

文章编号: 0258-7025(2006)07-0922-06

啁啾脉冲通过失调拼接光栅压缩池后的远场分析

左言磊^{1,2}, 魏晓峰², 朱启华², 刘红婕², 应纯同¹

(¹ 清华大学工程物理系, 北京 100084; ² 中国工程物理研究院激光聚变中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 建立一个能分析拼接光栅的拼接误差效应的数学模型。利用傅里叶光学方法, 分析横截面为圆的啁啾高斯光束通过失调的拼接光栅对压缩池(每个压缩光栅都由四个子光栅拼接而成)以及理想透镜的物理过程, 得到焦平面上光场的积分表达式(对于光束口径)。利用该模型通过数值模拟详细分析了各种误差对于焦斑强度分布的影响。结果表明, 在要求远场焦斑的施特雷尔比大于 0.9 的条件下系统的各种拼接误差需要满足: 横向平移型误差 $|\Delta x - nd| < d/8$, 纵向平移型误差 $\Delta z < 0.1 \mu\text{m}$, 刻线宽度误差 $\Delta d < 2.1 \times 10^{-7} d$, 旋转误差 $\Delta \xi < 0.18 \mu\text{rad}$ (其中 n 为正整数, d 为光栅的刻线宽度)。

关键词 衍射光学; 误差容限; 傅里叶光学; 拼接光栅对压缩池; 相干叠加
中图分类号 O 436 **文献标识码** A

Far Field Analysis after Chirped Pulse Passing through a Misalignment Tiled-Grating Compressor

ZUO Yan-lei^{1,2}, WEI Xiao-feng², ZHU Qi-hua², LIU Hong-jie², YING Chun-tong¹

¹ Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract A model is proposed for the analysis of possible errors in a tiled-grating pair compressor. By using the method of Fourier optics, the process of a chirped pulse's passing through a misalignment tiled-grating pair compressor and an ideal lens is studied and the integral expression of light field on focal plane is obtained. The effects of possible errors on focal spot intensity distribution are analyzed in detail by the numerical simulation. The results indicate that possible errors must satisfy $|\Delta x - nd| < d/8$ (n is positive integral, d is groove-width of grating) for the transverse shift error, $\Delta z < 0.1 \mu\text{m}$ for the longitudinal shift error, $\Delta d < 2.1 \times 10^{-7} d$ for the groove-width error and $\Delta \xi < 0.18 \mu\text{rad}$ for the rotation error separately in the case of Strehl ratio higher than 0.9 in the far field.

Key words diffraction optics; error tolerance; Fourier optics; tiled-grating pair compressor; coherent addition

1 引言

近年来由于啁啾脉冲放大技术的应用^[1,2], 使得获得更高能量、更高强度的超短脉冲成为可能。这给很多领域的研究工作提供了有力的工具: 如光与物质相互作用^[3]、惯性约束聚变中的快点火实

验^[4]以及对超快现象^[5]的研究等。但是在应用啁啾脉冲放大(CPA)技术产生超强、超短激光脉冲的过程中脉冲压缩光栅的损伤阈值和口径成为限制输出脉冲强度和能量的主要瓶颈^[6]。目前最有潜力的光栅是镀多层电介质(MLD)膜的全息光栅^[7,8], 但是

收稿日期: 2005-07-01; 收到修改稿日期: 2005-11-11

基金项目: 国家 863 计划(2005AA845050)资助项目。

作者简介: 左言磊(1979—), 男, 山东青岛人, 清华大学工程物理系博士研究生, 主要从事光栅拼接及相干合成方面的研究。E-mail: zuoyanlei@tsinghua.org.cn

导师简介: 魏晓峰(1960—), 男, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心研究员, 主要从事强激光技术的研究。E-mail: zxm7311@vip.sina.com

多层电介质反射光栅的制造非常困难,因此很难加工到大尺寸($<1\text{ m}$),而光栅拼接技术的出现正好可以弥补这一不足。对光栅的拼接质量的检验是通过监测压缩脉冲的远场来实现的,因此,研究经过拼接光栅压缩池后的脉冲的焦斑特性是有意义的。

