

基于混合加宽的宽带激光脉冲放大的物理模型^{*}

刘兰琴^{1)†} 栗敬钦¹⁾ 罗 斌²⁾ 王文义¹⁾ 景 峰¹⁾ 魏晓峰¹⁾

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)

(2006 年 11 月 30 日收到, 2007 年 4 月 5 日收到修改稿)

建立了宽带激光脉冲放大的物理模型. 模型引入交叉弛豫时间表征不同频率响应下反转粒子与激光作用后重新形成分布的快慢. 模型考虑的整体非均匀加宽、局部均匀加宽的混合加宽机理弥补了现有放大模型仅考虑均匀加宽的不足. 基于此物理模型, 开发了宽带激光传输放大的模拟设计软件 CPAP, 并讨论了在一定条件下此宽带模型可回归到窄带模型.

关键词: 物理模型, 宽带激光, 放大, 混合加宽

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

1. 引 言

随着啁啾脉冲放大 CPA 技术^[1]与用于激光聚变研究的高功率固体激光器的耦合^[2], 全新一代的皮秒脉冲高功率激光系统开拓了许多新的研究领域^[3,4]. 快点火和高能量密度物理研究是目前比较热门的研究领域之一, 受其需求牵引, 各科技大国都在相继建造高能皮秒拍瓦激光装置. 而宽带激光脉冲的传输放大是建造高能皮秒拍瓦激光装置不可或缺的一项重要研究内容, 它是决定装置总体性能的因素之一. 同时, 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, 提高靶面辐照均匀性. 由于增益介质的特殊性(均匀加宽机理与非均匀加宽机理并存), 以钽玻璃等为增益介质的皮秒激光脉冲的研究相对滞后, 特别是对宽带激光脉冲的放大模型、增益窄化、增益饱和和效应等, 目前的认识仍不完善.

激光脉冲放大的理论研究可以追溯到上世纪 60 年代初, Franzl 和 Nodvik 最早建立了适用于窄带激光放大的 F-N 速率方程^[5]; 1985 年, Hall 等人^[6]讨论了宽带放大时均匀加宽与非均匀加宽的提取效率问题, 但没有给出激光放大的物理模型; 1993 年, Chuang 等人研究了啁啾脉冲的传输问题^[7], 比较详

尽地分析了自相位调制、增益窄化、增益饱和及频率失配等问题, 成为研究啁啾脉冲传输的经典文献; 2003 年, Morice 研发了宽带传输软件 miro^[8], 包含了衍射问题、色散效应、增益饱和、增益窄化等, 较为全面的解决了宽带传输问题; 2005 年, Planchon 等人将 1D 模型拓展到了 3D 模型^[9], 在忽略色散效应和自聚焦的基础上研究了衍射问题、热透镜问题; 2002 年, 卢兴强在 Chuang 的基础上推导了无近似条件的宽带激光放大理论模型^[10]; 2005 年, 傅喜全推导了宽带激光在非均匀加宽的放大介质中的放大模型^[11], 同时指出模型的求解难度是非常大的.

以上激光脉冲放大的物理模型基本上都是典型的均匀加宽模型, 适用于掺钛蓝宝石晶体等存在均匀加宽且线宽较宽的放大介质. 现有模型的不足之处在于: 基本上都是以均匀加宽为主, 没有考虑介质本身对激光频率的响应, 直接假定了在介质放大带宽中对所有激光频率是一样的, 这种假设对于放大介质的带宽远大于激光带宽时是成立的, 但是当激光带宽大到某种程度时, 必须考虑放大介质的频率响应函数. 因此对钽玻璃等线宽远小于激光带宽的增益介质, 在建立宽带激光脉冲放大的物理模型时, 除了要考虑脉冲与放大器相互作用引起的增益饱和效应以及放大器任何时候都存在的能级弛豫效应^[12,13]外, 还需要考虑原子线宽、激光脉冲带宽之间

^{*} 国家高技术研究发展计划(863)批准号: 2006AA845010, 2006AA845013 资助的课题.

[†] E-mail: ly_ly2008@yahoo.com.cn

的关系,以及放大介质的均匀加宽和非均匀加宽现象.均匀加宽机理是所有原子的反转粒子数对介质放大带宽的所有频率都有效,而非均匀加宽机理是不同频率的反转粒子数对放大介质放大带宽的频率都是不同的^[11,14].

