

文章编号: 0253-2239(2006)02-0161-5

拼接光栅的偏差对光束空间特性的影响

马雪梅¹ 戴亚平² 朱健强¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要: 用拼接小尺寸多层介质膜衍射介质膜衍射光栅的办法制作大口径的高破坏阈值光栅成为解决拍瓦激光系统输出能量的关键技术——光栅拼接技术。拼接的每个光栅都存在五维自由度的偏差,对激光脉冲的空间特性和时间特性产生影响。用夫琅禾费衍射的方法分析了拼接光栅的偏差对光束空间特性的影响,建立了偏差和远场强度分布之间的函数关系并用数值方法进行模拟,得出角度偏差对光束远场分布的影响可以忽略,而位移偏差:光栅间拼缝和前后位移偏差是影响光束远场分布的关键因素。

关键词: 光栅; 拍瓦激光系统; 拼接技术; 多层介质膜衍射光栅; 夫琅禾费衍射

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Effect of Tiling Gratings Errors on Laser Beam Spatial Distribution

Ma Xuemei¹ Dai Yaping² Zhu Jianqiang¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800)

Abstract: Grating tiling technology using small aperture multilayer dielectric coating diffraction gratings to form large-aperture high-damage threshold gratings is the key technology to solve the output energy of the PW laser system. There are errors of five degrees of freedom between each adjacent pair of gratings within a tiled-grating system, affecting the spatial and temporal property of the laser beam. The authors express the relationship of far-field intensity distribution as the function of individual error by analyzing the effect of tiling gratings errors on the laser beam spatial distribution with Fraunhofer diffraction method and simulate it with numerical method. The results indicate the distortion in the pulse shape caused by angle error is negligible, the piston errors including in-plane shift and out-of-plane shift errors are the critical effects on the far-field intensity distribution.

Key words: grating; PW laser system; tiling technology; multilayer dielectric coating diffraction grating; Fraunhofer diffraction

1 引 言

光栅是拍瓦装置中破坏阈值最低的光学元件,为了提高驱动器的输出能量,需要大口径的光栅。传统镀金光栅制作工艺成熟,口径可以作得较大,但破坏阈值很低。多层介质膜光栅的光学破坏阈值远高于金膜,但是制作工艺复杂,尺寸难于做大。大规模钕玻璃啁啾脉冲放大激光系统为了产生拍瓦级功率输出,需要宽度超过 0.5 m 的大尺寸高效衍射光栅。利用拼接方法^[1,2]制作大口径的介质膜光栅,具有两者的优点,因此,光栅拼接技术也就成为很有前景的技术。

理论和实验证明光栅的前后位移偏差会导致激

光束远场焦斑的分裂^[3,4];通过分析了阵列光栅压缩器的设计过程中光栅角度偏差对压缩脉冲时间宽度展宽的影响,Zhang 等认为设计中的偏差对压缩脉冲的展宽量必须控制在 25% 以内^[5]。本文着重分析了拼接光栅的偏差:1)绕 3 个正交方向的旋转偏差:面外角度偏差(不共面),面内角度偏差(共面但条纹不平行);2)共面光栅的左右位移偏差;3)前后位移偏差(光栅不共面);对拼接光栅衍射波相位的作用从而对激光束近场,远场强度分布的影响。

2 理论模型

相位型光栅的反射率函数^[6]可以表示为

作者简介: 马雪梅(1980~),女,新疆人,博士研究生。主要从事光栅拼接技术、光束传输方面的研究。

E-mail: maxuemei@siom.ac.cn

收稿日期: 2005-03-06; 收到修改稿日期: 2005-05-30

$$t(x, y) = \exp[j \times m/2 \times \sin(2\pi f_0 x)] \times \text{rect}(x/l_x) \text{rect}(y/l_y), \quad (1)$$

其中 m 表示相位延迟的峰-峰幅度, $f_0 = 1/d$ 为光栅的空间频率。光栅在不存在偏差的远场强度为

$$I_0(f_x, f_y) = \left(\frac{l_x l_y}{\lambda z}\right)^2 \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q^2\left(\frac{m}{2}\right) \times \text{sinc}^2[l_x(f_x - qf_0)] \cdot \text{sinc}^2(l_y f_y), \quad (2)$$

