

文章编号: 0253-2239(2007)07-1338-6

宽带光学参变啁啾脉冲放大系统的色散控制*

王红英^{1,2} 刘红军¹ 李小莉¹ 赵 卫¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 在设计宽带光学参变啁啾脉冲放大系统时,对色散源进行了理论分析和讨论。对光学参变啁啾脉冲放大系统的色散量以及各个过程中的高阶色散对脉冲时域和频域特性的影响进行了计算。结果表明展宽器引入了非常大的色散,放大器中信号光相位变化产生的色散较大,参量晶体本身引入的色散相对较小可以忽略不计。输出脉冲宽度主要受二阶色散影响,而三阶和四阶色散主要影响脉冲的波形和信噪比,对频域影响很小。

关键词: 超快光学; 光学参变啁啾脉冲放大; 快速傅里叶变换; 色散

中图分类号: TN249 文献标识码: A

Dispersion Control in Broadband Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification Laser System

Wang Hongying^{1,2} Liu Hongjun¹ Li Xiaoli¹ Zhao Wei¹

(¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Xian 710119)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: The dispersion of a broadband optical parametric chirped pulses amplification (OPCPA) laser system is investigated. Using the numerical method, the theoretical model of dispersion and the effects of high-order dispersion on the characteristics in temporal and frequency domain of signal pulses are presented in broadband OPCPA laser system. The results demonstrate that dispersion induced by the pulse stretcher and phase change of signal pulses in the amplifier is relatively great, but the dispersion of parametric crystal can be ignored. The pulse duration is mainly controlled by the second-order dispersion, and the pulse signal-noise-ratio and waveform affected by third-order dispersion and fourth-order dispersion. However, the change of pulse frequency from dispersion is negligible.

Key words: ultrafast optics; optical parametric chirped-pulses amplification; fast Fourier transform; dispersion

1 引 言

由于光学参变啁啾脉冲放大(OPCPA)^[1~4]技术具有增益带宽大、信噪比高、 B 积分低和热畸变小的显著特性,克服了啁啾脉冲放大(CPA)技术的光谱增益窄化、放大自发辐射及热透镜效应等缺陷,能够获得宽带宽、大能量及高质量的超短脉冲激光,所以它在强场物理、激光等离子体物理、惯性约束核聚变、X射线、阿秒科学等前沿领域有着重要的应用价值。近年来,光学参变啁啾脉冲放大技术进展迅

速^[5~9]。为了利用光学参变啁啾脉冲放大技术产生脉宽极短(几个飞秒)、峰值功率极高以及信噪比高的激光脉冲,要求放大后输出的光谱带宽尽可能宽,但关于宽带光学参变啁啾脉冲放大的色散控制,迄今很少见到系统的分析研究。

本文将对宽带光学参变啁啾脉冲放大系统的主要色散源进行理论分析,给出展宽器、放大器以及压缩器的二阶、三阶以及四阶色散的表达式,并计算信号光光谱带宽范围内二阶、三阶以及四阶色散量的

* 国家自然科学基金(60678013,60408002,60537060)和陕西省自然科学基金(2004F02)资助课题。

作者简介: 王红英(1975—),女,山西人,博士研究生,主要从事超短激光脉冲及其应用的研究。

E-mail: why@opt.ac.cn

导师简介: 赵 卫(1963—),男,河南人,研究员,博士生导师,主要从事超快光学、超快光电子学以及高时空分辨诊断以及光通信技术方面的研究。E-mail: weiz@opt.ac.cn

收稿日期: 2006-09-13; 收到修改稿日期: 2006-12-11

变化。计算和分析了高阶色散对脉冲时域和频域特性的影响。为宽带光学参变啁啾脉冲放大激光系统的色散控制提供了依据。

2 光学参变啁啾脉冲放大系统的色散平衡问题

色散平衡是为了获得质量较好的短脉冲。可以从光波的相位角度出发,来说明群速度的色散:

$$\phi(\omega) = \phi(\omega_0) + \phi_1(\omega - \omega_0) + \phi_2(\omega - \omega_0)^2 + \phi_3(\omega - \omega_0)^3 + \phi_4(\omega - \omega_0)^4 + \dots, \quad (1)$$

