

# 间距和角度失调对零色散飞秒整形系统的影响\*

聂永名, 李修建, 祁俊力, 杨建坤, 廖家丽, 胡文华, 罗世尚  
(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**为了研究间距和角度失调对零色散飞秒整形时域特性的影响,理论上分析了系统的分辨率与各光学元件间距角度失调的关系,详细讨论了间距角度失调对系统效率和输出脉冲时间特性的影响。实验结果表明,透镜位置失调会导致脉冲展宽,且两个透镜位置失调对脉宽展宽的规律对称,光栅位置失调也会导致脉冲展宽。此外,器件角度失调对系统效率的影响大于位置失调。使用600线的光栅、30cm焦距的透镜,当间距失调小于0.5 cm,角度失调小于 $9^\circ$ 时可以满足系统效率变化和脉冲展宽都小于5%。该结果对更好地利用零色散整形系统具有重要指导意义。

**关键词:**超快光学;脉冲整形;时空变换;零色散系统

**中图分类号:** O437      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-2486(2012)02-0155-04

## Effect of mismatched spacing and angle on zero-dispersion femtosecond pulse shaping system

NIE Yongming, LI Xiuqian, QI Junli, YANG Jiankun, LIAO Jiali, HU Wenhua, LUO Shishang

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to study the effect of mismatched spacing and angle of zero-dispersion femtosecond pulse shaping system on the temporal properties of the output femtosecond pulses, the relation between the resolution and the mismatched spacing of the system was analyzed in theory. And then the effect of mismatched spacing and angle on the system efficiency and the width of the output pulses were discussed. The experimental results indicated that lens misalignment can broaden the pulse, and the influences of the first and the second gratings are symmetrical. Moreover, the influence on system efficiency of angle misalignment was more serious than spacing misalignment. If 600 lines per millimeter grating and lens of 30 centimeter focal length were used, when the angle misalignment was smaller than  $9^\circ$  and spacing misalignment was shorter than 0.5 centimeters, the changing of system efficiency and pulse width were both smaller than 5%. All the results above are helpful to an in-depth study on the zero-dispersion pulse shaping system.

**Key words:** ultra-fast optic; pulse shaping; time-spacing transforms; zero-dispersion system

飞秒激光技术创始于20世纪80年代,在90年代得到成熟发展并臻完善,为研究光与物质相互作用过程中的各种超快现象,特别是发生在几个皮秒及飞秒时域的各种超快动力学过程提供了强大的工具,飞秒激光技术的应用也越来越广泛。但是,有些应用领域不仅需要持续时间短、峰值功率大的飞秒脉冲,还对脉冲时域波形有一定要求,时域波形是飞秒脉冲随时间变化的形状。飞秒时域脉冲整形已成为超快激光研究领域的重要课题。目前,国外在脉冲时域整形技术方面已取得了巨大进步<sup>[1-4]</sup>,使得人们可以根据需要产生复杂的脉冲时域波形,已成功地应用于脉冲压缩、生物光学成像、飞秒化学等领域<sup>[5-6]</sup>。飞秒是一个极短的时间过程,目前电子设备还没有达到

这么快的响应速率,因此飞秒激光脉冲的整形主要通过间接的方法实现。时空变换脉冲整形技术就是一种简便适用、行之有效且是目前唯一比较成熟的时域整形方法。它是通过时空变换将飞秒激光脉冲的时域信息变换到频域,经过频域信息处理再返回到时域,从而实现飞秒激光脉冲时域整形,这一整形装置的基本结构为4-f系统,最初在1983年由Froehly等设计,随后被广泛应用在时空变换整形领域<sup>[7-9]</sup>。国内对这一系统的器件距离失调的分析已有很多成果<sup>[10-12]</sup>。但到目前为止,该系统角度失调对系统的频率分辨率、效率以及脉冲时域特性的影响以及距离失调对脉冲时域宽度的影响的详细分析还未见报道。本文从理论上推导了系统的频率分辨率,并通过实验获

\* 收稿日期:2011-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61070040,61107005,61108089)