其中 J_q 是 q 阶的第一类贝塞尔函数, $f_x = x_0/(\lambda z)$, $f_y = y_0/(\lambda z)$ 。

2.1 面外角度偏差的影响

$x-y$ 面对应于拼接光栅的基准光栅面, z 轴垂直于这个面(如图 1)。(x, y) 是 $x-y$ 面上的点, 第 j 块光栅绕 y 轴(条纹方向)的角度偏差为 b_{xj} , 绕 x 轴(垂直条纹方向)的角度偏差为 b_{yj} , $l_x \times l_y$ 是光栅

的尺寸。

假设面外角偏差 b_{xj}, b_{yj} 服从高斯统计分布, 经系统平均后, 角度偏差对衍射波面的相位影响为

$$\psi(\sigma_{ax}, \sigma_{ay}; x, y) = 2\pi \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{ax}^2 x^2}{2l_x^2} + \frac{\sigma_{ay}^2 y^2}{2l_y^2}\right)\right], \quad (3)$$

其中 σ_{ax}, σ_{ay} 是沿 x, y 方向的标准偏差, 与面外角度偏差和聚焦距离有关^[7,8]

$$\sigma_{ax}^2 = \frac{8\pi z}{\lambda} \langle b_{xj}^2 \rangle, \quad \sigma_{ay}^2 = \frac{8\pi z}{\lambda} \langle b_{yj}^2 \rangle, \quad (4)$$

其中 z 表示聚焦距离。具有面外角度偏差的光栅面衍射波前可以表示为

$$u(\sigma_a; x, y) = t_0(x, y) \times \psi(\sigma_a; x, y), \quad (5)$$

$$\sigma_a = (\sigma_{ax}, \sigma_{ay}),$$

根据衍射理论, 光束远场复振幅为:

$$u_0(\sigma_a; x', y') = \frac{2\pi l_x^2 l_y^2}{\sigma_{ax} \sigma_{ay}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q\left(\frac{m}{2}\right) \text{sinc}[l_x(f'_x - qf_0)] \text{sinc}(l_y f'_y) \times \exp\{-2\pi^2[l_x^2(f_x - f'_x)^2/\sigma_{ax}^2 + l_y^2(f_y - f'_y)^2/\sigma_{ay}^2]\} df'_x df'_y, \quad (6)$$

其中 $f'_x = x'/(\lambda z)$, $f'_y = y'/(\lambda z)$ 是远场空间频率。远场强度(一维方向)与标准偏差的关系如下:

$$I(x'; \sigma_{ax}) = 4\pi^2 \frac{l_x^4}{\lambda^2 z^2 \sigma_{ax}^2} \left| \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q\left(\frac{m}{2}\right) \int \text{sinc}[l_x(f_x - qf_0)] \exp\left[-\frac{2\pi^2 l_x^2 (f_x - f'_x)^2}{\sigma_{ax}^2}\right] df_x \right|^2, \quad (7)$$

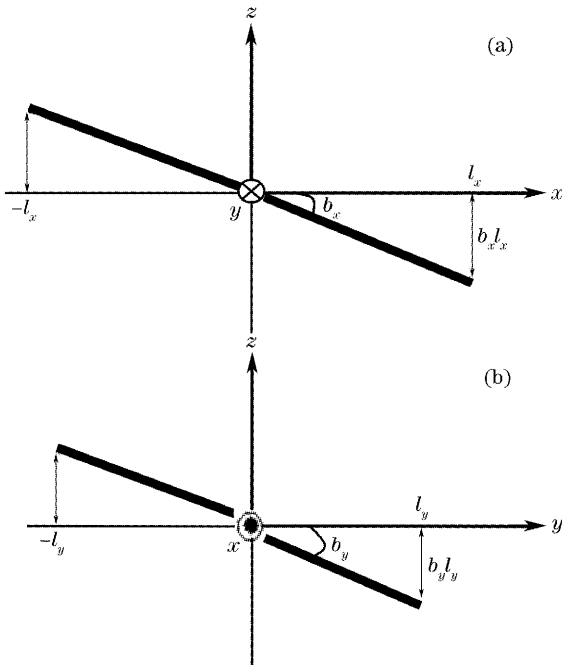


图 1 存在角度偏差的光栅, $x-y$ 是理想的光栅面位置, b_x, b_y 分别是绕 x, y 轴的角度偏差。(a), (b) 是两种情况的投影图

Fig.1 Projection of the tip-tilt grating, (a) and (b) $x-y$ the ideal place of grating; b_x, b_y is the tip-tilt error, rotating with x, y axes respectively

