

文章编号 : 0258-7025(2002)10-0882-03

啁啾脉冲激光放大器输出光束时间特性的理论和数值模拟

卢兴强, 钱列加, 范滇元

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

提要 利用分布傅里叶变换对描述啁啾脉冲放大的非线性薛定谔方程进行求解, 研究了在钕玻璃和钛宝石这两种增益介质中, 自相位调制、增益变窄和增益饱和这三种非线性效应对放大啁啾脉冲输出特性的影响, 具体给出了在不同放大介质中, 它们对放大脉冲的影响程度和影响结果。重点阐明了自相位调制对放大啁啾脉冲的影响, 及其与另外两种非线性效应的内在联系。

关键词 啁啾脉冲, 自相位调制, 增益变窄, 增益饱和, 非线性传输

中图分类号 TN 241 文献标识码 A

Theory and Simulation of Amplified Pulses from Chirped-pulse Laser Amplifier

LU Xing-qiang, QIAN Lie-jia, FAN Dian-yuan

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

Abstract Using parameters of Nd: glass and Ti: sapphire, simulation to nonlinear Schrödinger equation about chirped-pulse-propagation was demonstrated by split-step Fourier method, the effect of self-phase modulation, gain-narrowing and gain saturation to amplified chirped pulses was discussed, and distorted intensity profiles of amplified pulses were also demonstrated here. Putting emphasis on the effect of self-phase modulation and inter-relationship between self-phase and other two nonlinear effects, the analysis presented here is valid for high power laser amplifier designing.

Key words chirped-pulse, self-phase modulation, gain-narrowing, gain-saturation, nonlinear propagation

惯性约束聚变(ICF)中对高功率激光放大器不仅要求具有足够的驱动能量,而且要求激光束具有极高的光束质量,它不仅对光束的空间特性有特别的要求,而且对光束的时间特性也有严格的要求,特别它要求脉冲的信噪比大于 $10^6 \sim 10^7$,这对激光器而言是极其苛刻的要求^[1]。高功率激光放大器对光束质量如此严格的要求,使研究脉冲光在放大介质中的传输,准确描述各种非线性效应对放大脉冲特性的影响,对正确设计高功率激光放大器,得到输出能量高且光束质量好的脉冲输出具有重要的意义。

目前,啁啾脉冲放大技术^[2]已成为高功率激光放大器中应用最广的技术,因此对啁啾脉冲传输特

性进行研究也是重要的课题,啁啾脉冲的特点是在不同时间点具有不同瞬时频率,由于具有不同瞬时频率的脉冲在放大介质中的传输特性也不一样,因此要准确研究啁啾脉冲的传输特性就要从它的电场描述出发,而不能单纯利用其基于光强的理论模型来研究。该文在考虑啁啾脉冲上述特点的基础上,从描述啁啾脉冲传输放大的非线性薛定谔方程、共振极化方程和速率方程出发,对啁啾脉冲经放大后的输出脉冲波形特性进行研究,具体讨论了自相位调制、增益变窄和增益饱和这三种非线性效应对输出脉冲特性的影响,给出了脉冲种子源携带的初始B积分和累积自相位调制对啁啾脉冲放大的影响。

收稿日期 2001-09-17;收到修改稿日期 2001-10-30

基金项目:国家 863 计划 804 主题资助课题。

作者简介:卢兴强(1973—)男,博士研究生,主要从事超短脉冲激光放大研究。E-mail: xingqianglu@sohu.com

1 理论模型

描述啁啾脉冲传输的理论模型,是由纵向

$$\begin{cases} \frac{\partial E_0(z,t)}{\partial z} = -i \frac{\omega_0}{2\epsilon c} P_0(z,t) + i \frac{\beta'}{2} \frac{\partial^2 E_0(z,t)}{\partial t^2} - i \frac{\beta_2}{2} |E_0(z,t)|^2 E_0(z,t) \\ \frac{\partial P_0(z,t)}{\partial t} = -\frac{1}{\Delta\omega_a + i2\omega_0} [(i\omega_0\Delta\omega_a - \omega_0^2 + \omega_a^2)P_0(z,t) + KN(z,t)E_0(z,t)] \\ \frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = i \left(\frac{2^* \omega_0}{4\hbar\omega_a} \right) [E_0^*(z,t)P_0(z,t) - E_0(z,t)P_0^*(z,t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中, $E_0(z,t)$ 和 $P_0(z,t)$ 分别为电场和共振极化率的慢变振幅包络, $N(z,t)$ 为反转粒子数密度, z 为传输距离, t 为运动时间, ω_0 为中心载频, ϵ 和 c 分别为介质中的中心介电常数和光速, β' 为传输常数在 ω_0 处的二阶导数, $\beta_2 = 2\pi n_{2E}/\lambda_0$, λ_0 为真空中的中心激光波长, $\Delta\omega_a$ 为增益介质的原子发射线宽, ω_a 为增益介质的中心发射频率, 常数 $K = \epsilon c \sigma_0 \Delta\omega_a$, σ_0 为介质中心发射频率处受激发射截面, 2^* 为取值在 1 ~ 2 之间的饱和因子^[4], \hbar 为普朗克常数。

