

# 平行光栅对压缩器输出激光脉冲的时间稳定性分析

赵 丹<sup>1,2,3,4</sup> 王 逍<sup>1,2,4</sup> 王波鹏<sup>1,2,3,4</sup> 李志林<sup>1,2,4</sup> 母 杰<sup>1,2,4</sup> 谢 娜<sup>1,2</sup>  
周凯南<sup>1,2,4</sup> 粟敬钦<sup>1,2</sup> 朱启华<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

<sup>2</sup>中国工程物理研究院等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900

<sup>3</sup>中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

<sup>4</sup>上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240

**摘要** 在两种不同条件下分别讨论了平行光栅对压缩器输出激光脉冲的时间稳定性, 采用数值计算的方法定量分析了光束指向性、折返镜姿态变化、光栅对平移误差等因素对压缩器输出脉冲脉宽的影响以及在不同光栅刻线密度下输出脉冲对这些因素的敏感程度, 并给出了不同条件下不同影响因素的误差容许范围。

**关键词** 非线性光学; 时间稳定性; 光栅对压缩器; 啁啾脉冲放大; 光栅刻线密度

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0708001

## Temporal Stability Analysis of Output Pulse from Parallel Grating Pair Compressor

Zhao Dan<sup>1,2,3,4</sup> Wang Xiao<sup>1,2,4</sup> Wang Bopeng<sup>1,2,3,4</sup> Li Zhilin<sup>1,2,4</sup> Mu Jie<sup>1,2,4</sup>  
Xie Na<sup>1,2</sup> Zhou Kainan<sup>1,2,4</sup> Su Jingqin<sup>1,2</sup> Zhu Qihua<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

<sup>2</sup>Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

<sup>3</sup>Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

<sup>4</sup>Collaborative Innovation Center of IFSA, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** The temporal stability of output pulse from the parallel grating pair compressor is discussed under two different conditions. The influence of the beam pointing variance, the retro-mirror misalignment, and the grating pair translational error on the output pulse width from the compressor is quantitatively analyzed by means of numerical calculation. When the grating groove density changes, the sensitivity of the output pulse to these factors is also discussed. Moreover, the allowable tolerance ranges of the aforementioned factors under different conditions are presented.

**Key words** nonlinear optics; temporal stability; grating pair compressor; chirped pulse amplification; grating groove density

**OCIS codes** 190.7110; 320.5520; 260.2030; 230.1950

## 1 引 言

自 20 世纪 80 年代啁啾脉冲放大(CPA)概念提出以来,超短超强脉冲激光技术得到了飞速发展。在

收稿日期: 2016-02-03; 收到修改稿日期: 2016-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(61308040)、国家 863 计划(2015AA8043047)

作者简介: 赵 丹(1991—),女,硕士研究生,主要从事光参量啁啾脉冲放大过程中色散控制方面的研究。

E-mail: zhaodan\_scustc@163.com

导师简介: 王 逍(1970—),女,博士,研究员,硕士生导师,主要从事高能超短超强脉冲激光方面的研究。

E-mail: wangxiaocn@263.net(通信联系人)

CPA 系统中,压缩器是非常关键的部分<sup>[1-2]</sup>,其中在大型超短脉冲激光系统中最为广泛使用的是平行光栅对压缩器<sup>[3]</sup>,其性能往往影响着整个系统最终输出的脉冲特性。

对大型激光系统而言,整个光路链较长,包含众多光学元件,即便初始进行了细致的安装调试,由于环境因素的影响,后期运行时光路中的元件也可能发生位置和姿态上的变化。例如,置于真空箱体中的元件在抽真空过程中其姿态或位置往往会发生变化;另外,真空机组、空调等激振源可能使光路中的元件发生振动,引起光束指向性抖动或色散距离变化等。

对于一般的纳秒脉冲激光系统,全光路的光束指向性漂移可通过调整部分元件(如伺服反射镜、靶瞄准调整镜等)来进行校正,前述的因素通常不会影响输出激光脉冲的时间特性(如脉冲宽度、形状等)。但是对于存在反射式光栅的超短脉冲激光系统,由于光栅对的色散量与光束的入射角及光栅间距等有直接的依赖关系,因此,某些元件姿态变化引起的光束指向性漂移,甚至是元件振动引起的色散距离的微小变化都有可能影响系统输出脉冲的时间特性。

