

马丁内兹型啁啾脉冲放大系统高阶色散的混合补偿*

孙振红¹⁾ 柴路^{1)†} 张志刚¹⁾ 王清月¹⁾ 张伟力^{1)‡} 袁晓东³⁾ 黄小军^{1)‡}

¹⁾ 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室,
国家教育部光电子信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

²⁾ 俄克拉荷马州立大学电气与计算机工程系, 斯帝尔沃特, OK 74078)

³⁾ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2004 年 4 月 22 日收到, 2004 年 6 月 9 日收到修改稿)

采用光线追迹法对含有马丁内兹型展宽器的 CPA 系统的各阶色散进行了系统的理论研究, 提出了引入适当负三阶色散量以补偿五阶色散的总体色散的混合补偿方法. 该方法能够获得比采用仅补偿二、三阶色散的逐阶色散补偿法更接近傅里叶变换极限的超短脉冲.

关键词: 啁啾脉冲放大, 马丁内兹型展宽器, 色散补偿

PACC: 4280W, 4260B

1. 引言

啁啾脉冲放大(CPA)技术是飞秒激光发展过程中的一个里程碑, 是目前在实验室条件下获得高峰值功率飞秒激光脉冲的标准方法^[1,2]. CPA 系统一般由振荡级、展宽器、放大级和压缩器四部分构成. 首先, 由振荡级产生的飞秒脉冲输入到展宽器被展宽到 ps 乃至 ns 量级, 然后再经过放大级提取足够能量, 最后经过压缩器把脉宽压缩回至 fs 量级, 这就是 CPA 的基本工作原理. 然而, 飞秒脉冲经过 CPA 系统是一个复杂的过程, 包括增益窄化效应、自相位调制效应、各级材料色散以及光学装置引入的像散等^[3-5], 使脉冲在时间和空间上必然产生畸变, 因此通过 CPA 系统本身要获得完全还原的脉冲几乎是不可能的. 但是最近, 采用对放大脉冲的再展宽和精确色散补偿(啁啾镜 + 空间光调制器)已经获得了亚 3.4fs 的光脉冲^[6]. 这充分说明要获得尽可能短的高功率脉冲输出, 精确的色散补偿仍然是关键因素.

要进行精确的色散补偿就必须对 CPA 系统中的各阶色散进行精确计算, 并对各种可能的影响因素和调节参数进行数值模拟, 从中找出最佳的色散补偿方案. 采用光线追迹法分析 CPA 系统是简便易

行的方法之一^[7], 最近我们已经分别对马丁内兹型和欧浮纳型展宽器构成的 CPA 系统的特性和参数的优化选取进行了研究, 其侧重点是采用逐阶色散补偿法消除系统的二阶色散和三阶色散^[8,9]. 本文采用同样的光线追迹法对较为普遍的马丁内兹型 CPA 系统的各阶色散进行了系统的理论研究, 侧重点是讨论系统中高阶色散的混合补偿问题. 研究结果表明当采用传统的逐阶色散补偿法将该系统中二、三阶色散消除之后, 五阶色散成为主要影响因素. 因此, 要获得高质量的超短脉冲, 必须对高次奇数阶色散进行有效补偿; 利用具有相异符号的低阶色散补偿高阶色散的方法, 即在系统内保留适量的低阶色散(不是设法完全消除)以补偿高阶色散的影响, 从而能够获得更接近傅里叶变换极限的超短脉冲. 该结果对于飞秒高功率激光系统的优化和调整具有指导意义.

2. CPA 系统中各阶色散的理论描述

当种子脉冲通过 CPA 系统后, 由于色散的影响, 脉冲不同频率成分的相移不同, 脉冲的总相位 $\phi(\omega)$ 是频率的函数. 将脉冲总相位 $\phi(\omega)$ 在中心频率 ω_0 处按泰勒级数展开

* 等离子体物理国家级重点实验室基金(批准号: 51480040_03JW1401) 国家自然科学基金(批准号: 60178007) 国家重点基础研究专项经费(批准号: G1999075201-2_2003CB314904) 高等学校优秀教师奖励计划资助的课题.

