

文章编号: 0258-7025(2005)06-0749-05

## 飞秒啁啾脉冲放大系统调节精度的研究

孙振红<sup>1</sup>, 柴 路<sup>1\*</sup>, 谢旭东<sup>1</sup>, 张志刚<sup>1</sup>, 王清月<sup>1</sup>, 张伟力<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电子信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)  
<sup>2</sup>美国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)

**摘要** 以负色散光栅对压缩器为模型,通过系统的色散误差公式从理论上分析了飞秒啁啾脉冲放大系统中的展宽器和压缩器的调节精度与系统的光栅对距离、光栅入射角、光栅密度等参量的关系,以及不同宽度入射脉冲对系统调节精度的要求。结果表明,必须选择合适的光栅入射角和光栅密度才能在满足系统对综合性能要求的同时降低对系统调节精度的要求;系统中光栅入射角度的调节具有最高的调节精度要求;入射脉冲宽度越窄则对系统的调节精度的要求越高;整个系统的优化中如果考虑各阶色散之间的相互补偿作用,则可以减少光栅对距离和光栅入射角的调节精度要求。

**关键词** 超快光学; 飞秒激光; 调节精度; 色散补偿

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

## Study on Adjusting Accuracy in the Femtosecond Chirp-Pulse Amplification System

SUN Zhen-hong<sup>1</sup>, CHAI Lu<sup>1</sup>, XIE Xu-dong<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-gang<sup>1</sup>,  
WANG Qing-yue<sup>1</sup>, ZHANG Wei-li<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, University of Tianjin, The Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)  
<sup>2</sup> Oklahoma State University, Stillwater, OK 74078, US)

**Abstract** Using the model of grating pair compressor with negative dispersion, the formulae of dispersion errors for the femtosecond chirped-pulse amplification system are presented. The relationship of the adjusting accuracy in the stretcher/compressor versus the distance, incidence angle, and density of the grating pair is discussed theoretically. The demand of adjusting accuracy for different width of input pulse is also studied. The grating incidence angle and the grating density must be selected properly to satisfy the requirement of the system and at the same time decrease the adjusting accuracy. The highest precision is offered to the grating incident angle in the system. The higher alignment sensitivity is needed for the shorter pulse duration. The mutual compensating among varied order dispersion should be considered to optimize whole system, allowing the decrease of the adjusting accuracy.

**Key words** ultrafast optics; femtosecond laser; adjusting accuracy; dispersion compensation

### 1 引 言

啁啾脉冲放大技术(CPA)经过十几年的发展,已经得到低于 20 fs, 100 TW 的输出脉冲<sup>[1]</sup>。最近, M. Aoyama 等<sup>[2]</sup>又将掺钛蓝宝石激光放大系统的输出功率提高到拍瓦量级。飞秒啁啾脉冲放大技术

的关键是通过精确计算和调节系统的各个参量,使放大系统的各阶色散得到尽可能的补偿,使输出脉冲最短。为达到此目的,飞秒啁啾脉冲放大系统的各个环节都需要精确调节,其中的展宽器和压缩器就是该系统中最关键的可调节元件,需要很高的调

收稿日期: 2004-06-01; 收到修改稿日期: 2004-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(60178007)、国家 973 计划(G1999075201-2, 2003CB314904)、高等学校优秀教师奖励计划和等离子体物理国家重点实验室(51480040103JW1401)资助项目。

作者简介: 孙振红(1977—),男,河北人,天津大学超快激光研究室硕士研究生,主要从事飞秒激光技术的研究。

\* 通信联系人。E-mail: ull@tju.edu.cn

节精度才能保证系统中的色散得到最佳补偿。

展宽器和压缩器所需要的调节精度与飞秒啁啾放大系统的许多参量有关,通过改变系统的参量或结构即可降低要求<sup>[3,4]</sup>,但是这些方法都有一定的局限性。虽然压缩器光栅对的不平行度对色散有很大的影响<sup>[5~7]</sup>,但是在采用了单光栅结构以后,该影响已经消除。因此,为使系统运转在最佳色散补偿状态,展宽器和压缩器中的光栅对距离和光栅入射角就成了系统中两个需要高精度调节的参量。本文以这两个参量为研究对象,对影响展宽器和压缩器调节精度的各种因素进行了系统分析,给出了这两个参量的调节精度要求。研究结果对飞秒啁啾放大系统各个参量的选择,特别是对选择展宽器和压缩器构成器件的调节精度具有指导意义。