利用方程(1)可对高功率激光放大器的放大特性进行研究,此方程不仅适用于计算窄发射截面激光放大器的放大特性,而且同样适用于计算宽发射截面激光放大器的放大特性,因此利用它可更好地研究钕玻璃或钛宝石的放大特性。在具体求解(1)时,可采用分布傅里叶变换法^[5]进行。

2 模拟结果与分析

2.1 初始 B 积分对脉冲的影响

激光放大器的种子源在展宽前具有很小的脉冲宽度,因此在脉冲中部具有很高的激光强度,当它在空气、透镜或其他介质中传输时,就会累积一定的 B 积分,如果种子源在展宽前由于上述原因携带了一定的初始 B 积分,它对放大后啁啾脉冲的影响可用下面计算结果说明:

利用钛宝石的激光参数^[6]计算图1,其发射谱宽取 220 nm,中心波长为 793 nm,使用的种子源在展宽前都是脉宽为 100 fs 的高斯脉冲,使用的展宽器对脉冲引入的色散能把 100 fs 无啁啾高斯脉冲展宽 1000 倍。图中 5 条曲线是利用宽度为 100 fs 种子源,使其携带的初始 B 积分分别为 0, 1, 2, 3 和 4 时,经展宽器展宽后,再在小信号情况下放大 600 倍得到的计算结果。可以看出,当种子源携带的 B 积分由零逐渐增加时,放大器输出脉冲信噪比减小,脉冲质量下降,当携带的初始 B 积分增大一定程度后,

Maxwell 方程、共振极化方程和反转粒子数方程在慢变振幅近似条件下得到的,具体可以用下面方程组描述^[3]

就会导致输出脉冲出现多峰结构,从而严重降低了输出脉冲的质量。基于此种原因,在具体设计激光放大器时,要对种子源的特性提出具体要求。

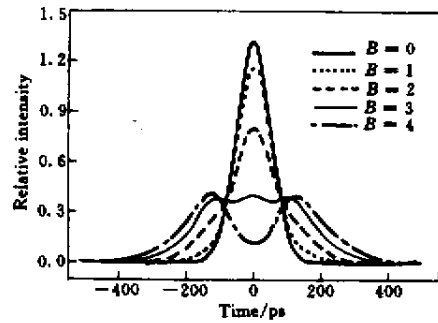


图1 初始 B 积分不同时的放大啁啾脉冲

Fig.1 Amplified chirped pulses under different initial B -integral

2.2 增益变窄对脉冲特性的影响

增益变窄效应存在于激光放大的整个过程中,是影响激光放大器输出脉冲质量的重要因素,其产生的原因是由于放大器对靠近中心发射频率的放大高于两侧其他频谱成分所致。增益变窄与放大器的发射线宽和输入信号的激光谱宽有关,不同谱宽的信号经放大后其增益变窄的程度也不一样,下面用频谱分析法^[7]进行说明。

图2采用的参数是线宽为 30 nm 钕玻璃的有关参数^[8],它对输入啁啾脉冲的小信号放大倍数取 500,利用的输入信号是脉宽 τ 为 100 ps,谱宽 $\Delta\omega_L$ 分别为 1 nm, 10 nm, 25 nm 和 50 nm 的 25 阶超高斯啁啾脉冲,其中心载频为 1053.1 nm,线性啁啾量 $b = \Delta\omega_L \tau / 2$ 。图中曲线是利用上面不同谱宽的输入啁啾脉冲信号经放大后得到的,从中可看出:当输入信号的谱宽和增益介质的发射线宽相比很小时,增益变窄对放大器输出脉冲影响不明显,信号中各种频谱成分的放大相差不大,输出脉冲基本保持超高斯脉冲的形状不变,但随着输入信号频谱宽度的变大,增益变窄效应会越来越明显,脉冲频谱和脉冲波形

也会逐步由超高斯向高斯或双曲正割过渡。特别是当输入信号的谱宽大于增益介质的发射谱宽时,输入脉冲的前沿和后沿包含的部分频率成分超出增益介质的线宽范围,从而将得不到有效放大。因此针对特定的激光增益介质,在设计放大器时要对输入信号的频谱宽度进行必要的选择。

