

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0216-03

非均匀加宽放大介质中宽带啁啾脉冲的放大

傅喜泉, 雷大军, 李 瑛, 文双春

(湖南大学计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

摘要 研究了非均匀加宽放大介质中宽带啁啾激光脉冲的放大情况。基于在啁啾较大时, 脉冲在时域和频域具有相同的波形, 时间和频率满足线性关系, 建立了宽带激光在非均匀加宽介质中的放大模型。探讨了宽带线性啁啾脉冲在非均匀加宽介质中的放大特性和脉冲放大的整形补偿的可行性。

关键词 激光技术; 均匀加宽; 非均匀加宽; 宽带激光放大; 啁啾脉冲放大

中图分类号 O437; TN241 **文献标识码** A

Amplification of the Broadband Chirped Pulse in Inhomogeneously Broadening Medium

FU Xi-quan, LEI Da-jun, LI Ying, WEN Shuang-chun

(School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract The amplification of highly chirped pulse with broadband in inhomogeneously broadening amplifier is investigated. Based on the analysis of the properties of the pulse with a very big chirp in which the pulse in time domain and frequency domain shares the same profile and time and frequency are linearly related, a theoretical model for the amplification of highly chirped pulse is built in inhomogeneously broadening medium. The amplification performance of the broadband linearly chirped pulse in the inhomogeneously broadening medium and the feasibility of the shaping compensation of the pulse amplification are explored.

Key words laser technology; homogeneously broadening; inhomogeneously broadening; broad bandwidth laser amplification; chirped pulse amplification

1 引 言

啁啾脉冲放大(Chirped-pulse-amplification, CPA)技术是一种普遍而有效的宽带脉冲激光放大技术^[1~3]。宽带放大过程和常规的窄带系统有很大不同, 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现象等都须考虑, 研究相关的理论、技术和定量计算方法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。非线性光学的许多研究领域都需要用到高功率超短脉冲, 而且要求激光脉冲要有高的强度对比度^[4]。在分析实验现象的时候知道高功率超短脉冲的形状是很重要的, 这些都要求仔细地分析啁啾脉冲放大在放大介质中的技术和理论。

脉冲放大的理论模型和分析主要集中在单色或者窄带模型, 对小信号增益过程有较详细的分析。Frantz-Nodvik 模型是典型的窄带模型^[5]。宽带脉

冲的放大的理论模型也有研究, 但主要是宽频带激光脉冲在均匀加宽线宽的放大介质中激光放大物理模型^[6,7]。本文将分析讨论非均匀加宽放大介质的宽带脉冲放大的物理模型和放大特征。

2 非均匀加宽介质中啁啾脉冲放大的计算模型

我们研究的宽频带脉冲激光的放大主要是啁啾脉冲的放大过程, 而且在这个过程中啁啾值是相当大的, 因此可以考虑分析啁啾脉冲的时间波形和频谱波形之间的关系, 以及在这过程中时间和频率的对应关系, 从而找到简单的脉冲放大的理论模型。

对线性啁啾脉冲而言, 可以写成

$$A(t) = A'(t) \exp\left(-\frac{i}{2} C t^2\right), \quad (1)$$

式中 C 为啁啾值, $A'(t)$ 为没有进行啁啾展宽时的脉

基金项目: 国家自然科学基金(10576012)、国家自然科学基金重点项目(60538010)、国家 863 计划(2004AA84ts12)和高等学校博士学科点专项科研基金(20040532005)资助课题。

作者简介: 傅喜泉(1977—), 男, 湖南大学计算机与通信学院副教授, 博士, 主要从事超快激光及光通信的研究。

E-mail: fuxq@263.net

冲形状。当啁啾值很大时,即 $C \gg 1$ 时,脉冲频率域的强度被证明可以写成表达式

$$|\tilde{A}(\omega)|^2 = \left| \frac{2\pi T_0^2}{C} \right| \left| A\left(\frac{T_0^2}{C}\omega\right) \right|^2, \quad (2)$$