文献[4-6]分析了压缩器中光栅对不平行以及光栅刻线不平行时的色散变化,但是其他因素对输出激光脉冲时间特性的影响程度以及系统运行时应该对哪些元件进行特殊控制及其相关的控制精度问题,目前鲜有文献详细分析。为此,本文较为详细地定量分析了在不同条件下不同因素对输出脉冲的影响,其结果可为系统设计及系统调整<sup>[7-8]</sup>(如稳定性控制)提供依据。

## 2 理论模型

常见的几种平行光栅对压缩器如图 1 所示,图 1(a)为双光栅单程压缩器,图 1(b)为四光栅单程压缩器,图 1(c)为双光栅双程压缩器。

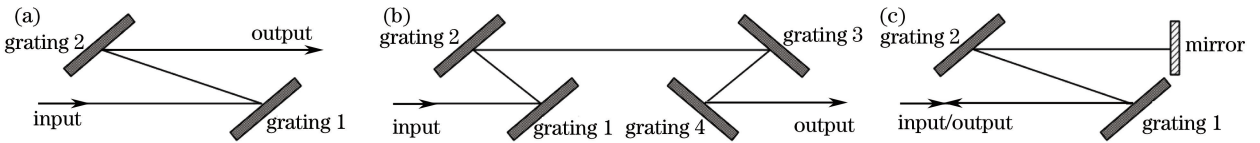


图 1 三种典型的光栅对压缩器

Fig. 1 Three typical grating pair compressors

考虑典型的以提供负色散为目的的平行光栅对,光路如图 2 所示,其中 A 为光线在光栅 G<sub>2</sub> 上的入射点, B 和 C 分别为不同波长的光线在光栅 G<sub>1</sub> 上的入射点, N 为过 A 点作 BC 垂线在光栅 G<sub>1</sub> 上的垂点,点 A 与点 N 的距离代表光栅 G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> 间的垂直距离 G, M 为过 A 点垂直于出射光线的垂点, λ<sub>1</sub>、λ<sub>2</sub> 分别代表两种不同的波长。根据光栅方程有

$$\sin \gamma + \sin(\gamma - \theta) = m\lambda/d, \quad (1)$$

式中 γ 为入射角, θ 为入射光线与衍射光线间的夹角, γ - θ 为衍射角, m 为衍射级次(通常用一级衍射,即 m = 1), λ 为波长, d 为光栅常数。假设点 A 与点 B 的距离为 b, 则光线单次通过光栅对的光程

$$P = |AB| + |BM| = b(1 + \cos \theta), \text{ 其中有效色散长度 } b = \frac{G}{\cos(\gamma - \theta)} \quad [9]$$

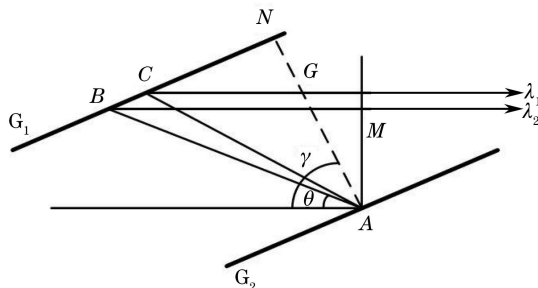


图 2 平行光栅对压缩器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of parallel grating pair compressor

光线单次通过光栅对所获得的相位为<sup>[10-11]</sup>

$$\phi(\omega) = \frac{\omega}{c}P - 2\pi \frac{G \tan(\gamma - \theta)}{d}, \quad (2)$$

式中  $\omega$  为光波频率,  $c$  为光速。对相位  $\phi(\omega)$  分别求  $\omega$  的一、二、三、四阶导数, 相应可得到群延迟和二、三、四阶色散<sup>[9,12-13]</sup>。群延迟只是改变脉冲内各频谱成分在时域内的位置, 不会改变频谱; 二阶色散主要影响脉冲的展宽或压缩, 即影响脉宽; 三、四阶色散主要影响脉冲的形状、信噪比等<sup>[14]</sup>。