其中 ω_0 为信号光中心频率, ω 为信号光频率, 前两项对脉冲传输没有影响, 第三项 ϕ_2 表征群速度的二阶色散, 以后各项 ϕ_3 、 ϕ_4 分别表示三阶、四阶高阶色散。

为了使压缩后的飞秒级信号光脉冲接近傅里叶变换极限, 这就要求整个光学参变啁啾脉冲放大系统各阶色散量的总值分别为零^[10]。色散补偿的程度决定着输出放大脉冲的质量, 包括脉宽、前后沿质量和对比度等。若色散补偿不完全, 残留的色散会导致输出脉冲强度对比度急剧下降, 并使脉冲产生不可忽视的某些翼、底座脉冲等, 加宽输出脉冲宽度, 导致输出峰值功率增长缓慢。

3 色散源

宽带光学参变啁啾脉冲放大系统的关键技术之一就是色散补偿, 具体地说, 就是展宽器、放大器和压缩器的设计和匹配。

3.1 展宽器

系统采用无像差的 Öffner 型展宽器^[11]。在实际情况中, 像差往往不能完全消除, 这就不可避免地引入高阶色散。利用逐次成像的方法, 可得出经过应用 Öffner 望远系统单光栅展宽器的相位变化^[12]。

为了得到接近变换极限的压缩脉冲, 我们精确计算了展宽过程产生的色散以及高阶色散对展宽脉冲的影响。系统展宽器参量取为: 入射飞秒激光脉冲光谱半峰全宽 100 nm、中心波长 800 nm, 光栅常数 1800 mm^{-1} , 入射角 56.05° , 光栅到凹面镜的距离为 680 mm, 凹面镜的曲率半径为 1000 mm(如不作特殊说明, 以下均取这些参量)。由相位变化式, 可得展宽器产生的二阶色散、三阶色散以及四阶色散随信号光波长的变化曲线, 结果如图 1 所示(GDD、TOD、FOD 分别代表二、三、四阶色散, 下同)。可以看出, Öffner 展宽器的二阶色散、二阶色散、四阶色散的绝对值都是波长的增函数。

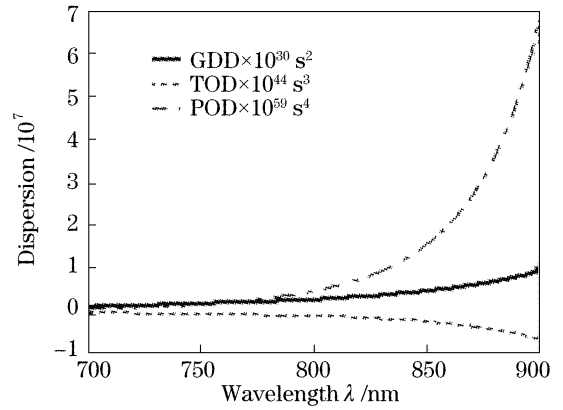


图 1 展宽器各阶色散随信号光波长的变化

Fig. 1 Dispersion of the stretcher as a function of the wavelength of the signal pulse

采用快速傅里叶变换方法获得了展宽脉冲的时域和频域信息。假定入射信号光脉冲是 20 fs 的理想高斯脉冲, 如图 2 所示。其时域内的振幅表达式为

$$E_{\text{in}}(t) = \exp\left(-\frac{t^2 2\ln 2}{\tau^2} - iC \frac{t^2 2\ln 2}{\tau^2} + i\omega_0 t\right), \quad (2)$$