† E-mail: ull@tju.edu.cn

$$\begin{aligned} \phi(\omega) = & \phi(\omega_0) + \dot{\phi}(\omega)|_{\omega_0}(\omega - \omega_0) \\ & + \frac{1}{2!}\ddot{\phi}(\omega)|_{\omega_0}(\omega - \omega_0)^2 \\ & + \frac{1}{3!}\dot{\phi}^{(3)}(\omega)|_{\omega_0}(\omega - \omega_0)^3 \\ & + \frac{1}{4!}\phi^{(4)}(\omega)|_{\omega_0}(\omega - \omega_0)^4 + \dots \quad (1) \end{aligned}$$

其中 $\phi(\omega_0)$ 为常量, $\dot{\phi}(\omega)|_{\omega_0}$, $\ddot{\phi}(\omega)|_{\omega_0}$, $\dot{\phi}^{(3)}(\omega)|_{\omega_0}$, $\phi^{(4)}(\omega)|_{\omega_0}$ 分别称为一阶色散(群延迟, group delay, GD), 二阶色散(群延迟色散, group delay dispersion, GDD), 三阶色散(third order dispersion, TOD)和四阶色散(forth order dispersion, FOD), 往后依次类推.

(1)式中的第一项 $\phi(\omega_0)$ 表示相位平移, 第二项一阶色散 $\dot{\phi}(\omega_0)$ 只引起脉冲包络的时间平移, 称为 GD, 两者对脉冲包络形状没有影响. 影响脉冲宽度和形状的主要是 GDD 以及高阶色散项, 而且从前向后各阶色散的影响依次减小. 马丁内兹型 CPA 系统的总相位 $\phi(\omega)$ 为脉冲分别通过 CPA 系统的各个单元时引入的单元总相位之和. 在以前的研究中, 一般仅考虑到三阶色散项, 并且采用分别使二阶色散和三阶色散为零的逐阶补偿方式^[8,9], 这对于一般的 CPA 系统已经足够了. 但是, 如果为了获得更窄的和更高质量的脉冲, 就必须考虑高阶色散的影响. 这是因为 CPA 系统中的不同阶的色散对脉冲有不同的影响, 就是同阶同量的色散对不同宽度的输入脉冲影响也相差很大. 输入脉冲越短高阶色散对脉冲的影响也越大, 而且奇数阶的色散在引起脉冲展宽的同时还使脉冲前沿或后沿产生振荡, 使脉冲不对称, 导致对比度下降^[10]. 因此, 对于 CPA 系统中的高阶色散补偿问题, 不能采用逐阶色散补偿法, 必须对整个系统的色散进行分析, 采用混合色散相互补偿的方法更为有效.

3. 马丁内兹型 CPA 系统中高阶色散补偿

3.1 采用逐阶补偿二阶和三阶色散算法的结果

在不考虑增益窄化效应和非线性效应等因素影响的情况下, 我们以由反射式马丁内兹型展宽器、再生放大器和光栅对压缩器组成的 CPA 系统为模型进行色散补偿的理论研究. 首先, 仍然采用传统的逐

阶色散补偿法, 即调节压缩器中光栅的入射角和光栅对的距离, 使系统在中心波长处二阶和三阶色散同时为零, 再通过调整其他参数使系统有最宽最平坦的 GD 曲线, 此时, 可得到最小的二阶色散和高阶色散.

按这种办法得到该系统最佳状态的相位曲线和 GD 曲线如图 1 所示, 此时输入 10fs 的变换极限高斯脉冲, 理论上可得到 17.8fs 脉冲输出. 这种展宽主要是由于系统中高阶色散的作用(考虑到七阶色散)和有限的计算带宽(取波长范围 680—940nm, 不是 $\pm \infty$)的影响. 表 1 是在该情况下分别计算的中心波长 800nm 处该系统的二至七阶色散值和各阶色散单独(即考虑某阶色散作用时, 其余各阶色散全为零)对 10fs 输入脉冲作用时的脉冲展宽情况. 从中可以看出以下特点: 1) 采用逐阶补偿二阶和三阶色散的优化算法已经达到了最佳状态, 即二阶色散基本为零和三阶色散最小, 此时脉冲宽度基本不变(稍微的展宽是由于有限的计算带宽的影响); 2) 在系统参数优化的情况下, 五阶色散对脉冲宽度影响最大. 因此 CPA 系统的高阶色散的补偿问题应该重点放在对五阶色散的补偿.