假设系统输入脉冲为高斯脉冲<sup>[14]</sup>, 脉冲形式为

$$U_{in}(t) = E_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right) \exp(-i\omega_0 t), \quad (3)$$

式中  $t$  为时间,  $E_0$  为峰值电场强度,  $T_0$  为脉冲光强峰值  $1/e$  处的脉冲半宽度,  $\omega_0$  为中心圆频率。对  $U_{in}(t)$  作傅里叶变换得到输入脉冲的频谱  $U_{in}(\omega)$ , 若脉冲经过全系统后获得的总相位为  $\phi_{total}$ , 则系统输出脉冲的频谱可表示为

$$U_{out}(\omega) = U_{in}(\omega) \exp(i\phi_{total}), \quad (4)$$

再对  $U_{out}(\omega)$  作傅里叶逆变换可得到输出脉冲的时间形式  $U_{out}(t)$ , 即

$$U_{out}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_{in}(\omega) \exp(i\phi_{total} - i\omega t) d\omega. \quad (5)$$

理想状态下, 整个 CPA 系统的色散都能得到较好的补偿, 能输出变换极限或近变换极限的激光脉冲, 但在实际情况中, 由于诸多影响因素的存在, 系统总会在一定程度上偏离理想状态。

### 3 激光脉冲输出时间稳定性分析

#### 3.1 压缩器前的光束指向性对输出激光脉冲的影响

假设系统初始状态时全系统色散已经得到较好的补偿, 若激光束入射角偏离理想值, 则系统引入剩余色散。光线在双光栅双程压缩器中的光路如图 3 所示, 其中  $M_1$  为反射镜,  $G_1$ 、 $G_2$  分别表示光栅 1 和光栅 2, 入射角未偏离理想值时光线在压缩器中所走光路为  $A_1BC_1D_1C_1BA_1$ , 入射角发生偏离时的光路为  $A_2BC_2D_2EFH$ 。原本光束入射角为  $\gamma$ , 入射角发生偏移变为  $\gamma + \alpha$  (入射角偏差  $\alpha$  可正可负), 光线经  $M_1$  反射后第二次进入压缩器时的入射角为  $\gamma'$ , 进行光线追迹可知,  $\gamma' = \gamma - \alpha$ , 即第二次进入压缩器时的入射角变化了  $\alpha$ 。

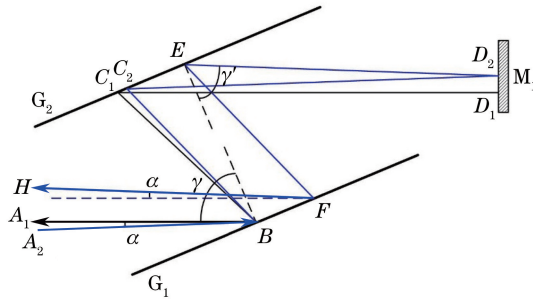


图 3 光束入射角偏离理想值时压缩器的光路图

Fig. 3 Ray-tracing of the grating pair compressor with incident angle deviation

由文献[9]知, 压缩器各阶色散的绝对值随入射角的增大而减小, 故光线第一次通过压缩器时, 由于入射角变化引起的色散量变化会因光线第二次通过压缩器而得到一定的补偿。分析了在两种不同条件下输出脉冲对光束指向性的敏感程度:

条件 I: 系统输入脉冲带宽较大 (大于 30 nm), 系统提供的啾啾量较小 (约为 40 ps/nm), 如基于钛宝石放大的 CPA 激光系统;

条件 II: 系统输入脉冲带宽较小 (约为 10 nm), 系统提供的啾啾量较大 (约为 400 ps/nm), 如基于钕玻璃放大的 CPA 激光系统。其余参数如表 1 所示。

表 1 两种计算条件  
Table 1 Two calculation conditions

	Central wavelength /nm	Pulse width /fs	Spectral width /nm	Incident angle /( $^{\circ}$ )	Separation of grating pair /m	Grating groove density /(lp/mm)
Case I	800	30	31.39	53	1.61	1740
Case II	1053	163	10	70	4.02	1740