式中 τ 为高斯脉冲的半峰全宽, C 为初始啁啾参量。

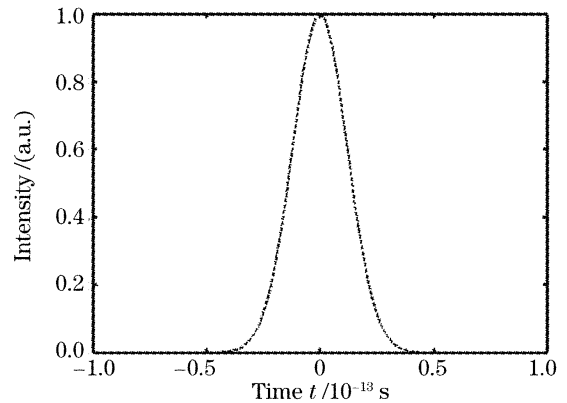


图 2 带初始啁啾的入射信号光脉冲

Fig. 2 Temporal profile of the incident chirped pulse

假设各个波长在衍射过程中的效率相同, 则可以只考虑展宽器引起的相移 $\phi(\omega)$ 。经过展宽器后,

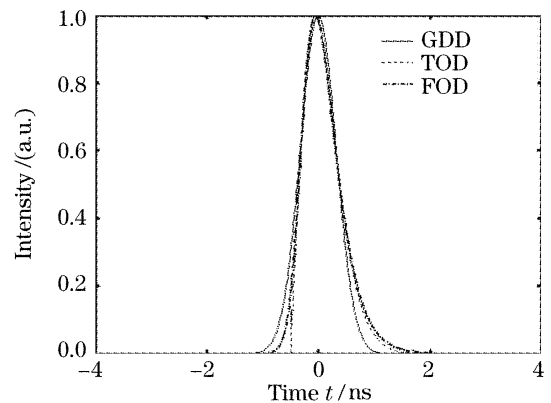


图 3 高阶色散影响下的展宽器输出信号脉冲

Fig. 3 Temporal profile of the output pulse from the stretcher influenced by high-order dispersion

频域内的振幅函数为

$$E(\omega) = E_{in}(\omega) \exp[i\phi(\omega)], \quad (3)$$

$\phi(\omega)$ 可以写成(1)式形式的中心角频率 ω_0 处的泰勒展开式。将 $E(\omega)$ 进行逆快速傅里叶变换,即可获得高阶色散影响下的展宽器输出信号脉冲波形,结果如图3所示。

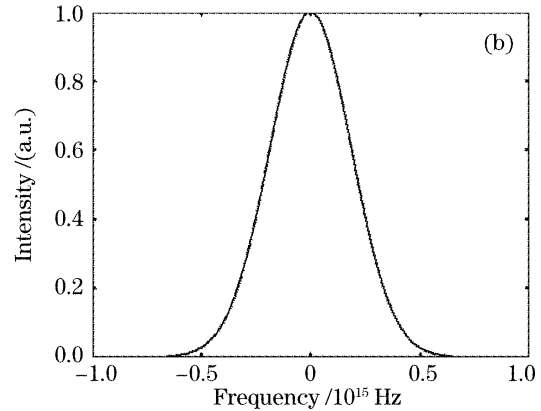
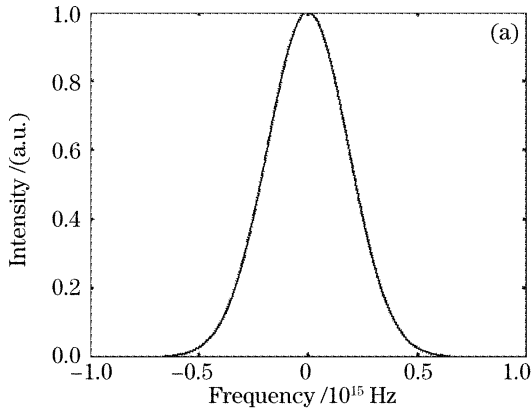


图4 带初始啁啾的入射信号光脉冲频谱(a), 高阶色散影响下的展宽器输出信号脉冲频谱(b)

