

# 超短脉冲在放大介质中传输特性研究

楚晓亮 张 彬

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

**摘 要** 利用非线性薛定谔方程, 详细研究了放大介质的增益窄化和增益饱和效应对超短脉冲在放大介质传输特性的影响, 以及传输过程中 B 积分的影响. 在此基础上, 对超短脉冲放大系统的逆问题进行了研究, 即在给定放大系统参数和满足物理实验要求的输出脉冲波形前提下, 求出相应的输入脉冲波形.

**关键词** 非线性薛定谔方程; 增益饱和; 增益窄化; B 积分

**中图分类号** TN212; TN249 **文献标识码** A

## 0 引言

近年来, 超短脉冲技术得到了飞速发展, 许多全固化的超短脉冲系统已经建成. 现有的已报道的全钛宝石超短脉冲系统的输出功率已接近 1 PW<sup>[1]</sup>, 从而为人们研究某些物理问题提供了新的工具, 也为惯性约束聚变提供了新的方法. 在全固化系统中所普遍采用的放大介质是钛宝石晶体, 它具有较宽的增益带宽, 高的饱和通量密度, 好的热导性等特点. 然而, 由于超短脉冲具有很高的功率密度, 容易对放大介质等光学元器件造成破坏, 因此, 在超短脉冲高功率激光系统中常采用啁啾脉冲放大技术, 即先将超短脉冲进行展宽, 然后, 使之在放大器中放大, 最后, 再将放大的脉冲进行压缩. 在为种子脉冲提供能量的放大过程中, 放大介质的增益窄化、增益饱和、色散和 B 积分等效应会影响输出脉冲的波形和频谱, 进而对脉冲的压缩和输出激光的光束质量产生影响. 因此, 有必要对超短脉冲放大系统中光传输的正、逆问题进行研究. 目前, 已建立了多种物理模型来研究啁啾脉冲在放大系统中的传输特性<sup>[2-7]</sup>, 这些模型都有各自的特点. 为了便于同时解决光传输的正、逆问题, 通过比较分析后, 本文将采用非线性薛定谔方程计算模型<sup>[2]</sup>, 并详细考虑了增益窄化、增益饱和、色散和 B 积分等效应对超短脉冲放大系统中光传输特性的影响. 文中所用方法和有关结果对超短脉冲放大系统的设计有参考价值.

## 1 理论模型

从麦克斯韦方程组出发, 可得到的光传输所满足的波动方程为

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, \omega) + \varepsilon(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (1)$$

由于钛宝石晶体为双折射介质, 在实际工作中常使入射光脉冲的偏振方向  $\pi$  偏振, 以使入射光脉冲获得的增益最大, 因此, 可假设介质中的光脉冲为线偏振光, 其电场可表示为

$$E(r, T) = A(x, y, z, T) \exp(i\beta_0 z - i\omega_0 T) \quad (2)$$

式中,  $\beta_0 = n_0 \omega_0 / c$  是线性传输常数,  $n_0$  是线性折射率,  $\omega_0$  是输入脉冲的中心频率.

对式(2)做傅里叶变换可得

$$E(r, \omega) = A(x, y, z, \omega - \omega_0) \exp(i\beta_0 z) \quad (3)$$

进一步将式(3)代入式(1), 运用与文献[2]、[8]类似的处理方法, 可得到超短脉冲在放大系统中所满足的传输方程

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \left[ \frac{i}{2\beta_0} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{i}{2\beta_0} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} + \frac{i\omega_0 n_2}{c} |A|^2 + \frac{g - \alpha}{2} \right] A \quad (4)$$

式中,  $\beta_0$  为传输常数,  $\beta_2$  和  $\beta_3$  分别表示群速度色散和三阶色散常数,  $\omega_0$  是中心频率,  $n_2$  是非线性折射率系数 ( $\text{cm}^2/\text{V}^2$ ),  $g$  是增益系数,  $\alpha$  是损耗系数. 为表述方便, 上式只给出了三阶色散, 对于高阶色散按类似的方法也可考虑.

考虑到增益窄化和增益饱和对增益系数的影响,  $g$  可进一步表示为

$$g(x, y, t) = g_0 g_\omega(x, y, t) g_s(x, y, t) = g_0 g_\omega(x, y, t) \exp \left[ -\frac{1}{J_s} \int_0^t I(x, y, \tau) d\tau \right] \quad (5)$$

式中,  $g_0$  是小信号增益系数,  $g_\omega$  和  $g_s$  分别为与增益窄化和增益饱和有关的增益系数,  $J_s$  是饱和能量密度.