在两种条件下入射角偏离理想值时,压缩器输出脉冲的时间波形和脉宽展宽比(输出脉宽与理想脉宽之间的比值)曲线如图 4 所示。

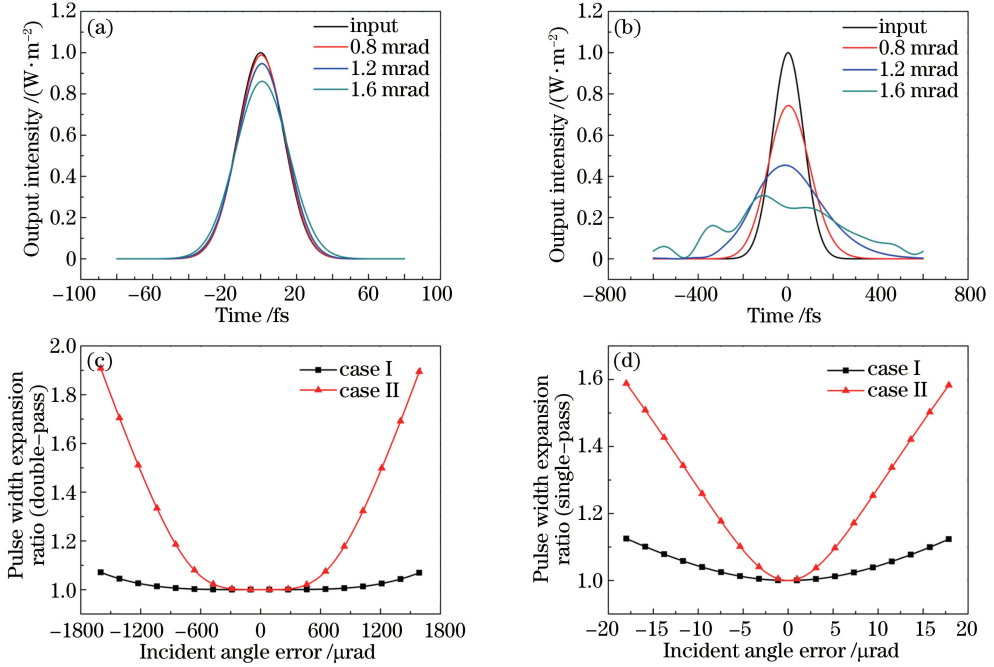


图 4 不同条件下入射角偏差  $\alpha$  对输出脉宽的影响。(a) 条件I下的输出脉冲时间波形;(b) 条件II下的输出脉冲时间波形;  
(c) 光束双程通过光栅对压缩器时的输出脉宽展宽比;(d) 光束单程通过光栅对压缩器时的输出脉宽展宽比

Fig. 4 Effect of incident angle deviation  $\alpha$  on the output pulse width under different conditions. (a) Output pulse temporal shape in case I; (b) output pulse temporal shape in case II; (c) output pulse width expansion ratio of the double-pass compressor; (d) output pulse width expansion ratio of the single-pass compressor

由图 4(c)可以看出,随着入射角偏离值的增大,压缩器输出脉冲的时间波形也会发生改变,脉冲被展宽,但是在条件 I 和条件 II 两种状态下光束指向性变化对输出脉冲的影响大不相同。在条件 II 下输出激光脉冲对光束指向性的敏感程度明显高于条件 I。以输出脉冲的脉宽展宽率(输出脉宽和理想脉宽的差值与理想脉宽的百分比值)小于 10% 为标准,两种条件下的入射角偏离值的容许范围分别是:条件 I 时为  $-1.76 \sim +1.76$  mrad,条件 II 时为  $-0.7 \sim +0.7$  mrad。

若采用双光栅单程压缩器,如图 1(a)所示,光线只在光栅对中单次通过,光线入射角偏离所引起的剩余色散会大大增加,输出脉冲脉宽展宽比如图 4(d)所示,此时脉宽展宽率小于 10% 时的入射角偏离值范围为:条件 I 时为  $-6.25 \sim +6.25$   $\mu$ rad,条件 II 时为  $-2.63 \sim +2.63$   $\mu$ rad。可见双光栅单程压缩器对光束指向性的敏感程度远高于双光栅双程压缩器。