在关于拼接光栅的研究中^[9,10],文献[9]并没有考虑到通过不同子光栅的光束在远场的相干叠加。而文献[10]只是考虑了不同子光束间存在固定相位延迟的情况。本文基于傅里叶光学方法建立了基于远场的光栅拼接的误差分析模型,并在此基础上讨论了不同类型的拼接误差对压缩脉冲的焦斑特性的影响,估计了在满足远场焦斑的施特雷尔比大于0.9的条件下的系统的几种误差的容限。

2 理论模型

图 1 为光栅拼接研究的原理图。横截面为圆的啁啾脉冲光束入射到拼接光栅压缩池中,每个压缩光栅都是由四个方形子光栅(图中 A, B, C, D)拼接而成。输出光束经理想透镜进行聚焦。

圆光束经过拼接光栅对压缩池的过程中,被不同的子光栅衍射的光束经历不同的相位延迟。因此这一过程等效为四束横截面为1/4圆形的光束分别

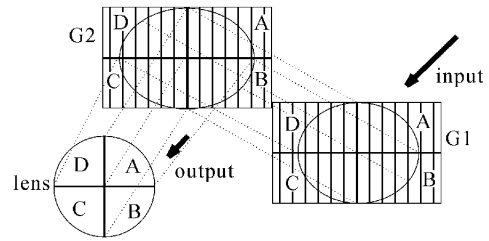


图 1 光栅拼接示意图

Fig.1 Sketch of the tiled-grating experiment

经过一个子光栅对压缩池 $G1n$ 和 $G2n(n = A, B, C, D)$,而后经过同一个透镜聚焦后在远场相干叠加。因此理论部分分为:拼接光栅的误差模型,啁啾脉冲的压缩,1/4 圆光束的聚焦,短脉冲在远场的相干叠加四个部分。

2.1 光栅拼接的误差模型

可能存在的光栅失调的种类如图 2 所示。包括横向平移型误差 dx (shift),纵向平移型误差 dz (piston),绕 x 轴的旋转 $d\theta_x$ (tip),绕 y 轴的旋转 $d\theta_y$ (tilt),绕 z 轴的相对旋转 $d\theta_z$ (twist)。另外还有光栅的刻线宽度误差 $\Delta d = d - d'$ (其中 d' 为失调子光栅的刻线宽度, d 为其他子光栅的刻线宽度)。至于沿 y 方向的偏移 dy ,由于沿着光栅刻线的方向,因此对脉冲几乎没有影响。

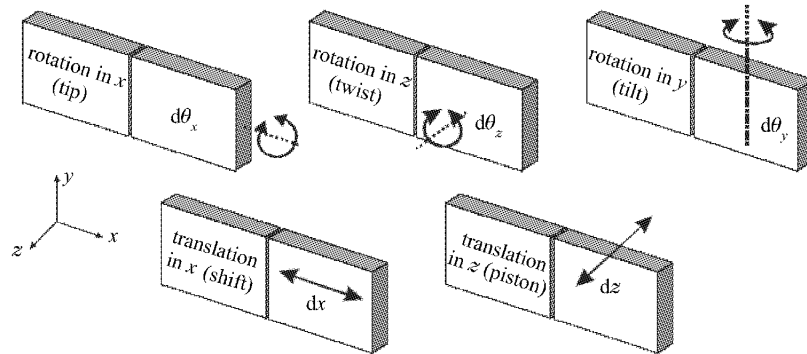


图 2 拼接光栅的误差种类示意图

Fig.2 Sketch of errors in a tiled grating

若拼接光栅不存在拼接误差(理想情况下),则脉冲通过压缩池的过程中经历一个依赖于频率的相位延迟 $\varphi(\omega)$ 后,将实现脉冲在时域上的理想压缩。为了描述不同类型的拼接失调对脉冲的影响,可以通过计算某频率的脉冲经过该失调光栅过程中经历的相位延迟 $\varphi'(\omega)$ 来描述。因此,求解 $\varphi'(\omega)$ 成为关键。下面,分别对几种具体的误差求解其相位延迟函数 $\varphi'(\omega)$ 。

2.1.1 横向平移型误差 dx

存在横向平移型误差时如图 3 所示, $G1, G2$ 为拼接光栅, $G1$ 为理想拼接, $G2$ 的两个子光栅之间存在间距 dx ,光栅 $G1$ 的入射角为 γ ,衍射角与入射角的夹角为 θ ,衍射序为 1 阶。根据文献[11],沿着 NMC 的脉冲在光栅对压缩池中经历的相位延迟为

$$\varphi(\omega) = \frac{\omega}{c} \cdot (1 + \cos\theta) \cdot G \sec(\gamma - \theta) - 2\pi G d^{-1} \tan(\gamma - \theta), \quad (1)$$

