China ( Grant No.2007B08005 ).

† E-mail :ly\_ly2008@yahoo.com.cn