### 3.2 压缩器中折返镜偏转对输出激光脉冲的影响

在压缩器工作过程中,双程折返镜 M 的姿态变化(如转动微小角度)也会引起压缩器色散量的改变,从而影响输出脉冲。折返镜发生偏转后,压缩器中的光路图如图 5 所示,光线从光栅  $G_2$  上 A 点入射,衍射后入射到光栅  $G_1$  上 B 点,经反射镜 M 反射后又入射到光栅  $G_1$  上 C 点,其中线段 AN 的长度代表光栅  $G_1$ 、 $G_2$  间的垂直距离  $G$ , $\gamma$  为入射角, $\beta$  为折返镜偏转角。

通过光线追迹可知,光线第二次进入光栅对的入射角  $\gamma' = \gamma - 2\beta$ ,分别取  $\beta$  为 5, 10, 15  $\mu$ rad 进行数值模

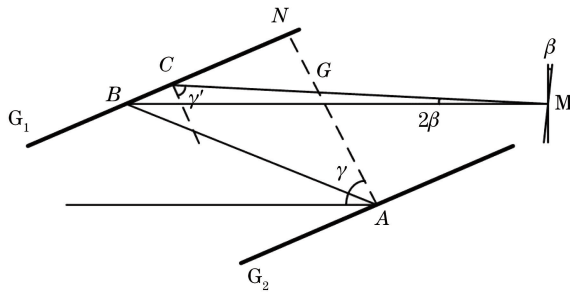


图 5 反射镜偏转时压缩器的光路图

Fig. 5 Ray-tracing of the grating pair compressor with mirror declination

拟, 得到的输出脉冲波形及脉宽展宽比如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 即使折返镜转动微小角度即几微弧度( $\mu\text{rad}$ )时, 输出脉冲都会受到一定的影响, 条件 II 下输出脉冲对折返镜偏转角的敏感程度明显高于条件 I, 当输出脉冲脉宽展宽比小于 10% 时, 折返镜偏转角的容许范围为: 条件 I 时为  $-7.89 \sim +7.89 \mu\text{rad}$ , 条件 II 时为  $-2.58 \sim +2.58 \mu\text{rad}$ , 可见系统对折返镜的调整精度要求比较高。为了提高输出激光脉冲的稳定性, 在实际操作中应该高精度控制折返镜的姿态, 如增加实时监测及反馈控制手段。

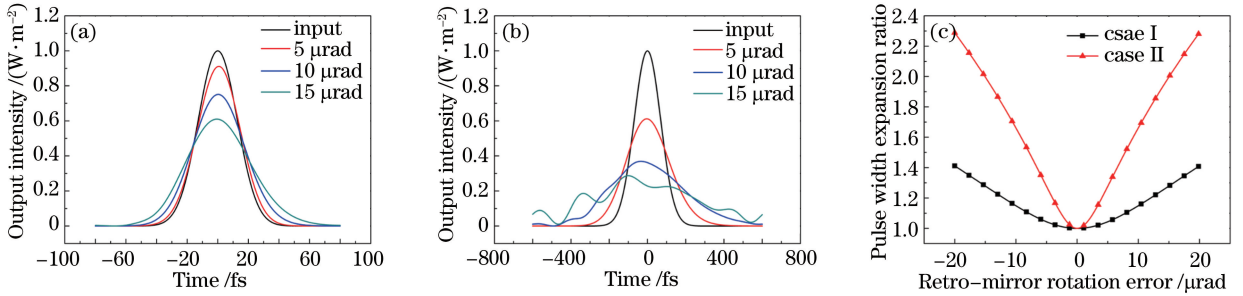


图 6 不同条件下折返镜偏转角  $\beta$  对输出脉宽的影响。(a) 条件 I 下的输出脉冲时间波形; (b) 条件 II 下的输出脉冲时间波形; (c) 输出脉冲脉宽展宽比

Fig. 6 Effect of retro-mirror rotation angle  $\beta$  on the output pulse width under different conditions. (a) Output pulse temporal shape in case I; (b) output pulse temporal shape in case II; (c) output pulse width expansion ratio

### 3.3 光栅对平移误差对输出激光脉冲的影响

光栅对的间距变化也可能影响输出激光脉冲的时间特性, 图 7 所示为光栅对平移误差分别为 20, 50, 100  $\mu\text{m}$  时的输出脉冲时间波形和脉宽展宽比。