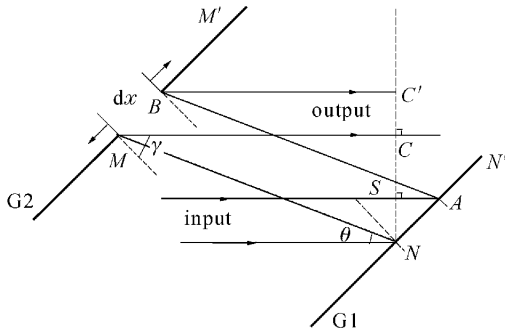


图 3 存在横向平移型误差时拼接光栅对压缩池的剖面图

Fig. 3 Section plane of the tiled-grating pair compressor in the case of transverse shift error

式中 G 为光栅对的垂直距离。

则过另一子光栅的脉冲经历的相位延迟为

$$\varphi'(\omega) = \varphi(\omega) - 2\pi \cdot \frac{dx}{d}. \quad (2)$$

2.1.2 纵向平移型误差 dz

存在纵向平移型误差时如图 4 所示,拼接光栅 G2 的一子光栅相对于理想位置(虚线)有 dz 的垂直方向的位移。理想情况下脉冲沿光路 ABC 的相位延迟为 $\varphi(\omega)$,则沿光路 $SA'B'C'$ 的相位延迟可以表示为

$$\varphi'(\omega) = \frac{\omega}{c} \cdot (1 + \cos\theta) \cdot G' \sec(\gamma - \theta) - 2\pi G' d^{-1} \tan(\gamma - \theta), \quad (3)$$

式中 $G' = G + dz$ 。

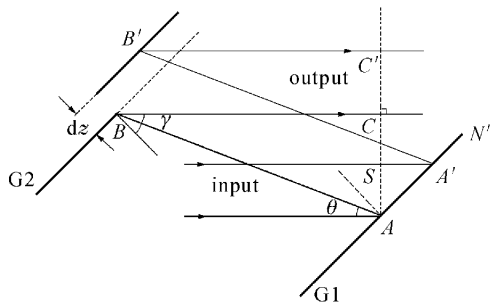


图 4 存在纵向平移型误差时拼接光栅对压缩池的剖面图

Fig. 4 Section plane of the tiled-grating pair compressor in the case of longitudinal shift error

2.1.3 刻线宽度误差 Δd

存在刻线宽度误差时如图 5 所示,拼接光栅 G1 中各个子光栅刻线宽度均为 d , 光栅刻线方向均垂直于纸平面。拼接光栅 G2 中某一子光栅的刻线宽

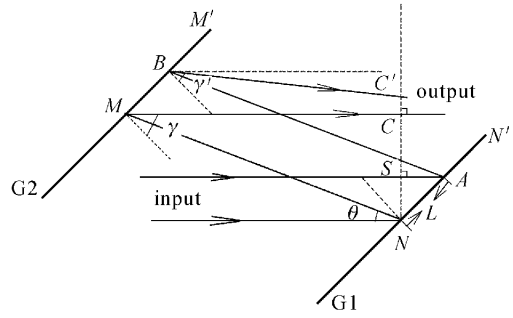


图 5 存在刻线宽度误差时拼接光栅对压缩池的剖面图

Fig. 5 Section plane of the tiled-grating pair compressor in the case of groove-width error

度为 d' (MM' 段),不妨设 $d' > d$ 。

失调光栅压缩池中沿 $SABC'$ 的光束的相位延迟为

$$\varphi'(\omega) = \varphi(\omega) - \frac{2\pi}{d} \cdot L + \frac{2\pi}{d'} \cdot L + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [G \cdot \sec(\gamma - \theta) \cos\theta - L \sin\gamma] \cdot [\sec(\gamma' - \gamma) - 1], \quad (4)$$