作者简介:聂永名(1982—),男,山东临沂人,博士研究生,Email:yimonie@163.com;

李修建(通信作者),男,副教授,硕士生导师,Email:xjli@nudt.edu.cn

得了零色散 4-f 系统的效率与各光学元件间距角度失调的变化规律。同时也得到了脉冲宽度变化与各光学元件间距角度失调的关系。其理论计算与实验获得的规律对更好地设计零色散 4-f 系统,进一步提高系统分辨率,精确控制飞秒脉冲振幅与相位提供了理论数据支持。

## 1 零色散飞秒整形 4-f 系统的基本原理

频域和时域互为傅立叶变换是飞秒脉冲整形的基本原理,通过频域滤波可实现对飞秒脉冲时域波形的任意整形。图 1 所示是零色散脉冲整形的基本装置,它是由一对衍射光栅和一对透镜组成的 4-f 系统(或者为折叠 4-f 系统)。

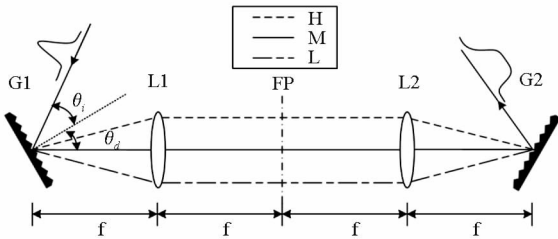


图 1 零色散飞秒脉冲整形 4-f 系统

(G1, G2 为完全相同的光栅对,透镜 L1, L2 焦距相同,FP 代表傅立叶平面。H、M、L 分别代表脉冲高中低频分量)

Fig. 1 Zero-dispersion ultra-fast pulse shaping 4-f system (G1, G2 presents two gratings with same parameters. L1, L2 are two lenses with same focal length. FP presents Fourier plane. H and M and L present high medium and low frequent components of the laser pulse)

超短脉冲中的各光频成分被第一个光栅 G1 衍射实现色散分离,在第一个透镜 L1 的焦平面聚焦成离散的具有有限大小的光斑,在一维方向上实现空间分离。透镜 L2 和光栅 G2 把分离的各频率光成分重新整合成一束光。系统输出脉冲的时域波形由傅立叶平面 FP 上放置的滤波器决定。目前,适当的设计滤波器控制飞秒脉冲的频谱相位、振幅以及偏振特性,不仅可以获得所需要的时域波形<sup>[13-14]</sup>,还可以改变飞秒脉冲光束的横向空间特性<sup>[15]</sup>。

飞秒脉冲在数学上可以表示为一系列准单色波的相干叠加,其时频域傅立叶变换如下<sup>[15]</sup>:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (1)$$

$$E(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon(t) e^{i\omega t} dt \quad (2)$$

在时域中,线性滤波系统的输出  $\varepsilon_{out}(t)$  等于输入  $\varepsilon_{in}(t)$  与系统脉冲响应函数的卷积,公式

如下:

$$\varepsilon_{out}(t) = R(t) \otimes \varepsilon_{in}(t) \quad (3)$$

其中,  $R(t)$  为系统的脉冲响应函数。对(3)式进行傅立叶变换可得:

$$E_{out}(\omega) = H(\omega) E_{in}(\omega) \quad (4)$$

其中,  $E_{out}(\omega)$ 、 $E_{in}(\omega)$ 、 $H(\omega)$  分别是系统输出  $\varepsilon_{out}(t)$ 、输入  $\varepsilon_{in}(t)$  以及脉冲响应函数  $R(t)$  的傅立叶变换。如果在系统傅立叶频谱面上不放置任何空间光调制器,即函数  $H(\omega) = 1$ ,此时输出与输入完全相同,这就是系统被称为零色散整形系统的原因。因此,依据傅里叶变换关系,根据要求设计滤波器的频率响应,可以产生需要的波形。