B 积分描述了介质的非线性折射率所引起的附加位相变化, 可表示为

$$B(x, t) = \frac{2\pi n_2 L}{\lambda} \int_0^L I(x, t, z) dz \quad (6)$$

\*国家高技术 863 惯性约束聚变领域资助项目  
Tel: 028-85405363 Email: chu-xiaoliang@sohu.com  
收稿日期: 2003-06-30

式中,  $n_2' = 2n_2/\epsilon_0cn$ ,  $\epsilon_0$  是真空介电常数,  $c$  是真空中光速,  $n$  为介质折射率.

## 2 计算模拟与分析

针对钛宝石短脉冲放大系统, 采用分步傅里叶方法对方程(4)进行数值计算. 为了讨论方便, 设输入光场为 10 阶线性啁啾超高斯脉冲, 其场分布为

$$A(x, t) = E_0 \exp \left[ -\left(\frac{x}{w_0}\right)^{10} \right] \exp \left[ -\frac{1}{2} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{10} \right] \cdot \exp \left[ i \frac{b}{2} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 \right] \quad (7)$$

式中,  $E_0$  是振幅常数,  $w_0$  是入射光束的束腰宽度,  $\tau$  为脉冲强度  $e^{-1}$  半宽度,  $b = \Delta\omega_L\tau/2$  为输入脉冲的线性啁啾参数. 计算中所用参数为: 入射光强为  $200 \text{ W/cm}^2$ ,  $w_0 = 1.0 \text{ cm}$ ,  $\tau = 150 \text{ ps}$ , 钛宝石的小信号增益系数  $g_0 = 2.0/\text{cm}$ , 折射率  $n_0 = 1.76$ , 群速度色散常数  $\beta_2 = 581.179 \text{ fs}^2/\text{cm}$ , 非线性折射系数  $n_2' = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}^{[9]}$ . 计算中考虑了钛宝石的增益谱  $g_w$  满足如图 1(a) 所示的泊松分布, 以及由于放大自发辐射对放大介质增益分布的影响, 如图 1(b) 所示.

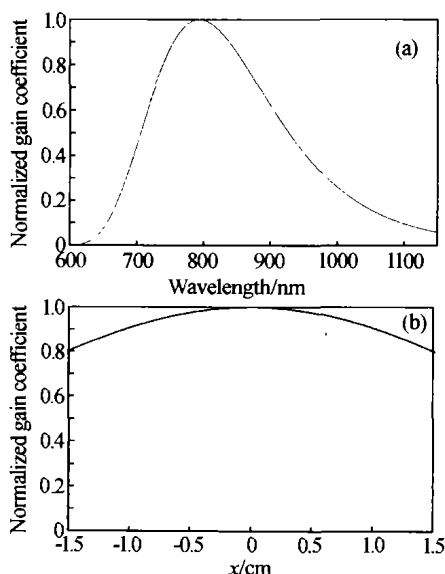


图 1 (a) 增益系数随波长的变化, (b)  $x$  方向上的增益系数分布

Fig. 1 (a) The profile of the gain coefficient as a function of wavelength, (b) The gain distribution in the  $x$  direction

计算所得结果如图 2-5 所示. 图 2(a) 是输入脉冲的时空分布, 图 2(b) 是谱宽为 50 nm 的输入脉冲经 8 cm 钛宝石介质传输后的输出脉冲的时空分布. 通过图 2(b) 可以看出, 由于增益窄化和增益饱和等效应的影响, 脉冲波形将发生明显变化. 增益窄化将使脉冲的频谱变窄, 这不但会导致脉冲波形的畸变, 而且还会使脉冲很难压回到原来的宽度, 而增益饱和则由于脉冲前沿消耗了放大介质的翻转粒

子数, 导致放大脉冲前沿的光强放大倍数大于后沿, 从而引起脉冲畸变. 增益窄化和增益饱和效应对脉冲的影响进一步分析如图 3 所示, 图中给出了脉冲经过 8 cm 后的时间和频谱波形. 从图 3(a) 可以看出, 增益饱和和效应使啁啾脉冲向前沿移动, 而增益窄化则使得脉冲向中心移动, 且入射脉冲的带宽越宽, 窄化效应越明显, 脉冲偏向中心的程度越厉害. 分析图 3(b) 可知, 增益饱和和效应使频谱产生红移, 而增益窄化效应则使频谱明显变窄. 图 4 给出了激光脉冲的空间分布变化. 可以看出, 由于放大自发辐