由式(4)可见,入射到光栅上不同位置(L 值不同)经历的相位延迟也不同,这将导致出射脉冲的横截面上有一个空间相位分布。

2.1.4 旋转误差 $\Delta\xi$

图 6 为某子光栅绕平行于光栅刻线方向的轴旋转 $\Delta\xi$ 的情况,光栅刻线方向垂直于纸平面,其余参数含义同上。

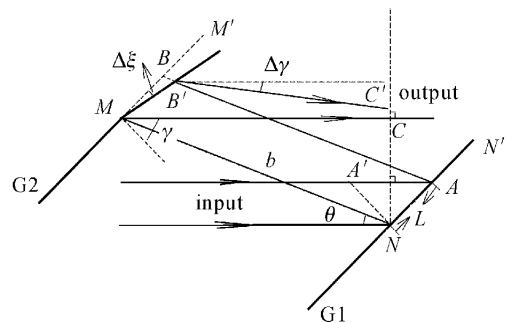


图 6 存在旋转误差时拼接光栅对压缩池的剖面图

Fig. 6 Section plane of the tiled-grating pair compressor in the case of rotation error

(1)式定义的 $\varphi(\omega)$ 是对应沿 NMC 的相位延迟,而沿 $A'AB'C'$ 的脉冲的相位延迟

$$\varphi'(\omega) = \varphi(\omega) - \frac{2\pi}{\lambda} L' [\sin(\gamma - \theta + \Delta\xi) +$$

$$\sin(\gamma + \Delta\xi)] + 2\pi \frac{L'}{d} + \frac{2\pi}{\lambda}(b - x - y)\cos\theta[\sec(\gamma' - \gamma) - 1], \quad (5)$$

其中 L' 为 MB' 的长度, γ' 为子光栅 MM' 上的衍射角; b 为 MN 的长度; x 为 BB' 的长度, y 为线段 AA' 的长度; 并且以上各量满足

$$L' = L \cdot \frac{\cos(\gamma - \theta)}{\cos(\gamma - \theta + \Delta\xi)}, \quad b = G \sec(\gamma - \theta), \\ x = L \cdot \frac{\sin\Delta\xi}{\cos(\Delta\xi + \gamma - \theta)}, \quad y = L \cdot \frac{\cos(\gamma - \theta)}{\cos\theta}, \quad (6)$$

显然, 在旋转失调情况下, 出射脉冲的横截面上也会有一个空间相位分布。

2.2 啁啾脉冲通过失调的拼接光栅压缩池

假设入射的啁啾脉冲的形式为

$$E(t) = A_0 \exp[-(1 - ib)t^2/T^2 - i\omega_0 t], \quad (7)$$

则其频率域表达式为

$$E(\omega) = T \sqrt{\frac{\pi}{1 - ib}} \times \exp\{- (\omega - \omega_0)^2 T^2 / [4(1 - ib)]\}, \quad (8)$$

假设其经过失调光栅对压缩池经历的相位延迟为

$$\phi'(\omega) = \phi'_0 + \phi'_1(\omega - \omega_0) + \phi'_2(\omega - \omega_0)^2 + \sum_n \phi'_n, \quad (9)$$

其中 $\phi'_0, \phi'_1, \phi'_2$ 为其低阶色散系数, ϕ'_n 为其高阶色散系数。根据文献[11], 如果高阶色散只是发生在压缩池中(前面的高阶色散已被补偿), 通常忽略其高阶色散项。则经过压缩池后的光场的频域为

$$E'(\omega) = E(\omega) \cdot \exp[i\phi'(\omega)], \quad (10)$$

简化可得其时域表达式为

$$E'(t) \propto [T_0^2 + i(bT_0^2 - 4\phi'_2)]^{-1/2} \cdot \exp(i\phi'_0 - i\omega_0 t) \cdot \exp\{- (t - \phi'_1)^2 / [T_0^2 + i(bT_0^2 - 4\phi'_2)]\}, \quad (11)$$

其中 $T_0^2 = T^2 / (1 + b^2)$ 。

根据文献[9], 理想压缩条件为 $bT_0^2 = 4\phi_2$ (ϕ_2 为理想压缩条件下的色散系数), 代入(11)式, 得啁啾脉冲通过失调光栅压缩池后的时域表达式为

$$E'(t) \propto [T_0^2 + i(4\phi_2 - 4\phi'_2)]^{-1/2} \cdot \exp(i\phi'_0 - i\omega_0 t) \cdot \exp\{- (t - \phi'_1)^2 / [T_0^2 + i(4\phi_2 - 4\phi'_2)]\}, \quad (12)$$