式中 T_0 为最大强度 $1/e$ 处的半高。很显然,脉冲和频谱的归一化后的强度波形有相同的形状,但是有不同的最大强度。当知道啁啾脉冲的相位 $\Phi(t) = -Ct^2/2$ 时,时间和频率之间满足线性关系,而这个线性关系很容易得到

$$\omega = -\partial\phi(t)/\partial t = Ct/T_0^2, \quad (3)$$

因此啁啾值很大时脉冲可以看成是由很多不同中心频率的窄带脉冲组成的。在(2)式中,光谱的半宽度($1/e$ 最大强度处)是 C/T_0 。

因此,在研究宽频带啁啾脉冲激光时,只要啁啾值足够大,就可以将脉冲分成很多个不同的中心频率子脉冲序列来处理,这样可以简化物理过程,用窄带近似下的模型进行分析。在此基础上可以建立一个啁啾脉冲放大的理论模型:将宽频带啁啾脉冲分成不同中心频率的子脉冲序列,每个子脉冲的带宽都小到可以满足前面的均匀加宽线宽介质中的放大模型,如果条件适合,甚至可以直接用窄带模型来处理子脉冲的放大过程。

3 脉冲放大的模拟分析和优化补偿

对于上述的模型,将啁啾脉冲分成许多份,每一份都有各自对应的时间宽度、带宽、中心频率和脉冲最大强度,而波形可以采用矩形;将每一个子脉冲都利用前面分析得到的均匀加宽线宽的程序来得到其放大的过程,在这个过程中先不考虑色散和非线性效应的影响;将放大后的子脉冲重新合成一个新的啁啾脉冲,并将它压缩成超短脉冲。

我们用这个模型来分析高阶啁啾脉冲在非均匀线宽介质中的放大过程,假定为完全非均匀加宽线形。图1表示啁啾脉冲在非均匀加宽线形介质中的放大过程中引起的增益变窄和增益饱和效应的现象。起始的啁啾脉冲用的是5阶的超高斯光谱, $I_{in}(\omega) = I_0 \exp[-(\omega^2/\omega_p^2)^m]$, 有 $m = 5, C = 5$ 。脉冲带宽 $\Delta\omega_p = 2\omega_p$, 放大介质的线形为高斯线型, $\sigma(\omega) = \exp(-\omega^2/\omega_a^2)$, 放大带宽的宽度为 $\Delta\omega_a = 2\omega_a$ 。发现只要非均匀加宽放大介质线宽足够,就可以使脉冲可以被如实地放大而不发生畸变,就如均匀加宽下的小信号放大过程。而且完全非均匀加宽的放大介质中,如果介质的带宽不够宽,脉冲放大后的形状受放大介质的放大线形的影响。

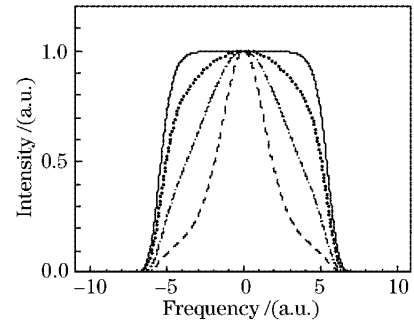


图1 啁啾脉冲在非均匀加宽线形介质内的放大过程中引起的增益变窄和增益饱和和效应现象比较。虚线、点虚线、点线、实线分别表示 $\Delta\omega_a/\Delta\omega_p = 0.5, 1, 2, 100$ 时的放大后脉冲的曲线

Fig.1 The gain narrowing and saturation in the amplification of chirped pulse in inhomogeneously broadening linear medium. The dashed curve, dash-dotted curve, dash-dot-dotted curve and solid curve stand for $\Delta\omega_a/\Delta\omega_p = 0.5, 1, 2, 100$, respectively