本文将针对铯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,考虑混合加宽机理,建立较为完善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,为新一代高能拍瓦激光系统的建造提供设计依据.

2. 宽带激光脉冲放大的物理建模

本文在建立宽带激光脉冲放大的物理模型时,

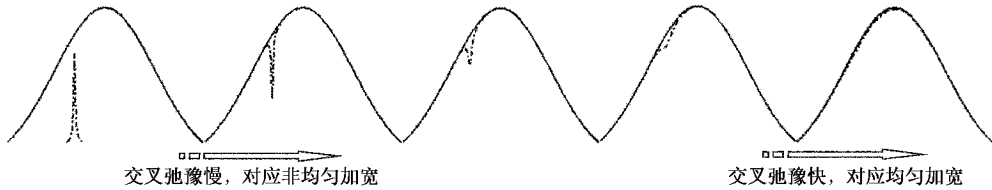


图1 激光作用后粒子数随时间的变化示意图

宽带激光脉冲放大的物理建模,将基于速率方程,在窄带激光脉冲放大物理模型的基础上^[13]演化得到.文献^[15]给出的与有关脉冲通量和激光上、下能级粒子数有关的反转粒子数随时间变化的速率方程为

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = -\frac{n\sigma I}{h\nu} - \frac{n_1}{\tau_1} - \frac{n_1 - (n_1 + n'_1)(1 + k_1)}{\tau_{p1}}, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial n'_1}{\partial t} = -\frac{n'_1}{\tau_1} + \frac{n_1 - (n_1 + n'_1)(1 + k_1)}{\tau_{p1}}, \quad (1b)$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = \frac{n\sigma I}{h\nu} - \frac{n_2}{\tau_2} + \frac{n_1}{\tau_1} - \frac{n_2 - (n_2 + n'_2)(1 + k_2)}{\tau_{p2}}, \quad (1c)$$

$$\frac{\partial n'_2}{\partial t} = -\frac{n'_2}{\tau_2} + \frac{n_2 - (n_2 + n'_2)(1 + k_2)}{\tau_{p2}}, \quad (1d)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t}\right) I = (n\sigma - \alpha)I, \quad (1e)$$

这里, I 是脉冲通量密度, n_1 和 n_2 分别是激光工作上、下能级粒子数密度, n'_1 和 n'_2 分别是和激光工作上、下能级简并的各子能级粒子数密度和, k_1 和

主要考虑了放大介质的混合加宽机理,即整体非均匀加宽、局部均匀加宽机理;并引入了交叉弛豫时间来表征不同频率响应下反转粒子与激光作用后重新分布的快慢.其过程可描述为当激光脉冲的频率范围很窄时,仅能用掉与其频率匹配的反转粒子,从而在放大介质谱线上形成凹陷.当交叉弛豫作用很快时(趋近于0),凹陷可以被迅速填满,这时整个谱线对放大均有贡献,对应于均匀加宽;但是,当激光脉宽相对于交叉弛豫时间很长时(取交叉弛豫时间为无穷大,即弛豫慢),只有中心频率附近的粒子数才可以填充到凹陷中,而离它较远的粒子数在激光作用时间内远来不及运动,这时谱线的非均匀性对整个放大过程产生了影响,对应于非均匀加宽(见图1所示).

k_2 用来表示工作能级粒子数密度与简并的各子能级粒子数密度和之间的比例关系.激光工作上、下能级的弛豫时间分别是 τ_1 和 τ_2 ,它们各自简并的子能级弛豫时间是 τ'_1 和 τ'_2 .激光上、下能级中存在的热化效应引入热化时间 τ_{p1} 和 τ_{p2} 来描述, h 是普朗克常量, ν 是光子频率, σ 是受激发射截面, $n = n_1 - n_2$ 是反转粒子数密度, α 是激活介质内吸收系数.