Fig. 4 Frequency profile of the incident chirped pulse (a) and the output pulse from the stretcher influenced by dispersion (b) high order

可以看出,群速度色散引起的脉冲展宽过程,虽然改变了脉冲每个频谱分量的相位,从而改变了脉冲的宽度与形状,且其改变程度依赖于该过程产生的各阶色散量,但它却不会影响脉冲频谱。

3.2 放大器

3.2.1 信号光相位变化

由三波混频的相位方程可知,当信号光初始强度(I_s)远远小于抽运光初始强度(I_p)时,放大后信号光相位的近似解^[13]

$$\phi_s(z) = \phi_s(0) - \frac{\Delta k z}{2} + \arctan \left[\frac{\Delta k}{2 \sqrt{f^2 - (\Delta k/2)^2}} \tanh \sqrt{g^2 - (\Delta k/2)^2} z \right], \quad (4)$$

其中 $g = 4\pi d_{\text{eff}} \left[\frac{I_p(0)}{2\epsilon_0 n_p n_s n_i c \lambda_s \lambda_i} \right]^{1/2}$ 为增益系数, $\phi_s(0)$ 为初始相位,下标 p, s, i 分别表示抽运光、信号光和闲置光, Δk 为相位失配, z 为信号光在参量晶体中的传播距离。

根据(4)式,假设信号光在 BBO 参量晶体中的传播距离 $z=16$ mm,初始相位 $\phi_s(0)=2.7$,中心波长为 532 nm 的抽运光强为 450 MW/cm²,可得如图5所示的信号光相位变化引入的各阶色散随信号光波长的变化曲线。从图5中可以看出,二阶、三阶以及四阶色散的差距显著增大。与其他因素引入的色散量相比,几乎小两个数量级。所以对整个系统

可以看到,信号光在展宽器的二阶色散作用下,脉冲宽度明显加宽,对脉冲的波形影响较小。而在三阶色散和四阶色散作用下,脉冲在展宽的同时,前后沿也发生变化,脉冲质量下降。

根据(3)式,可得到展宽脉冲的频域信息。图4为展宽前后的脉冲频谱图。

而言影响不大。

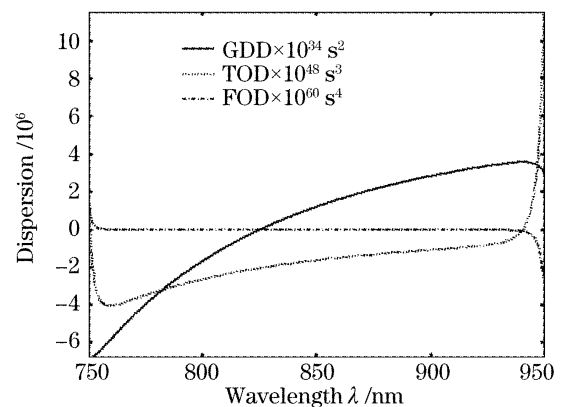


图5 信号光相位变化产生的各阶色散

Fig. 5 High-order dispersion produced by the change of the signal phase as a function of signal pulse wavelength

如果不考虑脉冲展宽过程,信号光直接进入光学参变放大过程^[13,14],其相位的变化将对脉冲时域特性造成较大的影响,结果如图6所示。

与图3相比较,飞秒信号光直接经过光学参变放大过程时,由相位变化引入的色散对脉冲时域特性有明显的影 响。可以看出,三阶和四阶色散对脉冲的波形和信噪比影响显著,从而使信号光的脉冲质量显著下降。但是对信号光频域特性影响很小(分析方法同展宽器)。