易得啁啾脉冲通过理想光栅对压缩池的时域表达式为

$$E(t) \propto \exp(i\phi_0 - i\omega_0 t) \cdot \exp[-(t - \phi_1)^2 / T_0^2]. \quad (13)$$

2.3 理想透镜对 1/4 圆光束的聚焦

假设透镜为理想透镜(忽略透镜的色差和球差), 如图 1 所示, 横截面为 1/4 圆的光束 $E_A(\omega)$ 入射到透镜面上的 A 区域(失调区域)。根据(12)式可得入射到透镜上的光束的频域表达式为

$$E'_A(\omega) = \exp(i\phi'_0) \cdot \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2 T_0^2}{4} + i(\phi'_2 - \phi_2)(\omega - \omega_0)^2\right] \exp[i\phi'_1(\omega - \omega_0)], \quad (14)$$

根据 2.1 节中的误差模型, 可以将 ϕ'_0 记为: $\phi'_0 = \phi_0 + \Delta\varphi(r, \theta)$ 。

对于平移型误差 dz , $\Delta\varphi(r, \theta)$ 为常数, 为使在远场实现同相叠加, 要求 $\Delta\varphi(r, \theta) < \pi$ (注: 实验中应可以实现 $dz = 0$, 因此不妨将相位范围限制在 π 范围内); 对于刻线宽度误差 Δd 和旋转失调 $\Delta\xi$, $\Delta\varphi(r, \theta) = lr \cos\theta$, 其中 r 为无量纲半径, l 为横截面上两点之间最大的相位差, 同样, 为实现同相叠加, 需要 $\Delta\varphi(r, \theta) < \pi$ 。

在 $\Delta\varphi(r, \theta) < \pi$ 设定的范围内, 经计算分析, 均满足: $\phi'_1 \approx \phi_1, \phi'_2 \approx \phi_2$, 因此, (14) 式化为

$$E'_A(\omega) = E_A(\omega) \exp[i\Delta\varphi(r, \theta)] \quad (E_A(\omega) \text{ 为理想情况下的光场}), \quad (15)$$

理想透镜对 $E'_A(\omega)$ 聚焦后的光场 $E'_1(\omega)$ 为

$$E'_1(\omega) = E_A(\omega) \cdot \int_0^1 r \cdot \int_0^{\pi/2} \exp[ib_0 r \cos(\theta - \varphi) + i\Delta\varphi(r, \theta)] d\theta dr, \quad (16)$$

设(16)式中 θ 的积解析式为 $\psi'_1(\varphi, v)$ (篇幅所限, 此处省略), (φ, v) 表征焦平面上某点的极坐标。(16)式化为

$$E'_1(\omega) = E_A(\omega) \cdot \int_0^1 r \cdot \psi'_1(\varphi, v) dr. \quad (17)$$

2.4 光束的相干叠加

假设四束 1/4 圆光束在远场完全相干叠加。由(17)式可见, 在本文考虑的误差容许范围内, 失调脉冲和理想压缩脉冲在远场具有相同的时间形式而且相互之间的时间延迟可以忽略不计, 因此它们在远场相干叠加的合成场为

$$E(\varphi, v) \propto \int_0^1 r \cdot [\psi'_1(\varphi, v) + \psi_2(\varphi, v) + \psi_3(\varphi, v) + \psi_4(\varphi, v)] dr = \int_0^1 r \cdot [\psi'_1(\varphi, v) + 2\pi J_0(m) - \psi_1(\varphi, v)] dr, \quad (18)$$

式中 $\psi_1(\varphi, v)$ 是理想压缩条件下通过透镜 A 区域聚焦的 1/4 圆光束对焦平面上某点 (φ, v) 的积分参数, 并且有

$$\psi_1(\varphi, v) = \frac{\pi}{2} J_0(m) + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2}{2k+1} \{-J_{4k+2}(m) \cdot \sin[(4k+2)\varphi] - iJ_{2k+1}(m) \{\cos[(2k+1)\varphi] - \cos[(2k+1)\varphi + k\pi + \frac{1}{2}\pi]\}\}.$$

3 数值模拟

进行数值模拟的参数为: 光束直径为 1 m, 中心波长为 1053 nm, 刻槽宽度为 $1200^{-1}/\text{mm}$, 入射角为 60° , 透镜焦距为 2 m.