和均匀加宽相比,非均匀加宽的难点在于处理不同频率响应下的反转粒子数随时间变化的速率方程问题.因此,宽带激光脉冲放大的物理建模,除了考虑脉冲与放大器相互作用引起的增益饱和效应及放大器任何时候都存在的能级弛豫效应外,还要考虑到原子线宽、激光脉冲带宽之间的关系,以及放大介质本身对不同激光频率的响应.在方程(1a)~(1e)的基础上,考虑整体非均匀加宽、局部均匀加宽的混合加宽机理,则有

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(\nu)}{\partial t} = & \int -\Delta n(\nu)\sigma g_H(\nu', \nu) \frac{I(\nu')}{h\nu'} d\nu' - \frac{n_1(\nu)}{\tau_1} \\ & - \frac{n_1 - (n_1 + n'_1)(1 + k_1)}{\tau_{p1}} g_N(\nu, \nu_0) \\ & - \frac{n_1(\nu) - n_1 g_N(\nu, \nu_0)}{\tau_{cr}}, \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial n_2(\nu)}{\partial t} = \int \Delta n(\nu) \sigma g_H(\nu', \nu) \frac{K(\nu')}{h\nu'} d\nu' - \frac{n_2(\nu)}{\tau_2} - \frac{n_2 - (n_2 + n'_2)(1 + k_2)}{\tau_{p2}} g_N(\nu, \nu_0) - \frac{n_2(\nu) - n_2 g_N(\nu, \nu_0)}{\tau_{cr}} + \frac{n_1(\nu)}{\tau_1}, \quad (2b)$$

$$\frac{\partial n'_1}{\partial t} = -\frac{n'_1}{\tau'_1} + \frac{n_1 - \frac{n_1 + n'_1}{1 + k_1}}{\tau_{p1}}, \quad (2c)$$

$$\frac{\partial n'_2}{\partial t} = -\frac{n'_2}{\tau'_2} + \frac{n_2 - \frac{n_2 + n'_2}{1 + k_2}}{\tau_{p2}}, \quad (2d)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t}\right) K(\nu') = \left[\int \Delta n(\nu) \sigma g_H(\nu', \nu) d\nu - \alpha \right] K(\nu'), \quad (2e)$$

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

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

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

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

$$\Delta n(\nu) = n_1(\nu) - n_2(\nu). \quad (2h)$$

以上方程中的各物理量的含义见表 1 所示。

表 1 各物理量的含义

$n_1(\nu), n_2(\nu)$	按表观中心频率分布的激光工作上、下能级粒子数密度
$\Delta n(\nu)$	按表观中心频率分布的反转粒子数密度
$K(\nu)$	按表观中心频率分布的脉冲强度(单位面积光功率)
n_1, n_2	对表观中心频率求和的激光工作上、下能级总粒子数密度
n'_1, n'_2	与激光工作上、下能级简并的各子能级粒子数密度
k_1, k_2	和热平衡时工作上、下能级与其简并能级粒子数之间的比例关系
τ_1, τ_2	激光工作上、下能级寿命
τ'_1, τ'_2	与激光工作上、下能级简并的各子能级寿命
τ_{p1}, τ_{p2}	激光上、下能级热化时间
τ_{cr}	交叉弛豫时间
$g_H, \Delta\nu_H$	均匀加宽线型函数和均匀加宽谱线宽
$g_N, \Delta\nu_N$	归一化非均匀加宽线型函数和非均匀加宽谱线宽
ν_0	非均匀加宽中心频率
σ, α	受激发射截面和吸收系数

上述速率方程组中,各项的物理意义是清晰的,以激光工作上能级方程(1)式为例,方程式左边表示按表观中心频率分布的激光工作上能级粒子数密度随时间的变化情况;其右边第一项

$\int -\Delta n(\nu) \sigma g_H(\nu', \nu) \frac{K(\nu')}{h\nu'} d\nu'$ 表示按表观中心频率分布的激光脉冲与放大器相互作用引起的粒子数减少;第二项 $-\frac{n_1(\nu)}{\tau_1}$ 表示由于能级弛豫效应引起的粒子数减少;第三项

$-\frac{n_1 - (n_1 + n'_1)(1 + k_1)}{\tau_{p1}} g_N(\nu, \nu_0)$ 表示由于热化效应引起的粒子数变化($n_1 + n'_1$) ($1 + k_1$)是激光工作上能级与其简并子能级达到热平衡时粒子数期望值,若 n_1 的当前值大于其期望值,热化效应使得粒子数减少,反之则增加;第四项 $-\frac{n_1(\nu) - n_1 g_N(\nu, \nu_0)}{\tau_{cr}}$ 表示由于交叉弛豫效应引起的粒子数变化。

3. 讨 论

3.1. 宽带激光传输模拟设计软件 CPAP

通过宽带激光脉冲放大的物理建模,开发了宽带激光传输的计算机模拟设计软件 CPAP. 目前该软件的主体框架结构已搭建好,放大模块的程序代码也基本完成,能够进行能量放大、增益窄化、增益饱和的模拟,程序的算法优化及完善还在进行中。