## 2 调节精度与系统参量的关系

这里仅以 Treacy 的负色散光栅对压缩器为模型<sup>[8]</sup>,进行调节精度与系统参量之间关系的研究。由于展宽器和压缩器是准共轭器件,二者中的光栅对的距离误差  $\delta b$  和入射角误差  $\delta\gamma$  引入的二、三阶色散误差值近似相等而符号相反(由展宽器像散引起的色散误差量较小,可以忽略);此外在实际操作过程中压缩器也是主要调节器件。

图 1 为 Treacy 型光栅对压缩器的示意图,图 1 中  $b$  表示两光栅的斜线距离; $G$  为两光栅的垂直距离; $\gamma$  为入射角; $\theta$  为入射光与一级衍射光的夹角。光线  $ABS$  间的相位可表示为

$$\Phi(\omega) = \frac{\omega}{c} b \times (1 + \cos \theta) - \frac{2\pi G}{d} \tan(\gamma - \theta), \quad (1)$$

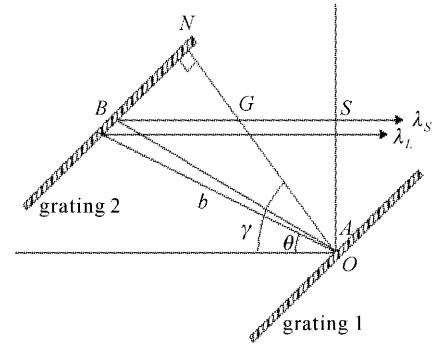


图 1 压缩器原理图

Fig. 1 Principle diagram of compressor

其中  $c$  为光速,  $1/d$  为光栅密度,  $b = G / \cos(\gamma - \theta)$ 。将相位对圆频率  $\omega$  逐阶求导,可得压缩器的各阶色散表达式

一阶色散(群延迟时间  $\tau_{GD}$ )

$$\tau_{GD} = b \times (1 + \cos \theta) / c, \quad (2)$$

二阶色散(群延迟色散  $d_{GDD}$ )

$$d_{GDD} = - \frac{G\lambda^3}{2\pi d^2 c^2 \cos^3(\gamma - \theta)}, \quad (3)$$

三阶色散( $d_{TOD}$ )

$$d_{TOD} = \frac{3G\lambda^4 [1 + \sin(\gamma)\sin(\gamma - \theta)]}{4\pi^2 d^2 c^3 \cos^5(\gamma - \theta)}, \quad (4)$$

压缩器光栅对的距离  $b_0$  ( $b_0$  是  $b$  在中心波长 800 nm 处的值)和光栅的入射角  $\gamma$  是飞秒啁啾放大系统中色散补偿的两个最重要的可调节参量。理论上,适当调节  $b_0$  和  $\gamma$  的值可使放大系统的中心波长处二、三阶色散同时为零。但实际调节中的  $b_0$  和  $\gamma$  值和理论值之间有一定误差,设误差分别表示为  $\delta b$  和  $\delta\gamma$ ,分别把(3)式和(4)式对  $b$  和  $\gamma$  求微分,得到二、三阶色散误差公式如下

$$d_{GDD}(\delta b) = - \frac{\lambda^3}{2\pi d^2 c^2 \cos^2(\gamma - \theta)} \delta b, \quad (5)$$