根据平移型误差 Δx 的表达式, 为方便讨论, 将其记为: $\Delta x = nd + \Delta$, 其中 n 为整数, $\Delta < d$.

图 7 ~ 图 10 为不同情况下的远场等高线图(图中 S 表示施特雷尔比).

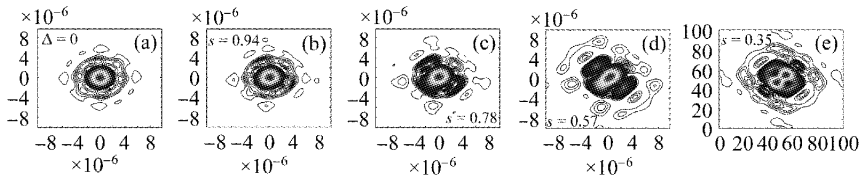


图 7 不同的准直误差 Δ 对应的远场图案

Fig. 7 Far field patterns for different alignment errors Δ

(a) $\Delta = 0$; (b) $\Delta = d/8$; (c) $\Delta = d/4$; (d) $\Delta = 3d/8$; (e) $\Delta = d/2$

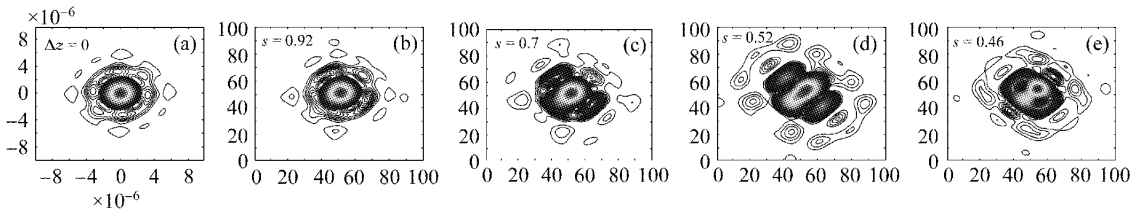


图 8 不同的准直误差 Δz 对应的远场图案

Fig. 8 Far field patterns for different alignment errors Δz

(a) $\Delta z = 0$; (b) $\Delta z = 0.1\lambda$; (c) $\Delta z = 0.2\lambda$; (d) $\Delta z = 0.3\lambda$; (e) $\Delta z = 0.4\lambda$

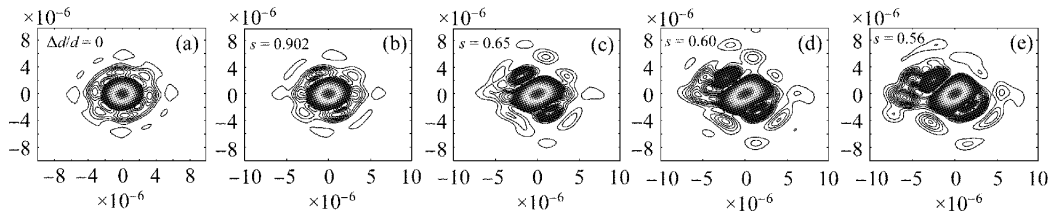


图 9 不同的刻线宽度误差对应的远场图案

Fig. 9 Far field patterns for different groove-width errors

(a) $\Delta d/d = 0$; (b) $\Delta d/d = 2.1 \times 10^{-7}$; (c) $\Delta d/d = 4.2 \times 10^{-7}$; (d) $\Delta d/d = 6.3 \times 10^{-7}$; (e) $\Delta d/d = 8.4 \times 10^{-7}$

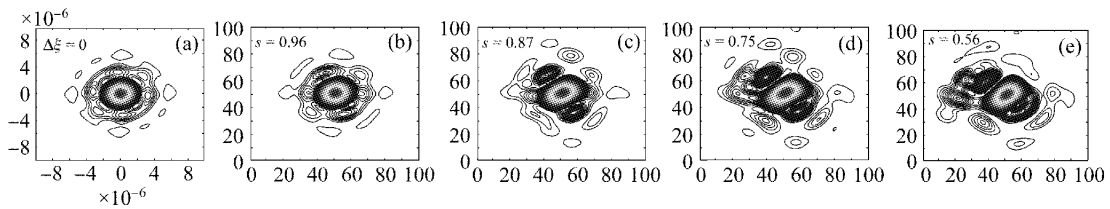


图 10 不同的角度误差对应的远场图案

Fig. 10 Far field patterns for different rotation errors

(a) $\Delta \xi = 0$; (b) $\Delta \xi = 5.25 \times 10^{-6}$; (c) $\Delta \xi = 1.05 \times 10^{-5}$; (d) $\Delta \xi = 1.575 \times 10^{-5}$; (e) $\Delta \xi = 2.1 \times 10^{-5}$