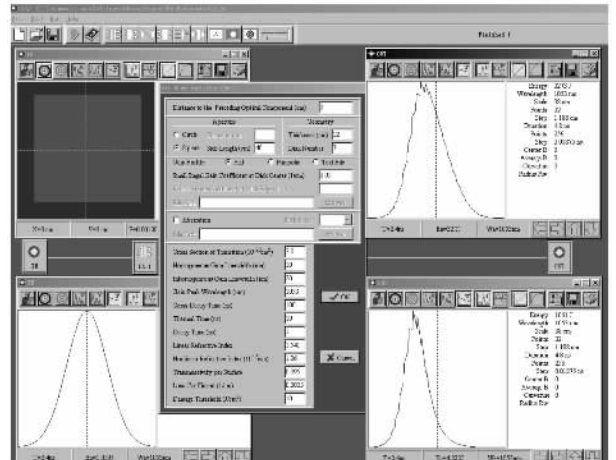


图 2 宽带传输计算机模拟设计软件 CPAP

3.2. 交叉弛豫时间

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(如图3所示).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,因此放大器的增益会下降.

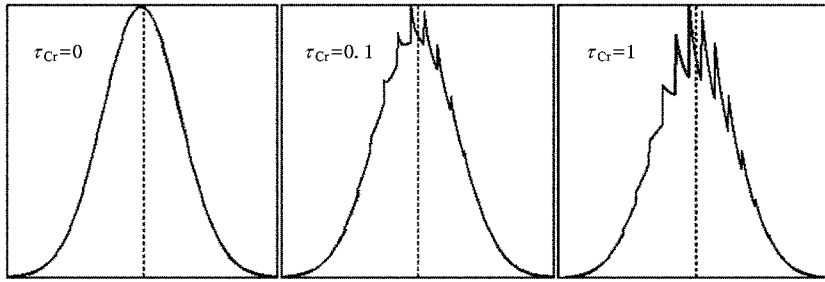


图3 不同交叉弛豫时间 τ_{cr} 下反转粒子数的分布图

3.3. 回归于窄带物理模型

由于窄带放大模型采用的是均匀加宽模型,宽带放大模型采用的是混合加宽模型,只有当交叉弛豫时间趋近于零时,混合加宽才过渡到均匀加宽,在此情况下当输入脉冲的啁啾因子足够小时,宽带放大模型可回归到窄带放大模型.为了验证宽带放大模型回归于窄带物理模型的准确性,利用SG99软件进行了考核.SG99软件是中物院激光聚变研究中心独立自主开发的第一套用于高功率固体激光装置窄带光脉冲传输放大行为全过程综合分析的模拟设计系统,其可靠性已通过理论与计算比对、与国外同类软件计算结果比对,以及在中物院激光聚变研究中心的总体集成实验平台和原型装置实验平台的实验考核中进行了验证.

宽带放大软件CPAP与SG99软件的初步对比计算结果见图4.取基本参数:空间光束为方形平顶光束,时间脉冲为高斯脉冲,放大器3片,片厚4cm,小信号增益系数0.05,脉冲宽度为1ns;对于窄带,时间切片为50,软化因子0;对于宽带,时间采样512x512,空间取样32x32,交叉弛豫时间为0,啁啾因子为0.

3.4. 小信号增益下放大过程的考核

在小信号增益下,还将CPAP的计算结果与基于薛定谔方程的时间一维模拟程序的计算结果进行了对比,见图5.在能量较小时,两者的结果基本一致,在能量较大时,出现差异.影响因素有:加宽机