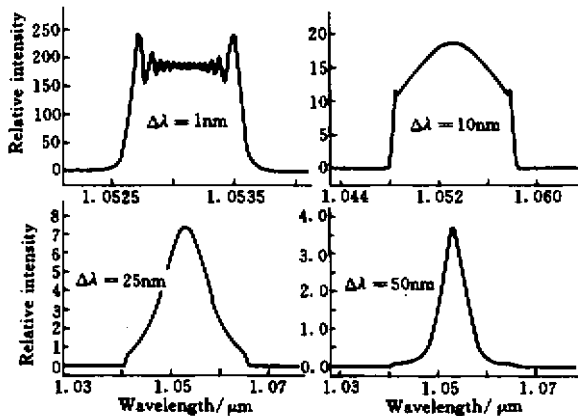


图 2 在相同增益变窄条件下,不同谱宽啁啾脉冲放大后的功率谱

Fig.2 Power spectra for different bandwidth chirped pulses amplified under the same gain-narrowing conditions

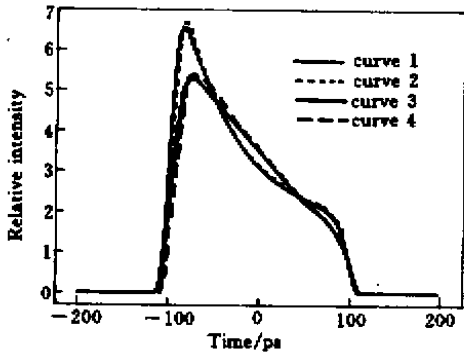


图 3 累积自相位调制对放大啁啾脉冲的作用

Fig.3 Effects of accumulated self-phase modulation to amplified intensity profiles of chirped pulses

2.3 累积自相位调制对输出脉冲的影响

自相位调制会使放大脉冲产生新的相移,这种相移使脉冲中心载频两侧的频率成分分别向脉冲的前后沿漂移,使各点的瞬时频率更加偏离中心载频,从而能导致更严重的增益变窄效应,因此自相位调制能加速放大器的增益变窄效应,并在一定程度上抑制了增益饱和使脉冲的峰值向脉冲前沿移动的趋势,使脉冲峰值更加靠近脉冲中部。自相位调制效应的这种作用只有在 B 积分累积到一定程度后才明显表现出来,因此它一般发生在饱和放大阶段。

图 3 是利用 7 阶超高斯输入脉冲在饱和放大阶段进行的计算,采用的参数为非线性折射率取 1.2×10^{-13} esu 的钽玻璃的激光参数^[8]。

曲线 1 和 2 利用的输入信号为无啁啾的超高斯脉冲,曲线 3 和 4 利用的是谱宽为 10 nm 的正线性啁啾超高斯脉冲,曲线 1 和 3 是不考虑自相位调制时的对比结果,曲线 2 和 4 为考虑自相位调制时的计算结果。从中不难看出考虑自相位调制效应后,两种情况下输出脉冲的峰值都向脉冲中部移动,从而证明了上面的结论。值得一提的是由于钛宝石具有宽而大的增益发射截面,它和钽玻璃相比能缓解增益变窄效应和降低放大过程中的累积 B 积分,这使得自相位调制效应的上述作用在钛宝石激光放大系统中表现很不明显。

3 结 论

从描述啁啾脉冲传输放大特性的非线性薛定谔方程出发,对啁啾脉冲的传输放大特性进行了研究,阐明了在放大过程中,自相位调制、增益变窄和增益饱和这三种非线性效应对输出放大脉冲的影响。特别演示了放大器种子源携带的初始 B 积分和放大过程中累积 B 积分对输出脉冲特性的作用,以及累积 B 积分和增益变窄及增益饱和这两种非线性效应之间的内在联系,同时提出了在设计高功率激光放大器时应注意的有关问题。

参 考 文 献

- 1 Fan Dianyuan, Zhang Xiaomin. Development and Future of Inertial Confinement Fusion Laser System [R]. Annual Reports of Inertial Confinement Fusion, 2000. 11 ~ 12
- 2 D. Strickland, G. Mourou. Compress of amplified chirped optical pulses [J]. *Opt. Comm.*, 1985, **56**(3) 219 ~ 221
- 3 Lu Xingqiang, Fan Dianyuan, Qian Liejia. Theory of high power Ti:sapphire laser amplifier [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9):1059 ~ 1062 (in Chinese)
- 4 A. E. Siegman. Lasers [M]. Mill Valley, CA : Univ. Sci., 1986, Ch.4
- 5 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. Boston, MA : Academic, 1989, Ch.2
- 6 D. N. Nikogosyan. Properties of Optical and Laser-related Materials [M]. John Wiley & Sons, Inc., 1997. 1 ~ 13
- 7 Y. H. Chuang, L. Zheng, D. D. Meyerhofen. Propagation of light pulses in a chirped-pulse-amplification laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(1) 270 ~ 280
- 8 G. J. Linford, R. A. Saroyan, J. B. Trenholme *et al.*. Measurements and modeling of gain coefficients for Neodymium laser glasses [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15** (6) 510 ~ 523