假定输入飞秒脉冲在时域和空域上均为高斯分布,中心频率为  $\omega_0$ ,对应中心波长为  $\lambda_0$ 。脉冲以  $\theta_i$  的入射角入射在光栅 G1 上,衍射角为  $\theta_d$ ,如图 1 所示。在 FP 平面上,各频谱分量会聚为有限大小的光斑,设入射光束的光斑直径为  $\Delta x_{in}$ ,中心频率  $\omega_0$  分量在 FP 平面上的光斑大小  $\Delta x_0$  可以由下式得到<sup>[16]</sup>:

$$\Delta x_0 = 2 \ln 2 \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_d} \frac{f \lambda_0}{\pi \Delta x_{in}} \quad (5)$$

在线性滤波情况下,该系统的频率分辨特性可由下式计算得到:

$$\delta \omega = \frac{2 \pi c d \Delta x_0 \cos \theta_d}{\lambda_0^2 f} \quad (6)$$

式中  $d$  表示光栅周期。

## 2 间距角度失调分析与实验结果

实验过程中所使用的飞秒激光器为 Mai Tai HP 钛宝石飞秒激光器,工作波长 690 ~ 1040nm,脉冲宽度约 100fs,功率约 2W,重复频率 80MHz。实验工作波长 720nm,脉冲宽度 105fs,光栅为 600 线的反射式闪耀光栅,傅立叶透镜焦距为 30cm。

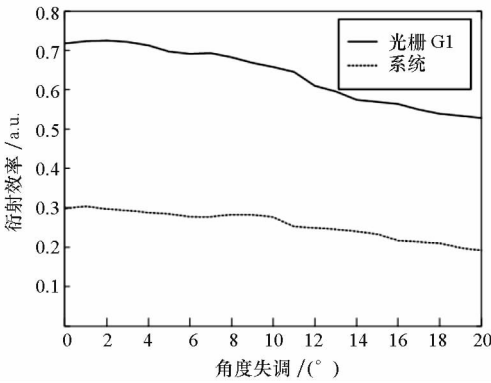
输入超短脉冲中的不同频率成分被第一个衍射光栅衍射到不同的角度,相同衍射角度的光线在第一个透镜的后焦面上聚焦成有限尺寸的光斑,从式(5)、(6)可知,中心频率  $\omega_0$  分量在傅立叶平面上的有限光斑大小  $\Delta x_0$  不仅与中心波长为  $\lambda_0$ 、透镜焦距以及入射光束光斑大小  $\Delta x_{in}$  有关,还与入射角与衍射角的余弦之比有关。此外,因为焦平面上的光斑尺寸最小,距离失调后会光斑尺寸变大。由此可知零色散 4-f 系统光栅的间距角度失调会影响系统的频率分辨率。

光栅的衍射的能量分布具有以下形式:

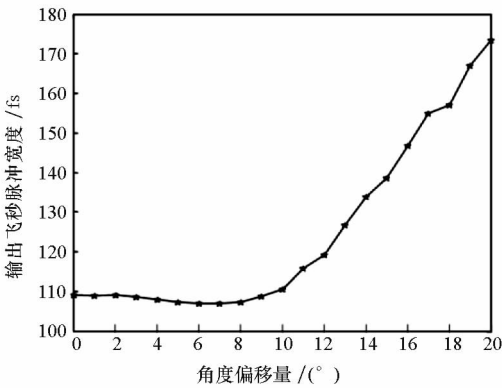
$$I = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2} \frac{\sin^2 v}{v^2} \quad (7)$$

其中,  $u$  和  $v$  均是和光栅常数  $d$ 、入射角  $\theta_i$  以及衍射角  $\theta_d$  有关的量。从式(7)可知, 零色散 4-f 系统的能量效率会受到光栅的角度失调的影响。

光束垂直入射到光栅 G1, 同时 G2 与 G1 对称放置, 如图 1 所示, 此时 G1、G2 的方位角均假定为  $0^\circ$ 。图 2(a) 为实验得到 G1 的方位角逐渐变大时, G1 的衍射效率与系统的衍射效率变化图。从图 2(a) 可以看出, 随着角度变大, 衍射效率的整体趋势变小。图 2(b) 为实验得到 G2 角度失调与输出脉冲宽度的关系, 可得在角度失调小于  $9^\circ$  时, 脉冲宽度变化较小; 大于  $9^\circ$  时, 角度失调对脉冲宽度影响较大。