$$d_{GDD}(\delta\gamma) = \frac{3b\lambda^3 \sin(\gamma - \theta) \cos(\gamma)}{2\pi d^2 c^2 \cos^2(\gamma - \theta) \sqrt{1 - [\sin(\gamma) - \lambda/d]^2}} \delta\gamma, \quad (6)$$

$$d_{TOD}(\delta b) = \frac{3\lambda^4 [1 + \sin(\gamma)\sin(\gamma - \theta)]}{4\pi^2 d^2 c^3 \cos^4(\gamma - \theta)} \delta b, \quad (7)$$

$$d_{TOD}(\delta\gamma) = \frac{3b\lambda^4 \cos(\gamma)}{4\pi^2 d^2 c^3 \cos^6(\gamma - \theta)} \times [\cos^2(\gamma - \theta) \sin(\gamma - \theta) + 4\cos^2(\gamma - \theta) \sin(\gamma) - 5\sin(\gamma - \theta) - 5\sin(\gamma)] \delta\gamma, \quad (8)$$

从(5)~(8)式可以看到,如果其他参量不变,二、三阶色散都随  $\delta b$  和  $\delta\gamma$  成线性变化。二、三阶色散误差与系统参量的关系如图 2 所示。图 2(a), (b)分别表示  $\delta b = 1 \mu\text{m}$  和  $\delta\gamma = 1 \text{ arcsec}$  (arcsec 为弧

秒,  $1 \text{ arcsec} \approx 4.848 \times 10^{-6} \text{ rad}$ ) 时二、三阶色散误差与光栅密度  $1/d$  [此时入射角  $\gamma$  大于相应利特罗(Littrow)角  $10^\circ$ ] 的关系,以及二、三阶色散误差和入射角偏离利特罗角 ( $1/d = 1400 \text{ mm}^{-1}$  时) 的度数

$n$  的关系。从图 2 可知,二、三阶色散误差的绝对值都随光栅密度增大而增大,随入射角偏离利特罗角值  $n$  的增大而减小,而且三阶误差变化的速度明显快于二阶,以及对应  $\delta\gamma$  的误差曲线的变化率快于对应  $\delta b$  的误差曲线,这说明对光栅入射角  $\gamma$  的调解精度要求更高。需要注意的是,实际的光栅压缩器是单光栅结构,如图 3 所示。直角反射镜的使用不仅减少了一个光栅,还使光栅和其像光栅的平行度有了保证。但是,光栅对的距离误差  $\delta b$  将变成  $2\delta b$ ,因

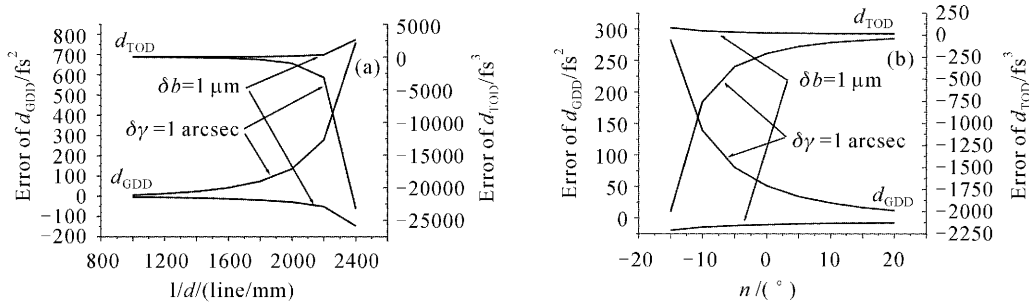


图 2 (a)二、三阶色散误差与光栅密度的关系,(b)二、三阶色散误差与入射角偏离利特罗角度数的关系

Fig. 2 (a) Relationship of the errors of  $d_{\text{GDD}}$  and  $d_{\text{TOD}}$  versus the grating density, (b) relationship of the errors of  $d_{\text{GDD}}$  and  $d_{\text{TOD}}$  versus the angle deviation;  $n$  is the difference of the incidence angle with the Littrow angle