从图 7 可以看出, 光栅对平移误差对压缩器输出脉冲的影响较为明显, 误差越大脉冲展宽越严重。在条件 I 和条件 II 两种情况下, 光栅对平移误差与光束指向性对输出脉冲脉宽的影响程度刚好相反, 当光栅对平移误差

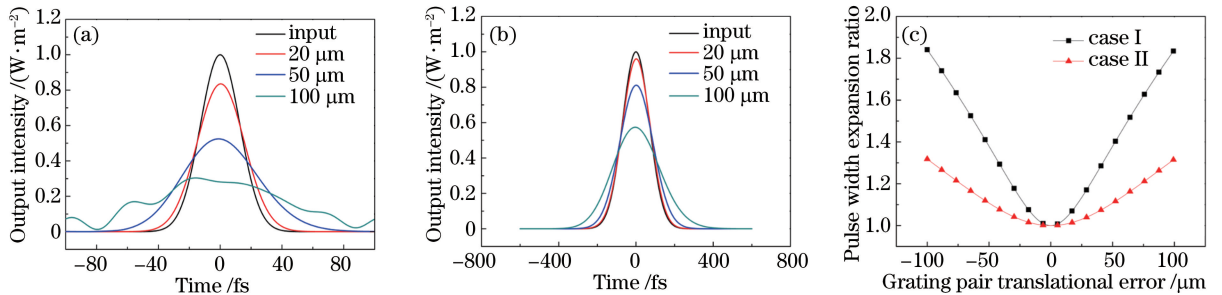


图 7 不同条件下光栅对平移误差对输出脉宽的影响。

(a) 条件 I 下的输出脉冲时间波形; (b) 条件 II 下的输出脉冲时间波形; (c) 输出脉冲脉宽展宽比

Fig. 7 Effect of grating pair translational error on the output pulse width under different conditions.

(a) Output pulse temporal shape in case I; (b) output pulse shape in case II; (c) output pulse width expansion ratio

在 100  $\mu\text{m}$  左右时,条件I下的输出脉冲形状已遭到严重破坏,条件II下的输出脉冲仍基本保持原状,只是脉宽被展宽,即条件I下输出脉冲对光栅对平移误差更为敏感。仍以输出脉冲的脉宽展宽率小于 10% 为标准,两种条件下的光栅对平移误差量的范围为:条件I时为  $-20.7 \sim +20.7 \mu\text{m}$ ,条件II时为  $-47.7 \sim +47.7 \mu\text{m}$ 。

### 3.4 不同线密度的光栅压缩器误差容限

下面考察不同线密度光栅压缩器的误差容限,将以上分析中所采用的刻线密度为 1740 lp/mm 的光栅换成刻线密度为 1480 lp/mm 的光栅,调整系统中的其他参数如光束入射角和光栅对间距,使整个系统提供的啁啾量与原系统相同,使用 1480 lp/mm 光栅时分别采用两组参数①、②和③、④,调整过程中入射角尽量选取在利特罗(Littrow)角附近,以保证较高的光栅衍射效率。参数①、③的入射角略大于 Littrow 角,参数②、④的入射角略小于 Littrow 角,但与 Littrow 角的偏离值均控制在  $\pm 10^\circ$  以内。系统的详细参数如表 2 所示。此时光束指向性、反射镜转动以及光栅对平移误差引起的输出脉冲脉宽展宽比曲线分别如图 8~10 所示。

表 2 系统参数  
Table 2 System parameters

	Central wavelength /nm	Spectral width /nm	Littrow angle /( $^\circ$ )	Incident angle /( $^\circ$ )	Separation of grating pair /m	Grating groove density /(lp/mm)	
Case I	800	31.39	44.1	53	1.61	1740	
			36.3	45	2.90	1480	①
Case II	1053	10	66.4	70	4.02	1740	
			51.2	55	18.49	1480	③
				42	5.79	1480	④