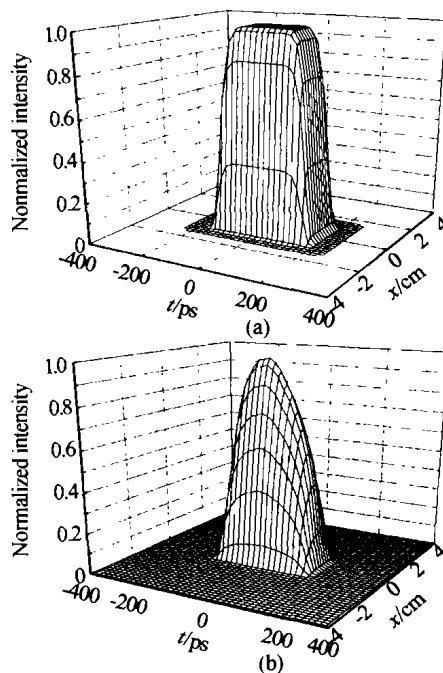


图 2 (a) 输入脉冲的时空分布, (b) 输出脉冲的时空分布  
Fig. 2 (a) The spatiotemporal distribution of input pulse, (b) The spatiotemporal distribution of the output pulse

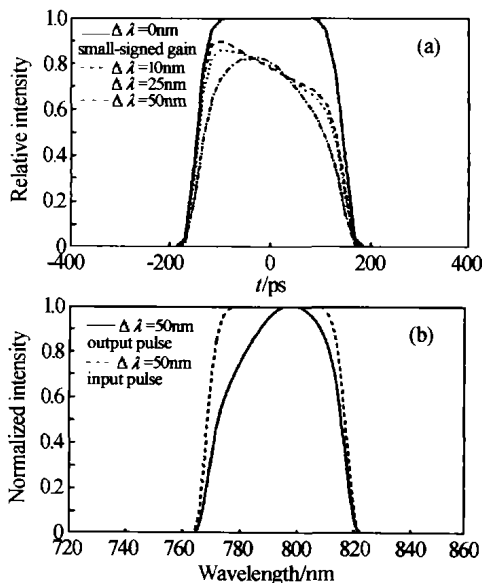
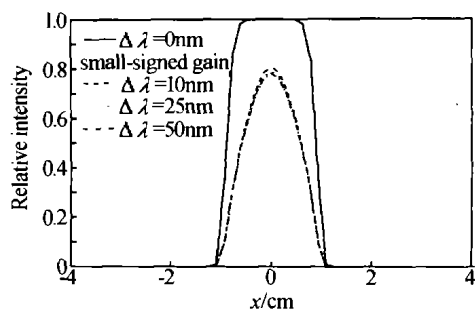


图 3 (a)  $x = 0$  处的输出脉冲的时间波形, (b)  $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$  时的输出脉冲的功率谱

Fig. 3 (a) The temporal profile of the relative intensity of the output pulse at  $x = 0$ , (b) Power spectrum of the output pulse with  $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$

图4  $t=0$  时的输出脉冲的空间强度分布Fig. 4 The relative intensity of spatial distribution of the output pulse at  $t=0$ 

射所引起的增益空间分布的非均匀(即中心增益系数高,而边沿低),经过放大后的输出脉冲的空间分布将发生明显变化,即由入射的超高斯分布变成类似于高斯分布的形状.同时,由于增益饱和效应的影响,输出脉冲峰值明显降低,且输出脉冲空间分布的变化程度将减小.计算中发现群速度色散对脉冲几乎没有影响.除此之外,进一步计算了图3(a)中所示的四种情况所引起的B积分分别为0.0174, 0.0164, 0.0159, 0.0158,这不足以引起明显的自相位调制和自聚焦效应.

由于增益窄化以及增益饱和效应会引起脉冲波形的畸变,因而,在实际工作中需要对脉冲进行整形,以满足实际工作的需要<sup>[4,10]</sup>.为此,我们利用本文的物理模型对超短脉冲放大系统中光传输的逆问题进行了计算,典型例如图5所示.计算所用参数为:输出脉冲波形为10阶超高斯分布,其峰值光强为 $1.8 \text{ GW/cm}^2$ ,脉宽为300 ps,谱宽为50 nm,其它参数同上.由于色散和非线性效应几乎对脉冲波形没有影响,在逆算中没有考虑色散和非线性效应的影响.可以看出,在实际工作中,可以通过对输入脉冲波形的整形,使之与逆算得到的输入脉冲波形相一致,从而使该输入脉冲经放大系统传输和放大后的输出脉冲波形可满足物理实验的要求.