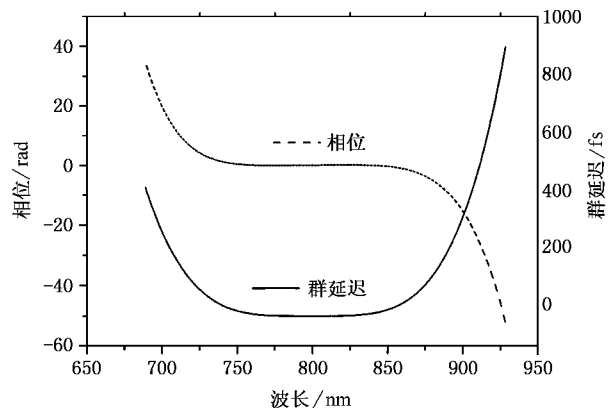


图 1 CPA 系统的相位曲线和 GD 曲线

我们注意到, 在以上计算中仅五阶色散单独作用就可将脉冲展宽到 17.9fs, 而考虑各阶色散的综合效果却仅将脉冲展宽到 17.8fs, 即综合效果明显好于各阶色散单独效果的简单叠加. 我们的解释如下: 由(1)式两边分别对圆频率求导, 得到 GD 的泰勒级数展开式

$$\begin{aligned} \dot{\phi}(\omega) = & \dot{\phi}(\omega_0) + \ddot{\phi}(\omega)|_{\omega_0}(\omega - \omega_0) \\ & + \frac{1}{2!}\dot{\phi}^{(3)}(\omega)|_{\omega_0}(\omega - \omega_0)^2 \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{3!} \phi^{(4)}(\omega) |_{\omega_0} (\omega - \omega_0)^3 + \dots \quad (2)$$

将表 1 中的各阶色散值分别代入(2)式,得到的各阶色散产生的 GD 曲线如图 2 所示.在脉冲的高频部分($\omega > \omega_0$),各阶色散产生的 GD 值有正有负;在脉冲的低频部分($\omega < \omega_0$),各阶色散产生的 GD 值均为正值.因此,图 2 中虽然在短波长部分单独各阶色散

产生的 GD 值都比长波长部分大,但是由于正负抵消反而使系统总 GD 值在短波长部分小很多,即综合结果使有效带宽增加.而分别考虑各阶色散的作用时其有效带宽是由最窄带宽决定的,所以综合考虑各阶色散的系统脉冲展宽量要小于分别单独考虑各阶色散导致脉冲展宽量的累加.

表 1 各阶色散值及其作用后的脉冲宽度值

阶数	二阶色散	三阶色散	四阶色散	五阶色散	六阶色散	七阶色散
色散值	$-1.8 \times 10^{-9}(\text{fs}^2)$	$67(\text{fs}^3)$	$-6639(\text{fs}^4)$	$979257(\text{fs}^5)$	$-8.90886 \times 10^6(\text{fs}^6)$	$7.32627 \times 10^7(\text{fs}^7)$
脉宽/fs	11.0	11.0	14.3	17.9	16.0	13.3

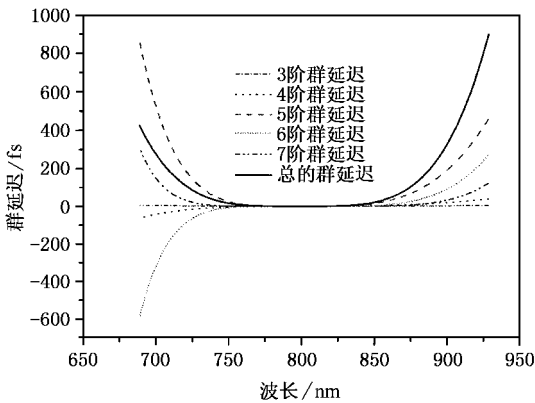


图 2 三至七阶色散产生的 GD 值和系统总 GD 值

基于以上的讨论,我们设想如果在系统中保留适当的二、三阶色散量而不是使其为零,以便进一步抵消部分较高阶色散,使 GD 曲线平坦范围更宽,则应该可以得到更短的脉冲.这不同于以前采用的逐阶补偿二、三阶色散的方法,我们将其称之为“总体色散的混合补偿法”.