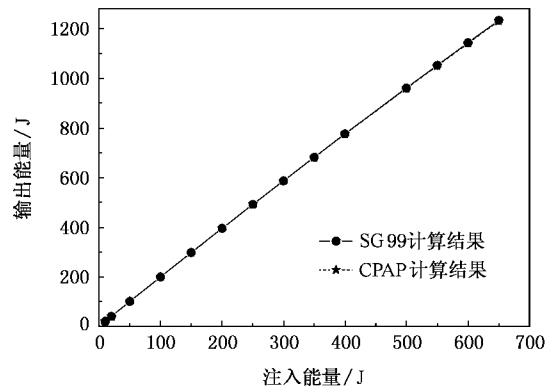


图4 宽带放大软件CPAP与SG99软件初步对比计算结果

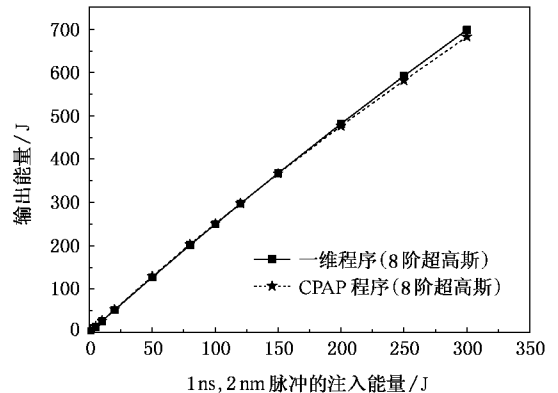


图5 不同程序结算结果的对比

理,数值计算方法、采样精度等等,进一步更为精细的考核还在进行中.

4. 结 论

软件 CPAP 的建立, 将为解决宽带传输的基本物理问题奠定基础, 为新一代高能拍瓦激光系统的建造提供设计依据, 并指导工程建设.

宽带激光脉冲放大的物理模型及相应模拟设计

- [1] Strickland D , Mourou G 1985 *Opt. Comm.* **56** 219
- [2] W Koechner , Sun W 2002 *Colid-State Laser Engineering* (Science Press)(in Chinese)[W Koechner 著、孙文译 2002 固体激光工程(科学出版社)]
- [3] Liu L Q 2005 *Doctoral dissertation* (Graduate-Department , CAEP) (in Chinese)[刘兰琴 2005 博士学位论文(中物院研究生部)]
- [4] Hou X 2000 *Journal of Air Force Engineering University* **1** 1
- [5] Franz L M , Nodvik J S 1963 *J. Appl. Phys.* **34** 2346
- [6] Hall D W , Hagen W F , Weber M J 1985 *UCRL* 93255
- [7] Chuang Y H , Zheng L , Meyerhofer DD 1993 *IEEE J. Quantum. Electron.* **29** 270
- [8] Morice O 2003 *Opt. Eng.* **42** 1530
- [9] Planchon T A , Burgy F , Rousseau J P 2005 *Appl. Phys. B* **80** 661
- [10] Lu X Q , Qian L J , Fan D Y 2002 *Chinese Journal of Lasers A* **29** 882 (in Chinese)[卢兴强、钱列加、范滇元 2002 中国激光 A **29** 882]
- [11] FU X Q 2005 *Doctoral dissertation* (Fudan University) (in Chinese)[傅喜全 2005 博士学位论文(复旦大学)]
- [12] Lowdermilk W H , Murray J E 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 2436
- [13] Maitland A , Dunn M H 1969 North-Holland publishing Company.
- [14] Zhou B K , Gao Y Zh , Chen J H 2000 *Principle of Laser* (Defense Industry press)(in Chinese)[周炳琨、高以智、陈加铎 2000 激光原理(国防工业出版社)]
- [15] Luo B 1999 *Technique Summary Report* (in Chinese)[罗斌 1999 技术总结报告]

Physical modeling of broadband pulsed laser amplification process based on hybrid-widened linewidth^{*}

Liu Lan-Qin^{1)†} Su Jing-Qin¹⁾ Luo Bin²⁾ Wang Wen-Yi¹⁾ Jing Feng¹⁾ Wei Xiao-Feng¹⁾

1) *The Laser Fusion Research Center , CAEP , Mianyang 621900 , China*

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

(Received 30 November 2006 ; revised manuscript received 5 April 2007)

Abstract

Physical model was established to describe the broadband pulsed laser amplification processes. In this model , Cross relaxation was introduced to study the transformation of homogeneous and inhomogeneous population inversion after laser passage. Hybrid-widened linewidth , homogeneity and inhomogeneity were emphatically considered , which were had not been take into account in other models. Based on the physical model , computer simulation software CPAP for broadband pulse laser amplification process was developed. At last , we discussed the possibility that this broadband physical model can be transfered to the narrow-band physical model under certain conditions.

Keywords : physical model , broadband laser , amplification , hybrid-widened linewidth

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

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2006AA845010 , 2006AA845013).

[†] E-mail : ly_ly2008@yahoo.com.cn