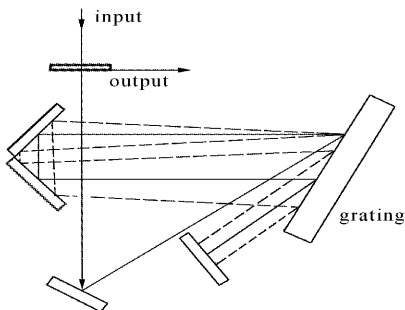


图 3 单光栅压缩器光路图

Fig. 3 Schematic of the single-grating compressor

### 3 脉冲宽度对调节精度的要求

在飞秒啁啾放大系统中,通过调节压缩器光栅对的距离和光栅的入射角,理论上应该使系统在中心波长处二阶和三阶色散同时为零,只有部分高阶色散不能补偿。但是,在实际的放大系统中由于器件调节精度的限制(调节误差的存在),无法达到理想的色散补偿状态。导致仍有二阶和三阶色散的剩余色散。这样由调节误差引入的二阶和三阶剩余色散加上未被补偿的高阶色散将对输出脉冲产生不同程度的影响,其影响程度不但和色散量的大小有关,而且和入射种子脉冲的时域宽度有关。表 1 给出了压缩器调节误差  $\delta b, \delta\gamma$  取不同值,并考虑到系统的

此由距离误差引起的二、三阶色散误差值也要加倍。从图 2 中得出另一个重要的结论是,无论是二阶还是三阶色散,相对于  $\delta\gamma$  和  $\delta b$  的误差值的符号正好相反,因此在适当的参量条件下,可以利用二者相互补偿关系,使系统的二阶、三阶色散为零,即在实际中追求二者分别达到最佳值的调节方法并不必要,只要注重二者调节的相互搭配,仍然能够获得比较理想的二阶、三阶色散补偿。

高阶色散(4~7 阶)项时,对不同宽度的高斯型变换极限种子脉冲影响程度的数值模拟计算的结果。表中的  $M$  表示数据组序号,  $T_{\text{in}}$  表示入射种子脉冲宽度,  $T_{\text{out}}$  表示输出脉冲宽度,第一组数据中  $\delta b = 0$ ,  $\delta\gamma = 0$  表示放大系统的参量处于最佳状态。最佳状态是指系统各个参量都等于理论值,中心波长处二、三阶色散为零,且系统 GD 曲线最平坦的状态<sup>[9]</sup>。最佳状态时压缩器的参量为  $1/d = 1400 \text{ mm}^{-1}$ ,  $b_0 = 550080 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\gamma = 45^\circ 55' 20''$ 。

从表 1 可以看到系统的以下几个特点:1) 相同的色散量对短脉冲的影响大,对长脉冲影响小,即脉冲越短调节精度要求越高。如 10 fs 种子脉冲在入射角偏离 5 arcsec 时,输出脉冲从最佳状态时的 17.7 fs 展宽到 18.9 fs,但入射角偏离 10 arcsec 时已展宽到 42.7 fs。而对 100 fs 种子脉冲,入射角偏离 100 arcsec 时才有较大影响。2) 长脉冲主要受到二阶色散影响,而短脉冲受高阶色散的影响也很大。如第一组数据中二、三阶色散近似为零时,未被补偿的高阶色散将 10 fs 脉冲展宽将近一倍,而对 50 fs 脉冲已经几乎没有影响;另外,对第五组数据的计算表明,仅二阶色散 (451 fs<sup>2</sup>) 就把 50 fs 脉冲展宽到 55.9 fs,而三阶色散及更高阶色散之和对脉冲几乎没有展宽。3) 对于短脉冲,由于受高阶色散影响比

较大,从第一、八、九、十这四组数据的比较可以看到:目前所谓的最佳状态(二、三阶色散为零)其实并不是该系统考虑高阶色散情况时的最佳,只有适当调节入射角  $\gamma$  和光栅对距离  $b_0$  的值,仅使系统二阶