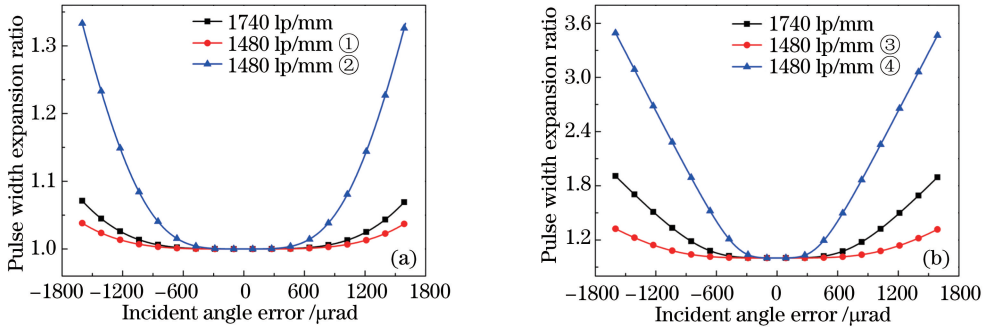


图 8 不同光栅刻线密度时光束指向性对输出脉宽的影响。(a) 条件 I ; (b) 条件 II

Fig. 8 Effect of beam pointing variance on the output pulse width for different grating groove densities.

(a) Case I ; (b) case II

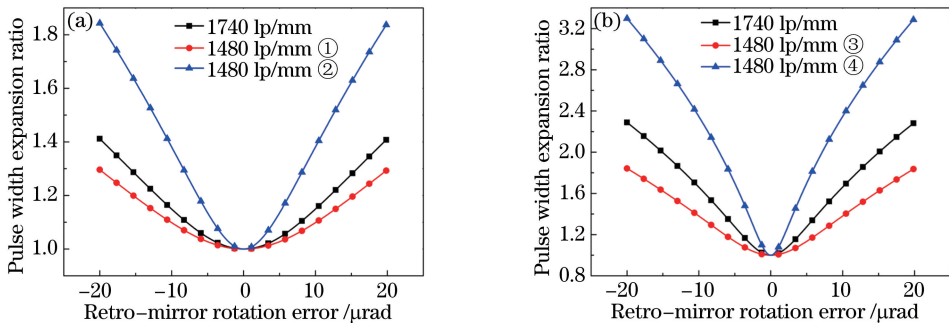


图 9 不同光栅刻线密度时反射镜转动角对输出脉宽的影响。(a) 条件 I ; (b) 条件 II

Fig. 9 Effect of retro-mirror rotation angle on the output pulse width for different grating groove densities.

(a) Case I ; (b) case II

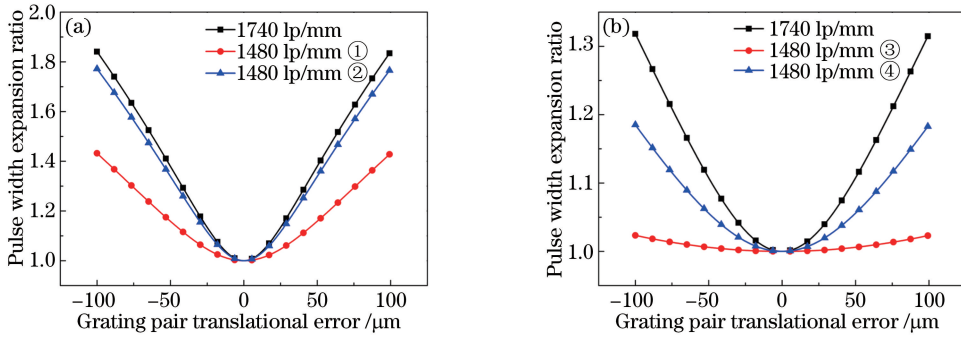


图 10 不同光栅刻线密度时光栅对平移误差对输出脉宽的影响。(a) 条件 I ; (b) 条件 II

Fig. 10 Effect of grating pair translational error on the output pulse width for different grating groove densities.