对于展宽后啁啾脉冲的光学参变放大过程,相位变化对脉冲时域和频域波形变化的影响,如图7所示。通过傅里叶变换,将展宽后的脉冲从时域变

换到频域,在频域与晶体的相位谱作用,再通过傅里叶反变换到时域,可得到啁啾脉冲光学参变放大过程的脉冲变化。

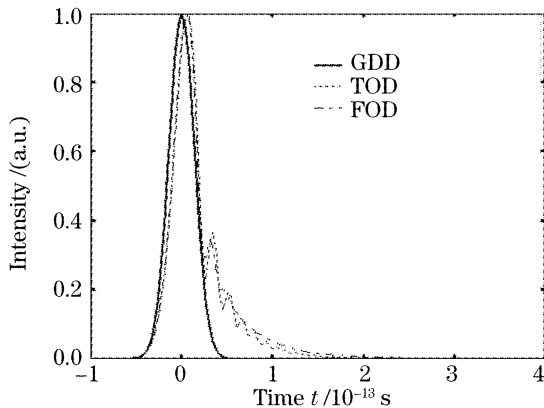


图 6 飞秒信号光在高阶色散影响下的光学参变放大输出脉冲

Fig. 6 Temporal profile of the femtosecond signal pulse by high-order dispersion in optical parametric amplification system

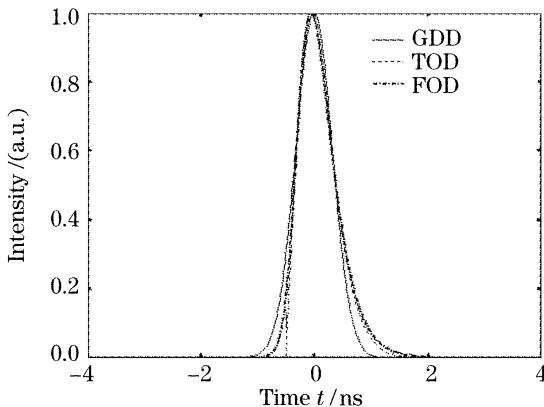


图 7 啁啾脉冲在高阶色散影响下的放大输出信号脉冲
Fig. 7 Temporal profile of the chirped signal pulse influenced by high-order dispersion

对于宽带短脉冲的光学参变放大过程,信号脉冲的相位虽然对脉冲波形的变化有影响,但是与展宽过程相比较而言,其影响很小。即应该综合考虑上述两个过程对脉冲的影响。由图 7 可以明显看出,综合了啁啾脉冲放大的光学参变放大过程,其相位对脉冲波形的影响主要源于展宽过程中的高阶色散,而高阶色散对脉冲的频谱影响很小。

3.2.2 参量晶体

激光脉冲在放大的过程中,参量晶体^[14]材料也会引入色散。系统采用 BBO^[15]晶体作为放大介质。考虑到 BBO 晶体在 I 类相位匹配参量过程的情况下,抽运光为 e 光,而信号光和闲置光为 o 光(e→o+o)。利用折射率表达式,可以求出参量晶体引入的各阶色散。数值模拟出激光脉冲在参量放大过程

中,由参量晶体材料本身产生的色散随信号光波长的变化曲线,如图 8 所示。

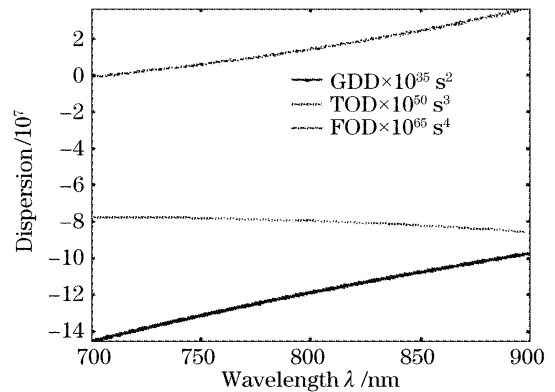


图 8 参量晶体产生的高阶色散随信号光波长的变化
Fig. 8 High-order dispersion produced by parametric crystal as a function of signal wavelength

由图 8 可以看出,参量晶体材料产生的高阶色散绝对值都是波长的增函数。相对于展宽器引入的色散而言,参量晶体材料产生的色散量很小,相差几个数量级,所以在放大过程中由材料引入的色散不会对脉冲的波形产生太大的影响。