色散为零而三阶色散为一定量负值,反而能得到更短的脉冲(第九组数据)。这是由于保留一定量负值三阶色散可以部分抵消更高阶色散的影响,从而使系统整体色散得到更好的补偿。

表 1 压缩机调节误差的不同值对不同宽度的高斯型变换极限脉冲的影响程度

Table 1 Different extent of effect for compressor's alignment errors to different width of Gauss transform limited pulses

$M$	$\delta b / \mu\text{m}$	$\delta \gamma / \text{arcsec}$	$d_{\text{GDD}} / \text{fs}^2$	$d_{\text{TOD}} / \text{fs}^3$	$T_{\text{in}} / \text{fs}$	$T_0 / \text{fs}$	$T_{\text{in}} / \text{fs}$	$T_0 / \text{fs}$	$T_{\text{in}} / \text{fs}$	$T_0 / \text{fs}$	$T_{\text{in}} / \text{fs}$	$T_0 / \text{fs}$
1	0	0	0	0.6	10	17.7	20	22.4	50	50.0	100	100.0
2	0	5	113	-409	10	18.9	20	23.6	50	50.3	100	100.0
3	-13	0	110	-216	10	19.0	20	23.6	50	50.3	100	100.0
4	0	10	226	-818	10	42.7	20	33.5	50	51.5	100	100.0
5	0	20	451	-1634	10	103.1	20	65.8	50	55.9	100	100.5
6	0	50	1128	-4084	-	-	-	-	50	79.9	100	104.5
7	0	100	2281	-8227	-	-	-	-	-	-	100	117.7
8	106	22	-401	-33	10	70.7	20	59.5	50	54.7	100	100.5
9	106	40	5.3	-1503	10	15.5	20	21.0	50	50.0	100	100.0
10	-106	-40	-5.7	1506	10	19.8	20	24.0	50	50.1	100	100.0

#### 4 系统参量选择的综合讨论

对飞秒啁啾放大系统的几个重要参量如脉冲展宽比、光栅衍射效率、各光学元件的尺寸和调节精度的选择要求进行综合讨论。

1) 光栅密度的选择:提高光栅密度可以增大展宽比,但同时也增大了光学元件尺寸和对调节精度的要求,文献[3,4]中分别使用了  $2400 \text{ mm}^{-1}$  和  $2000 \text{ mm}^{-1}$  的高密度光栅,从图 2 系统二、三阶色散误差与光栅密度的关系可以看到,高密度光栅的调节灵敏度比低密度光栅提高了几十到上百倍。由于调节精度要求极高,两者都插入附加的光学元件来降低对调节精度要求和补偿由调节误差引入的附加色散,但这种方法只能近似补偿色散,对于 100 fs 左右的脉冲还能适用,如果脉冲宽度远低于 100 fs,调节精度的要求进一步提高,这种方法也就不适用了。根据计算,选择  $1200 \text{ mm}^{-1}$  左右的光栅比较合适,既降低了对调节灵敏度的要求,又兼顾到较大的展宽比。

2) 光栅入射角的选择:入射角偏离利特罗角太大,光的衍射效率就会降低,但是如果入射角等于利特罗角,光束会沿原路返回。为了使入射光和衍射光分开,入射光必然与衍射光不在同一水平面上,而且衍射光各个光谱不在同一平面内,形成一个锥面,这样就造成空间色散。所以,一般使入射角略偏离利特罗角。尽管有的文献提出入射角应小于利特罗角,这样可以提高展宽比和减小光栅尺寸<sup>[10]</sup>,但是从图 2 可以看到,选择小于利特罗角入射,将引入较

大的二、三阶色散,并要求光栅的角度调节精度明显提高。比如,当  $n$  为  $10^\circ$  时,1 arcsec 的调节误差分别为二阶色散  $23.5 \text{ fs}^2$  和三阶色散  $-86 \text{ fs}^3$ ;而当  $n$  为  $-10^\circ$  时,1 arcsec 的调节误差分别增至为二阶色散  $139 \text{ fs}^2$  和三阶色散  $-755 \text{ fs}^3$ 。因此,光栅入射角应该选择稍微大于利特罗角入射为好。