(a) Case I ; (b) case II

从图 8~10 可以看出,采用不同刻线密度光栅的压缩器在提供相同啾啾量时,光束指向性、反射镜转动角以及光栅对平移误差对输出脉冲的脉宽均有不同程度的影响。同样是采用 1480 lp/mm 的光栅提供相同的啾啾量,入射角和光栅间距参数不同,压缩器的稳定性也不同,并不是通常所认为的光栅刻线密度越低压缩器稳定性越高。

## 4 结 论

对 CPA 系统中平行光栅对压缩器的输出脉冲时间稳定性进行了详细分析。讨论了不同条件下,激光束指向性、压缩器中折返镜偏转角和光栅对平移误差对压缩器输出脉冲的影响,以及在不同光栅刻线密度下输出脉冲对以上因素的敏感程度,并给出了不同条件下不同影响因素的误差容许范围。分析结果表明:入射光束指向性对双光栅单程压缩器输出脉冲的影响程度远高于四光栅压缩器(或等效四光栅压缩器,如折返双程双光栅压缩器);双程压缩器中的折返镜姿态变化对输出脉冲的影响很大,几微弧度的角度偏差就能引起输出脉冲的明显变化;平行光栅对压缩器的时间稳定性与压缩器的具体参数紧密相关,对于不同的设计参数,压缩器稳定性会有明显差异,并非光栅刻线密度越低压缩器稳定性越高。

## 参 考 文 献

- 1 Treacy E B. Optical pulse compression with diffraction gratings[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1969, 5(9): 454-458.
- 2 Martinez O E. 3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: Application to fiber compensation in 1.3~1.6 μm region[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1): 59-64.
- 3 Liu Wenbing, Feng Guoying, Zhu Qihua. Study of super-Gaussian beam through grating pair compression in the case of finite beam size[J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 261-265.  
刘文兵, 冯国英, 朱启华. 有限束宽下超高斯光束经光栅对压缩的研究[J]. 激光技术, 2005, 29(3): 261-265.
- 4 Liu Wenbing, Feng Guoying, Zhu Qihua, et al.. Study of dispersion on grating-pair compressor in the case of unparallel grooves[J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 334-336.  
刘文兵, 冯国英, 朱启华, 等. 光栅对压缩器在刻线不平行时的色散研究[J]. 激光技术, 2006, 30(3): 334-336.
- 5 Su Juan. Study on the dispersion in OPCPA system[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.  
苏娟. OPCPA 系统中色散的研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.
- 6 Fiorini C, Sauteret C, Rouyer C, et al.. Temporal aberrations due to misalignment of a stretcher-compressor system and compensation[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(7): 1662-1670.
- 7 Wang Yang, Zhu Baoqiang, Ouyang Xiaoping, et al.. Research on diagnostics for synchronization of multi-ultrashort pulses[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0902004.  
王杨, 朱宝强, 欧阳小平, 等. 多束超短脉冲束间同步诊断技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902004.
- 8 Sun Zhenhong, Chai Lu, Xie Xudong, et al.. Study on adjusting accuracy in the femtosecond chirp-pulse amplification system[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(6): 749-753.  
孙振红, 柴路, 谢旭东, 等. 飞秒啾啾脉冲放大系统调节精度的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 749-753.

- 9 Liu Lanqin, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng, *et al.*. Dispersions analysis of stretcher-compressor in chirped pulse amplification system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(11): 1857-1862.  
刘兰琴,彭翰生,魏晓峰,等. 啁啾脉冲放大系统展宽压缩器各阶色散分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(11): 1857-1862.
- 10 Zhang Z G, Yagi T, Arisawa T. Ray-tracing model for stretcher dispersion calculation[J]. Appl Opt, 1997, 36(15): 3393-3399.
- 11 Chuang Y H, Zheng L, Meyerhofer D D. Propagation of light pulses in a chirped-pulse-amplification laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(1): 270-280.
- 12 Su Juan, Liu Zhonghua, Wei Tao, *et al.*. Dispersion analysis of pulse compression system based on prism-grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 060501.  
苏娟,刘忠华,魏涛,等. 基于棱镜-光栅组合棱栅的脉冲压缩系统色散研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 060501.
- 13 Guo Xiaoyang, Leng Yuxin, Xu Yi, *et al.*. Matric analysis and experimental design of Offner stretcher[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0714001.  
郭晓杨,冷雨欣,许毅,等. Offner展宽器的矩阵光学分析与实验设计[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0714001.
- 14 Wang Hongying, Liu Hongjun, Li Xiaoli, *et al.*. Dispersion control in broadband optical parametric chirped-pulse amplification laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1338-1343.  
王红英,刘红军,李小莉,等. 宽带光学参变啁啾脉冲放大系统的色散控制[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1338-1343.