3.3 压缩器

系统采用 Treacy 平行光栅对压缩器^[16]。根据色散表达式:

$$\phi_2^c = -\frac{\lambda^3}{2\pi c^2 d^2 \cos^2 \theta} b, \quad (5a)$$

$$\phi_3^c = -\phi_2^c \frac{\lambda}{2\pi c} \left(1 + \frac{\lambda}{d} \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta}\right), \quad (5b)$$

$$\phi_4^c = \phi_2^c \frac{3\lambda^2}{4\pi^2 c^2} \left\{4 + 8 \frac{\lambda}{d} \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} + \frac{\lambda^2}{d^2} [1 + \tan^2 \theta (6 + 5 \tan^2 \theta)]\right\}, \quad (5c)$$

$\phi_{2,3,4}^c$ 分别对应二、三、四阶色散, θ 为入射角, b 为光栅 G1 和光栅 G2 之间的距离, d 为光栅常量。可得光栅对脉冲压缩器引入的色散随 b, θ 的变化曲线,结果如图 9 所示。

由图 9(a)可以看出,在波长、入射角度以及光栅常量一定的情况下,各阶色散因子随光栅对距离的变化非常敏感。为了较好地补偿展宽器、放大信号光相位变化引入的色散,需有效地控制光栅对之间的距离。图 9(b)显示了色散对于信号光入射角度的变化情况,可以看出,色散对入射角度变化的敏感程度不及前者,即入射角度调节范围相对较大。

为得到波形完好、信噪比高的输出脉冲,必须采取有效措施使压缩器提供合适的色散量,以尽量补偿系统中产生的附加高阶色散。假定输入脉冲为(2)式显示的高斯脉冲,根据本文之前计算出的系统

高阶色散量,通过快速傅里叶变换方法模拟获得了输出脉冲在不同高阶色散下影响下的时域变化特性。图 10 为输出脉冲波形随光栅对距离的变化情况,显示了输出脉冲对光栅对距离变化的敏感程度。光栅对距离达到最佳值时[如图 10(a)所示]二阶色散可以完全得到补偿。改变其距离时[如图 10(b)]

所示],由于剩余色散量的影响,二阶色散将导致脉宽增加,而三阶或四阶色散将使脉冲具有次峰并影响脉冲的信噪比。为了同时补偿所有的二阶、三阶和四阶色散量,至少应该有三个独立的自由度来调整和控制这些色散。而该过程并没有对脉冲频谱造成太大的影响。

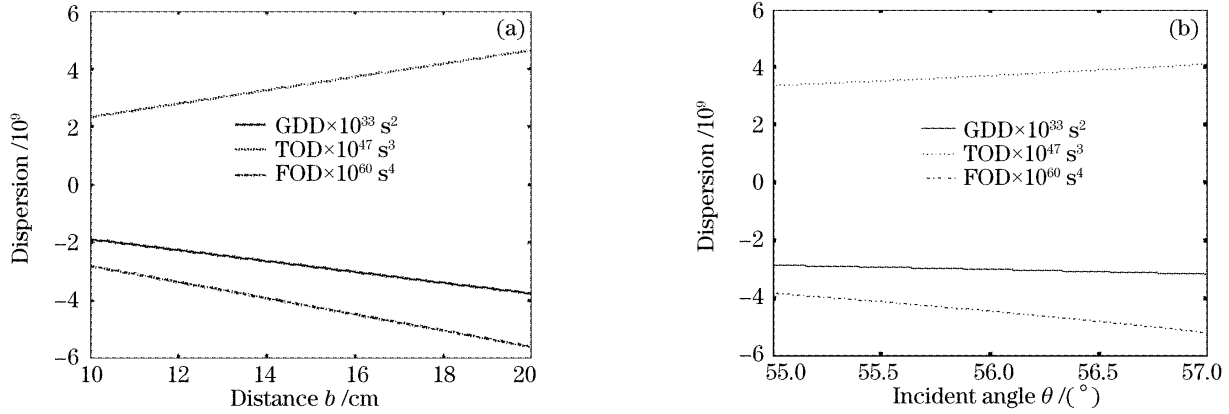


图 9 色散量随光栅随距离(a)及信号光入射角度(b)的变化

Fig. 9 High-order dispersion as a function of the distance between the two gratings (a) and incident angle of the signal pulse (b)