3.2. 采用总体色散混合补偿法的结果

从(2)式可知,三阶色散项对 GD 曲线的影响是对称的,可使图 1 中 U 形 GD 曲线中心频率两侧的值同时增加或减小,选择适当的值可使其平坦部分更宽,而二阶色散项对 GD 曲线的影响是线性和不对称的,它使图 1 中 U 形 GD 曲线一端减小的同时必然使另一端增大,从而使 GD 曲线倾斜.图 3 是在图 1 基础上分别引入不同数值的二、三阶色散后得到的 GD 曲线.从图 3 可见,在偏离 0 延迟的 5fs 范

围内,只有引入 -1500fs^3 的三阶色散时, GD 曲线较平坦部分的宽度才明显增大(双底结构).我们采用总体色散的混合补偿法,分别针对图 3 的四种情况计算了 10fs 傅里叶变换极限高斯脉冲经该 CPA 系统后的展宽程度,见表 2.表 2 第一列为采用传统逐阶色散补偿法的理论结果,第二、三列为在此基础上加入少量正负二阶色散后的计算结果,第三、四列为加入正负 1500fs^3 三阶色散的计算结果.由表 2 可知,引入少量的二阶色散对脉冲宽度影响不大,但负三阶色散的确使输出脉冲变得更窄,这就证实了上面的分析.其实,从另一个角度看,正是引入的负三阶色散部分抵消了五阶色散(见表 1),从而减小了五阶色散对脉冲的影响程度.但是引入负三阶色散量必须合适,否则将导致脉冲的质量下降.这是因为系统中的奇数阶色散能够导致脉冲的前沿或后沿产生振荡.图 4 是引入不同大小负三阶色散值的 GD 图和脉冲形状对比图.从图 4 可见,当引入的负三阶色散值超过 3000fs^3 ,则 GD 曲线中间起伏加剧,这时虽然输出脉冲宽度还在变窄,但是脉冲前沿的旁瓣已经明显增大.当负三阶色散值取到 5000fs^3 时,在脉冲前后沿形成子脉冲,脉冲质量严重变坏.因此,引入负三阶色散量也存在着最佳值的选择问题.只有将 GD 曲线的平整度和平坦部分的宽度两个相互制约的因素综合考虑,才能得到尽可能短且质量高的光脉冲.

需要说明的是,引入低阶色散补偿高阶色散的总体色散的混合补偿法在实际调节 CPA 系统中很容易实现,即通过调节压缩器光栅的入射角和光栅对的距离就可以控制系统的二、三阶色散量.

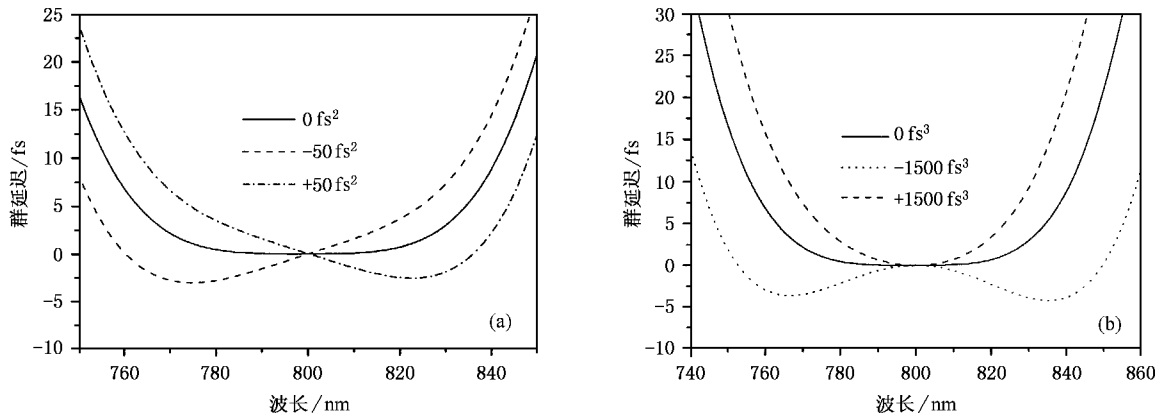


图 3 分别引入不同数值的二、三阶色散后的 GD 曲线 (a) 引入不同的二阶色散值 (b) 引入不同的三阶色散值

表 2 引入不同散值对输出脉冲宽度的影响

引入色散量	0fs^2	0fs^3	-50fs^2	$+50\text{fs}^2$	-1500fs^3	$+1500\text{fs}^3$
输出脉冲宽度/fs	17.8	17.8	17.8	18.1	15.5	19.9