在啁啾脉冲放大系统工作过程中,效果并不像理论上所说的那样理想,由于在放大过程中会产生种种

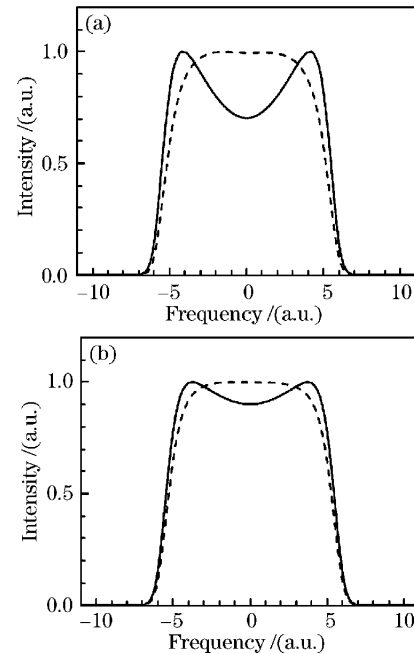


图2 非均匀加宽放大介质中的脉冲整形优化放大示意图。(a) $\Delta\omega_a/\Delta\omega_p = 1.33$, (b) $\Delta\omega_a/\Delta\omega_p = 2$ 。实线为起始的脉冲波形,虚线为放大后脉冲波形

Fig.2 Amplification in inhomogeneously broadening medium by shaping and optimizing the initial pulse. (a) $\Delta\omega_a/\Delta\omega_p = 1.33$, (b) $\Delta\omega_a/\Delta\omega_p = 2$. The solid curve is the initial intensity, and dashed curve is the intensity after amplification

附加相位,最后输出光脉冲往往得不到完全压缩。因此提出了脉冲的光谱整形补偿来实现最优化的放大过程。

前面的计算发现非均匀加宽只要放大介质线宽足够,就可以使脉冲被如实地放大而不发生畸变,就如均匀加宽下的小信号放大过程。可以看出,在非均匀加宽线形的放大介质中,只要知道介质的放大线形和频率分布,就可以很容易地对脉冲进行整形和处理。在这一点上,非均匀加宽比均匀加宽要方便得多。如图 2 所示,在非均匀加宽放大介质中的脉冲整形优化放大的效果非常好。

4 结 论

建立了宽频带激光在非均匀加宽介质中的放大模型,并研究了宽带线性啁啾脉冲在非均匀加宽介质中的放大特性。由于在啁啾值较大时(即 $C \gg 1$),脉冲在时域和频域具有相同的波形,并且时间和频率满足线性关系。因此,可以把总的线性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,并可以利用已有的准单色脉冲放大模型来计算非均匀加宽系统中的脉冲放大。这个模型可以用来研究均匀加宽和非均匀加宽增益介质中的啁啾脉冲放大。

在非均匀加宽增益介质中,随着啁啾脉冲带宽的增加,增益变窄效应会越来越明显,且脉冲波形会过渡到增益介质的线形。在数值计算方面探讨了非均匀加宽中脉冲放大整形补偿的可行性。在非均匀加宽放大系统中脉冲波形失真更有规则也就更容易对脉冲波形进行控制和整形。我们的方法和结果将对高功率激光驱动器宽带放大系统的分析、设计和优化提供重要的指导作用。

参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 P. Maine, D. Strickland, P. Bado *et al.*. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(2): 398~403
- 3 T. Brabec, F. Krausz. Intense few-cycle laser fields; Frontiers of nonlinear optics [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2000, **72**(2): 545~591
- 4 Y. R. Shen. The Principles of Nonlinear Optics [M]. New York, J. Wiley and Sons, 1984. chap. 9
- 5 L. M. Frantz, J. S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier [J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(8): 2346~2349
- 6 G. P. Agrawal. Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. trans. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1994, chap. 4
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方,余震虹译. 北京: 电子工业出版社, 1994
- 7 Y.-H. Chuang, L. Zheng, D. D. Meyerhofer. Propagation of light pulses in a chirped-pulse-amplification laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(1): 270~280