(a) 光栅 G1 角度失调与衍射效率的关系图  
(a) Relations between diffraction efficiency and mismatched angle of G1

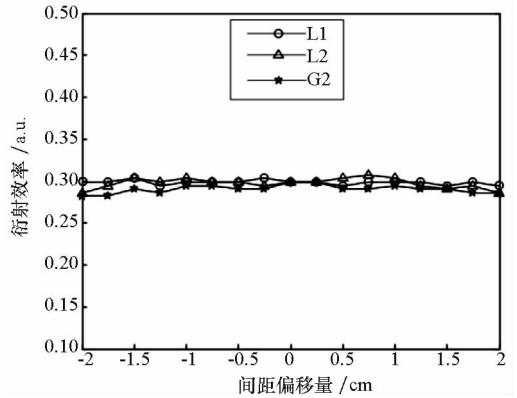


(b) 光栅 G2 角度失调与输出脉冲宽度的关系图  
(b) Relations between pulse width and mismatched angle of G2

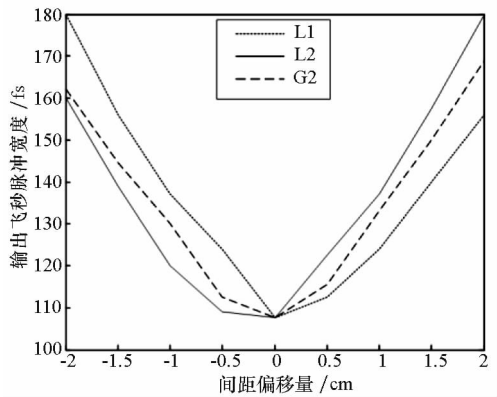
图 2 光栅角度失调与衍射效率和脉冲宽度的关系图  
Fig. 2 Effects of mismatched angle of gratings on diffraction efficiency and pulse width

此外, 各元器件之间的距离失调导致系统不再是严格意义上的 4-f 系统, 其零色散的特性也必然不再满足。这种情况下系统衍射效率与输出飞秒脉冲宽度也就会发生相应的变化。图 3(a) 为实验得到的透镜 L1、L2 以及光栅 G2 的位置在系统轴向失调时系统效率的变化。图 3(b) 反映

的是间距失调对输出脉冲宽度的影响, 图 3 中横坐标负值表示前移, 正值表示后移。



(a) 透镜及光栅 G2 间距失调对效率的影响  
(a) Relations between diffraction efficiency and mismatched spacing of L1 L2 and G2



(b) 透镜及光栅 G2 间距失调对脉冲宽度的影响  
(b) Relations between pulse width and mismatched spacing of L1 L2 and G2.

图 3 透镜及光栅 G2 间距失调与效率及脉冲宽度的关系图

Fig. 3 Effects of mismatched spacing of L1 L2 and G2 on diffraction efficiency and pulse width

从图 3(a) 可得, 各光学元件在 2cm 的间距失调下系统效率变化均不大, 衍射效率对距离失调并不敏感。从图 3(b) 可得, 间距失调对脉冲宽度影响较大。透镜 L1 与 L2 的间距失调对脉冲宽度的影响具有对称特性, 透镜 L1 前移(后移)与透镜 L2 后移(前移)对脉宽影响具有相同的变化规律。从图 3(b) 还可以看出, 透镜 L1 后移大于 0.5cm, 透镜 L2 前移大于 0.5cm 时, 对脉冲展宽影响较大。光栅 G2 间距失调大于 0.5cm 时, 对脉冲展宽影响也较大。