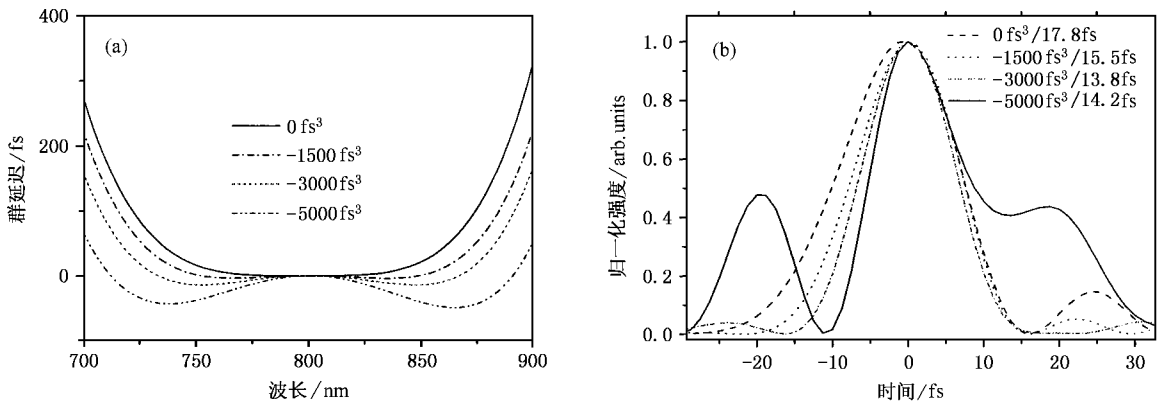


图 4 引入不同大小负三阶色散值时的 GD 曲线和对脉冲形状的影响 (a) GD 曲线 (b) 脉冲包络

4. 结 论

本文采用光线追迹法,对含有马丁内兹型展宽器的 CPA 系统的各阶色散进行了系统的理论研究,提出了引入适当负三阶色散量以补偿五阶色散的总

体色散的混合补偿方法.该方法能够获得比采用仅补偿二、三阶色散的逐阶色散补偿法更接近傅里叶变换极限的超短脉冲.引入的负三阶色散量存在有最佳值,应根据系统的 GD 曲线的平整度和平坦区间的宽度综合效果来确定.

[1] Sraickland D and Mourou G 1985 *Opt. Lett.* **56** 219

[2] Yamakawa K and Barty C P J 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **6** 657

[3] Cao D M *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1202 [in Chinese] 曹东茂等 2000 物理学报 **49** 1202]

[4] Shen Y Z *et al* 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 214 [in Chinese] 沈宇震等 1996 物理学报 **45** 214]

[5] Rane S *et al* 2000 *Appl. Phys. B* **70** [Suppl] 181

[6] Yamane K *et al* 2003 *Opt. Lett.* **28** 1987

[7] Zhang Z G, Yagi T and Arisawa T 1997 *Appl. Opt.* **36** 3393

- [8] Song Y R *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 581 [in Chinese] 宋晏蓉 等 2003 物理学报 **52** 870]
 [10] David N F *et al* 1998 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **4** 430
 [9] Sun D R *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 870 [in Chinese] 孙大睿

Mutual compensation of higher-order dispersion in chirped pulse amplifier with a Martinez stretcher^{*}

Sun Zhen-Hong¹⁾ Chai Lu¹⁾ Zhang Zhi-Gang¹⁾ Wang Qing-Yue¹⁾ Zhang Wei-Li¹⁾²⁾
 Yuan Xiao-Dong³⁾ Huang Xiao-Jun¹⁾³⁾

¹⁾ *School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, EMC, Tianjin 300072, China*

²⁾ *School of Electrical and Computer Engineering, Oklahoma State University, OK74078, USA*

³⁾ *Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

(Received 22 April 2004 ; revised manuscript received 9 June 2004)

Abstract

The dispersion in a chirped pulse amplifier (CPA) with a Martinez stretcher is analyzed theoretically based on ray-tracing. The method of mutual compensation that introduced properly the negative third-order dispersion to balance the fifth-order dispersion is presented. A shorter pulse near the transform-limit can be generated by this method rather than by the traditional approach that zeros the second and the third order dispersion successively in the CPA system.

Keywords : chirped pulse amplifier , Martinez stretcher , dispersion compensation

PACC : 4280W , 4260B

^{*} Project supported by the Foundation of LLF (Grant Nos. 51480040 , 03JW1401) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60178007) , the National Key Basic Research Special Foundation (Grant Nos. G1999075201 - 2 , 2003CB314904) , the Foundations of Chinese Ministry of Education for Outstanding Young Teachers in Universities.