3) 压缩机光栅对距离和光栅入射角的调节精度要求:对光栅的入射角的调节精度要求明显要高于对光栅对距离的调节精度的要求。当选定了光栅密度后,还要考虑系统运转的脉冲宽度。如表 1 所示,当脉冲宽度为 100 fs 时,光栅入射角的调节精度要小于 50 arcsec;当脉冲宽度为 50 fs 时,光栅入射角的调节精度要小于 10 arcsec;当脉冲宽度小于 20 fs 时,光栅入射角的调节精度要小于 5 arcsec;而对于光栅对距离的调节精度,当脉冲宽度为 50 fs 以上时,可大于 100  $\mu\text{m}$ ;当脉冲宽度小于 20 fs 时,可小于 13  $\mu\text{m}$ 。因此,应根据实际情况需要,选择两个调节器件的精度,特别是光栅旋转台的精度。选择精度过高,将导致不必要的浪费,而选择精度过低,将无法达到系统的最佳色散补偿。

4) 考虑整个系统的色散补偿时,对光栅对距离和光栅入射角的调节方式:目前多采用分别调节这两个参量使系统的二、三阶色散分别达到最佳的调节方法。这对调节器件的精度要求较高,当存在调节误差时,会有剩余的二、三阶色散。本文提出利用两个参量的引入色散误差的相互补偿关系,应在每一个光栅对距离位置上同时搭配调节光栅入射角参

量,使系统的二阶、三阶色散之和趋于零,这也降低了对调节器件的精度要求。如果考虑到系统中总有高阶色散,就应使系统的二阶色散为零而三阶色散为一定量负值,这样可以部分抵消更高阶色散的影响,从而使系统整体色散补偿效果更好。

### 参 考 文 献

- 1 K. Yamakawa, M. Aoyama, S. Matsuoka *et al.*. 100-TW sub-20-fs Ti:sapphire laser system operating at a 10-Hz repetition rate[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(18): 1468~1470
- 2 M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane *et al.*. 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17): 1594~1596
- 3 S. Kane, J. Squier, J. V. Rudd *et al.*. Hybrid grating-prism stretcher-compressor system with cubic phase and wavelength tunability and decreased alignment sensitivity[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(22): 1876~1878
- 4 A. Braun, T. Sosnowski, S. Kane *et al.*. Tunable third-order phase compensation by refraction from an intragrating-pair parallel plate[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1998, **4**(2): 426~429
- 5 Z. Zhang, T. Yagi. Evaluation of dispersion in a misaligned grating pair pulse compressor[J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **77**(2): 937~939
- 6 Wang Yong, Zhang Weili, Chai Lu *et al.*. Calculation of the dispersion with angular misalignment of grating pair compressor by ray-tracing method[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2000, **11**(5): 481~483  
王 勇,张伟力,柴 路等. 压缩器光栅不平行度对色散影响的光线追迹法分析[J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(5): 481~483
- 7 Zhu Pengfei, Qian Liejia, Liu Yupu *et al.*. Alignment of grating pair for single-pulse compression [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6): 509~512  
朱鹏飞,钱列加,刘玉璞等. 单次工作的压缩器光栅对的平行性调整[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6): 509~512
- 8 E. B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **QE-5**(9): 454~458
- 9 Zhang Zhigang, Sun Hong. Calculation and evaluation of dispersions in a femtosecond pulse amplification system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(6): 1080~1086  
张志刚,孙 虹. 飞秒脉冲放大器中色散的计算和评价方法[J]. *物理学报*, 2001, **50**(6): 1080~1086
- 10 Xu Guang, Qian Liejia, Fan Dianyuan. Optimization of the single-grating stretcher in chirped-pulse amplification [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(12): 1067~1070  
徐 光,钱列加,范滇元. 啁啾脉冲放大系统中单光栅展宽器的优化[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12): 1067~1070