由图 7~图 10 可以看出,随着误差的增加,焦斑中心能量将向外扩散,甚至出现焦斑分裂的情况。由数值模拟的结果来看,光栅拼接对准直误差的要求比较苛刻:如果要求施特雷尔比为 0.9 左右,则对各类误差的要求基本上是: $\Delta < d/8$, $\Delta z < 0.1 \mu\text{m}$, $\Delta d/d < 2.1 \times 10^{-7}$, $\Delta \xi < 0.18 \mu\text{rad}$ 。实验中当同时存在几种误差时,不同类型的误差导致的效应可能是互相抵消的,如 Δx 与 Δz , $\Delta \xi$ 与 Δd 之间。在实际实验过程中利用这一特点,对各种类型的误差分类进行配对补偿,可以大大增加允许的误差容限。

4 结 论

利用傅里叶光学分析方法,针对一种具体的拼接光栅压缩池建立了一个误差分析模型。并在此基础上具体分析了两种平移误差、光栅刻线宽度误差与旋转误差,得到了远场焦斑强度分布关于误差值的表达式,并进行了数值模拟。结果表明,当系统存在一种误差时,为了使焦斑的施特雷尔比满足一定条件(如 > 0.9),误差值限制在很小的范围内,在此范围内误差对焦斑的时域特性的影响可以忽略。由于“快点火”实验对点火脉冲的远场焦斑特性有严格的要求,因此通过本文的研究有助于对光栅拼接过程中的误差提出要求。

参 考 文 献

1 M. D. Perry, G. Mourou. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers [J]. *Science*, 1994, **264**(5161):917~924

2 Zhang Weili, Xing Qirong, Wang Qingyue *et al.*. Terawatt femtosecond Ti:sapphire amplifier system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(4):399~402
张伟力,邢岐荣,王清月等. TW 级 Ti:Al₂O₃ 飞秒激光放大器 [J]. *光学学报*, 1996, **16**(4):399~402

3 Jiang Zhiming, Jean-Claude Kieffer, Xu Zhizhan. Intense ultrafast laser-matter interaction and its application [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(6):513~519
江志明,让-克劳德·基夫,徐至展. 超短高功率脉冲激光与物质相互作用及其应用 [J]. *中国激光*, 1996, **A23**(6):513~519

4 Yoneyoshi Kitagiwa, Hisanori Fujita, Ryosuke Kodama *et al.*. Prepulse-free petawatt laser for a fast ignitor [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(3):281~293

5 Zhong Qinghua, Wang Chaohui, Zhu Qihe *et al.*. Study of relaxation of laser dye in solution by femtosecond laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(4):349~352
衷庆华,王朝晖,朱起鹤等. 用飞秒激光研究溶液中激光染料分子的超快弛豫 [J]. *中国激光*, 1996, **A23**(4):349~352

6 Terrance J. Kessler, Joachim Bunkenburg, Hu Huang *et al.*. Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high-energy chirped-pulse-amplified lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(6):635~637

7 Lifeng Li, Jeffrey Hirsh. All-dielectric high-efficiency reflection gratings made with multilayer thin-film coatings [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11):1349~1351

8 B. W. Shore, M. D. Perry, J. A. Britten *et al.*. Design of high-efficiency dielectric reflection gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(5):1124~1136

9 Tiejun Zhang, Motoki Yonemura, Yoshiaki Kato. An array-grating compressor for high-power chirped-pulse amplification lasers [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **145**:367~376

10 Zuo Yanlei, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua *et al.*. Far-field analysis of ultrashort pulse through the tiled gratings [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9):1323~1327
左言磊,魏晓峰,朱启华等. 超短脉冲通过拼接光栅的远场分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(9):1323~1327

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