零色散 4-f 系统中各元器件角度失调以及器件间距失调会影响其频率分辨率、能量效率以及输出飞秒脉冲的时域宽度。由图 2、图 3 可以得到, 间距失调小于 0.5 cm、角度失调小于  $9^\circ$  时, 可以满足系统效率变化和脉冲展宽都小于 5%。

### 3 结束语

基于对零色散飞秒脉冲时域整形 4-f 系统的分析,得到了各光学元件间距角度失调对系统的分辨率、效率以及脉冲宽度的影响,并从实验上获得了系统效率和输出脉冲宽度与间距角度失调的变化规律。对于使用 600 线的反射式光栅以及焦距 30cm 的透镜系统,得到当间距失调小于 0.5 cm、角度失调小于 9°时,可以满足系统效率变化和脉冲展宽都小于 5%。实验结果对进一步研究 4-f 系统具有重要指导意义。

### 参考文献 (References)

- [1] Cundiff S T, Weiner A M. Optical arbitrary waveform generation[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(11):760-766.
- [2] Will I, Klemz G. Generation of flat-top picosecond pulses by coherent pulse stacking in a multicrystal birefringent filter[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(19):14922-14937.
- [3] Slavik R, Park Y, Azaa J. Long-period fiber-grating-based filter for generation of picosecond and subpicosecond transform-limited flat-top pulses [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, 20(10):806-808.
- [4] 俞本立, 毛红敏. 光学超短脉冲的研究进展[J]. *安徽大学学报*, 2005, 29(2):45-49.  
YU Benli, MAO Hongmin. A review of optical ultrashort pulse shaping[J]. *Journal of Anhui University (Natural Sciences)*, 2005, 29(2):45-49. (in Chinese)
- [5] Yelin D, Meshulach D, Silberberg Y. Adaptive femtosecond pulse compression [J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(23):1793-1795.
- [6] Rabitz H, Vivie-Riedle R, Motzkus M, et al. Chemistry-whither the future of controlling quantum phenomena? [J]. *Science*, 2000, 288(5467):824-828.
- [7] Weiner A M, Heritage J P, Kirschner E M. High-resolution femtosecond pulse shaping[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, 5(8):1563-1571.
- [8] Jiang Z, Leaird D E, Weiner A M. Line-by-line pulse shaping control for optical arbitrary waveform generation [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(25):10431-10439.
- [9] Vaughan J C, Feurer T, Nelson K A. Automated two-dimensional femtosecond pulse shaping[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, 19(10):2489-2495.
- [10] 邹华, 朱卫华, 王国栋. 4f 结构间距失调对达曼类滤波器输出脉冲特性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(7):1121-1124.  
ZOU Hua, ZHU Weihua, WANG Guodong. Effect of mismatched spacing for 4f configure on output pulses of Damman-type filters [J]. *High power laser and particle beams*, 2007, 19(7):1121-1124. (in Chinese)
- [11] 陈瑜婷, 张诗按, 孙真荣. 4f 结构脉冲整形器失调对光场空间分布的影响[J]. *量子光子学报*, 2004, 10(2):73-76.  
CHEN Yuting, ZHANG Shian, SUN Zhenrong. Spatial aberration of the output pulse from a misalignment of 4f configure optical pulse shaping system [J]. *Acta sinica quantum optica*, 2004, 10(2):73-76. (in Chinese)
- [12] 邹华, 朱卫华, 吴坚等. 达曼类滤波器的飞秒脉冲整形技术[J]. *激光技术*, 2009, 33(4):374-377.  
ZOU Hua, ZHU Weihua, WU Jian, et al. Femtosecond pulse shaping for Damman-type filters [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(4):374-377. (in Chinese)
- [13] Weiner A M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, 71(5):1929-1960.
- [14] Brixner T, Gerber G. Femtosecond polarization pulse shaping [J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26(8):557-559.
- [15] Feurer T, Vaughan J C, Koehl R M, et al. Multidimensional control of femtosecond pulses by use of a programmable liquid-crystal matrix[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(8):652-654.
- [16] Willits J T, Weiner A M, Cundiff S T. Theory of rapid-update line-by-line pulse shaping[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(1):315-327.