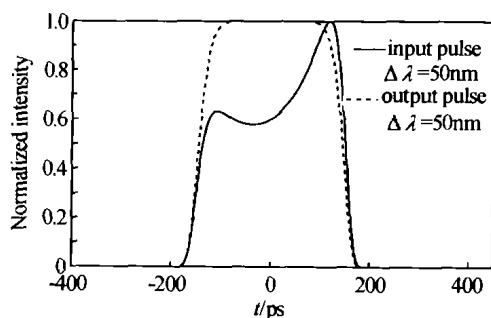


图5 逆算得到的输入脉冲波形以及与之对应输出脉冲波形

Fig. 5 The input temporal profile calculated by the inverse calculation and its corresponding output pulse

介质为例,对短脉冲在放大介质中的传输进行了模拟计算,重点讨论了放大介质的增益窄化和增益饱和效应对脉冲的时间波形和空间分布的影响.研究表明,增益窄化和增益饱和效应将使脉冲的时间波形发生畸变,以及输出脉冲能量降低.同时,考虑了放大自发辐射效应对介质增益系数的影响后,光束的空间分布亦将发生明显变化.在本文的计算中,色散和非线性效应不起重要作用,可不予考虑.值得指出的是,本文所用的计算模型虽然与文献[3]不完全相同,但我们利用文献[3]给出的计算模拟结果对本文所用物理模型和编制的计算模拟程序进行了校核,得到了一致的计算结果.然而,本文所用模型的优点在于能同时对超短脉冲放大系统中光传输进行正算和逆算,有关结果可为输入脉冲的整形提供设计依据.

### 参考文献

- 1 Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, et al. 0.85 PW, 33 fs Ti:sapphire laser. *Opt Lett*, 2003, **28**: 1594 ~ 1596
- 2 Bridges R E, Boyd R W, Agrawal G P. Multidimensional coupling owing to optical nonlinearities. I. General formulation. *J Opt Soc Am*, 1996, **B13**(3): 553 ~ 559
- 3 Chuang Y H, Zheng L, Meyerhofer D D. Propagation of light pulses in a chirped-pulse amplification laser. *IEEE J Quantum Electron*, 1993, **29**(1): 270 ~ 280
- 4 Matsuoka S, Yamakawa K. Development of a model for chirped-pulse amplification of sub-20fs laser pulses. *Jpn J App Phys*, 1998, **37**: 5997 ~ 6000
- 5 Blanc C L, Curley P, Salin F. Gain-narrowing and gain-shifting of ultra-short pulses in Ti:sapphire amplifiers. *Opt Commun*, 1996, **131**: 391 ~ 398
- 6 Gogoleva N G, Gorbunov V A. Modelling of chirped pulse amplification laser. *SPIE*, 1996, **2770**: 23 ~ 30
- 7 卢兴强, 范滇元, 钱列加. 高功率钛宝石激光放大器理论研究. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1059 ~ 1062  
Lu X Q, Fan D Y, Qian L J. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1059 ~ 1062
- 8 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics* (Third Edition). Boston, MA: Academic, 2001
- 9 Backus S, Durfee III C G, Murnane M M, et al. High power ultrafast lasers. *Review of Scientific Instruments*, 1998, **69**(3): 1207 ~ 1223
- 10 魏志义, 张杰, 夏江帆, 等. 飞秒激光脉冲的高效率放大研究. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(5): 538 ~ 542  
Wei Z Y, Zhang J, Xia J F, et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5): 538 ~ 542

### 3 结论

从非线性薛定谔传输方程出发,以钛宝石放大

## Study on the Propagation Properties of the Ultrashort Pulse in the Amplified Medium

Chu Xiaoliang, Zhang Bin

*College of the Electronics Information Sichuan University, Chengdu 610064*

Received date: 2003-06-30

**Abstract** The effects of the gain narrowing, gain saturation, as well as B integral on the ultrashort pulse propagating through the amplified medium were studied by using the nonlinear Schrödinger equation. The inverse problem of the ultrashort pulse propagating through amplifier was studied, i. e., the corresponding input pulse could be calculated from the given parameters of the amplifier and the requirement of the physical experiment. The results were useful for the design of the pulse shaping of the ultrashort pulse amplifier.

**Keywords** Nonlinear Schrödinger equation; Gain saturation; Gain narrowing; B integral



**Chu Xiaoliang** was born in 1977. He got B. S. from Sichuan University in 2000. Now he is studying for Ph. D. in Sichuan University. His research field is laser technology and physics. His interests include the propagation and nonlinear effect of the pulse in ultrashort pulse system.