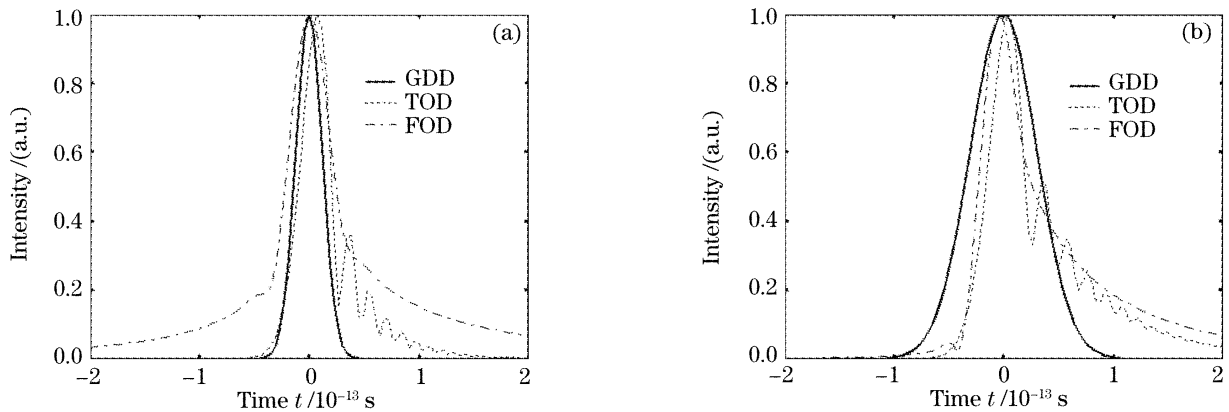


图 10 输出脉冲波形随光栅对距离的变化 $b=159.48$ mm (a)和 159.46 mm (b)

Fig. 10 Temporal profile of the compressed pulse influenced by the change of the distance between the two gratings $b=159.48$ mm (a) and 159.46 mm (b)

4 结 论

本文针对宽带光学参变啁啾脉冲放大系统中的色散问题,通过数值计算展宽器、放大器以及压缩器引入的色散,对宽带光学参变啁啾脉冲放大系统过程的色散进行了详细而深入的研究。对影响宽带光学参变啁啾脉冲放大系统输出脉冲时域和频域特性的主要因素进行了理论分析和讨论。结果表明,展宽器引入的色散较大,放大器中信号光相位变化产生的色散相对较小,而参量晶体本身引入的色散相比之下可以忽略不计。这些附加的高阶色散主要对脉冲时域特性产生明显的影响。其中,二阶色散决定着输出脉冲的宽度,三阶和四阶色散影响了脉冲

的形状和信噪比。依据展宽、放大和压缩过程产生的总色散量为零的原则,可得出压缩过程所需要的色散量。从而可计算出对输出脉宽影响最大的参量-光栅对距离。达到最佳距离时,二阶色散可以完全补偿,残留的三阶、四阶色散则影响脉冲的形状。这为宽带光学参变啁啾脉冲放大系统的色散控制提供了重要的理论依据。

参 考 文 献

- 1 I. N. Ross, P. Matousek, M. Towrie *et al.*. The prospects for ultrashort pulses duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulses amplifiers[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **144**(1): 125~133

2 Igor Jovanovic, Brian J. Comaskey, Christopher A. Ebberts *et al.*. Optical parametric chirped-pulses amplifier as an alternative to Ti:sapphire regenerative amplifiers[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15): 2923~2929

3 Liu Hongjun, Zhao Wei, Chen Guofu *et al.*. Experimental and theoretical analysis of nondegenerate ultrabroadband chirped pulse optical parametric amplification[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **1**(1): 94~97

4 Zhao Wei, Liu Hongjun, Wang Yishan *et al.*. Pulse-front matched ultra-broadband optical parametric chirped pulse amplifier for sub-12 fs pulse generation[J]. *Chin. Phys.*, 2005, **14**(2): 359~365

5 Xiaodong Yang, Zhizhan Xu, Yuxing Leng *et al.*. Multiterawatt laser system based on optical parametric chirped pulses amplification[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(13): 1135~1137

6 Y. Kitagawa, Y. Sentoku, S. Akamatsu *et al.*. Progress of fast ignitor studies and Petawatt laser construction at Osaka University[J]. *Physics of Plasmas*, 2002, **9**(5): 2202~2207

7 C. P. Hauri, P. Schlup, G. Arisholm *et al.*. Phase-preserving chirped-pulse optical parametric amplification to 17.3 fs directly from a Ti:sapphire oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1369~1371

8 R. Th. Zinkstok, S. Witte, W. Hogervorst *et al.*. High-power parametric amplification of 11.8-fs laser pulses with carrier-envelope phase control[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(1): 78~80

9 N. Ishii, L. Turi, V. S. Yakovlev *et al.*. Multimillijoule chirped parametric amplification of few-cycle pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(5): 567~569

10 S. Kane, J. Squier. Fourth-order-dispersion limitations of aberration-free chirped-pulse amplification systems[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(5): 1237~1244

11 Wang Hongying, Liu Hongjun, Xiong Hongjun *et al.*. Experimental study of large-ratio Öffner stretcher for OPCPA laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9): 1359~1364

12 Jie Jiang, Zhigang Zhang, Toshifumi Husama. Evaluation of chirped-pulse-amplification systems with Öffner triplet telescope stretchers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 678~683

13 I. N. Ross, Pavel Matousek, Geoffrey H. C. New *et al.*. Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(12): 2945~2956

14 Peng Jiahui, Li Ruxin, Jin Shiqi *et al.*. Optical parametric chirped pulse amplifier with biaxial crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1153~1159 (in Chinese)
彭家晖, 李儒新, 金石琦 等. 双轴晶体光学参量放大的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1153~1159

15 Yang Xiaodong, Xu Zhizhan, Zhang Zhengquan *et al.*. Experimental study on bandwidth of BBO-I noncollinear optical parametric chirped pulse amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1224~1227 (in Chinese)
杨晓东, 徐至展, 张正泉 等. BBO-I 非共线光学参变啁啾脉冲放大增益带宽的实验研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1224~1227

16 Edmond B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1969, **QE-5**(9): 454~458



· 广 告 ·



海汇丰实业有限公司
HRT Corporation

www.HRTlaser.com

专业的激光全息解决方案提供商和系统集成商

条纹相机



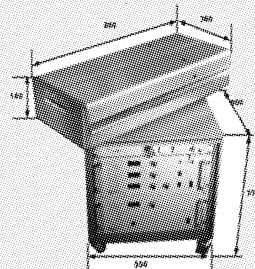
可至2ps的时间分辨率
8-35mm的光阴极
高至4MHz的触发扫描
高至250MHz的同步扫描

全息干板



单色和全色全息材料可选
分辨率大于3000线对/毫米
45%-75%的衍射效率
乳胶颗粒大小8-40纳米

激光器



可同时输出多段波长
TEM00基模辐射
低至20ps的脉冲宽度
最大输出能量120毫焦

主要提供: 条纹相机、全息干板、科研级皮秒激光器、超高速CCD相机、光电子设备、全息3D打印机等

代理品牌:    



HRT — 卓越创新 高效规范

Tel:+86-755-83460 457/597
Fax:+86-755-83460 401
E-mail:sales@hrtlaser.com
www.hrtlaser.com