标准偏差趋于 0 时, (7) 与 (2) 式一致。

对 (7) 式进行数值积分, 得到面外角度偏差对光束强度分布影响如图 2 所示。纵轴表示远场强度分布, 图中曲线由内到外依次表示作为面外角度偏差函数(俯仰和左右)的标准偏差量为 0.001 mrad, 1.001 mrad, 2.001 mrad, 3.001 mrad, 4.001 mrad 时, 远场强度的分布情况。

数值计算表明, 随着角度偏差的增大, 聚焦光斑的尺寸变大, 旁斑逐渐变小。

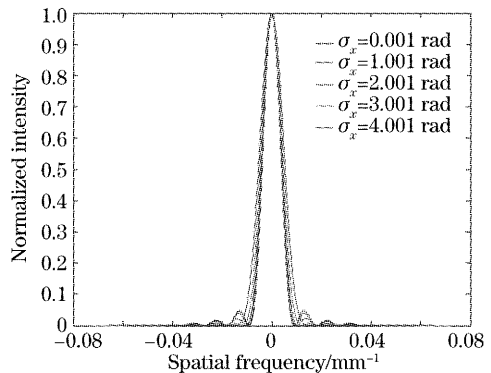


图 2 面外角度偏差对光束强度分布影响
Fig.2 Effect of off-plane errors (tip and tilt) on the far-field intensity distribution of the laser beam

2.2 光栅条纹不平行(面内角度偏差)对光束空间特性的影响

如图 3 所示建立坐标系, xoz 面是光栅主截面, xoy 面是光栅面, G_0 是基准光栅, G_0, G_1 的条纹夹角为 $\Delta\xi$ 。根据反射光栅的工作原理, 入射光束投影于光栅主截面内的分量才会发生色散(垂直于色散面的光束只发生反射)^[9], 衍射光束在基准光栅主截面内的波矢量的模为 $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - (\sin \alpha \sin \Delta\xi)^2}$, α 是入射光束与 z 轴的夹角, 基准光栅主截面内的空间频率 $f' = \cos \Delta\xi / d$ 。

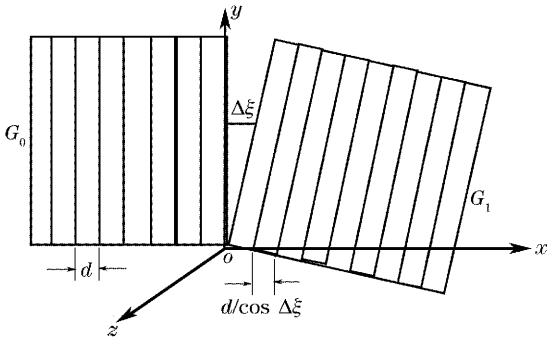


图 3 两拼接光栅条纹不平行的示意图

Fig. 3 The illustration of parallelism error in the tiling grating

偏差光栅 G_1 的反射率函数表示为

$$t'(\Delta\xi; x, y) = \exp[j \times m/2 \times \sin(2\pi f'x)] \times \text{rect}(x/l_x) \text{rect}(y/l_y), \quad (8)$$

根据衍射理论, 基准光栅主截面内衍射光束远场强度为

$$I_1(f_{x1}, f_{y1}; \Delta\xi) = \left(\frac{l_x l_y}{\lambda z}\right)^2 \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q^2\left(\frac{m}{2}\right) \times \text{sinc}^2[l_x(f_{x1} - qf')] \text{sinc}^2(l_y f_{y1}), \quad (9)$$

其中 $f_{x1} = \frac{x_1}{\lambda z} \sqrt{1 - (\sin \alpha \sin \Delta\xi)^2}$,

$$f_{y1} = \frac{y_1}{\lambda z} \sqrt{1 - (\sin \alpha \sin \Delta\xi)^2},$$

基准光栅主截面内干涉场强度为^[10]

$$\begin{aligned} I_{01}(x_0, y_0; \Delta\xi) &= (U_0 + u_1) \times (U_0 + u_1)^* = \\ &= I_0 + I_1 + 2 \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q\left(\frac{m}{2}\right) \text{sinc}[l_x(f_{x1} - qf')] \times \\ &= \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q\left(\frac{m}{2}\right) \text{sinc}[l_x(f_x - qf_0)] \\ &= \text{sinc}(l_x f_y) \text{sinc}(l_y f_{y1}) \times \\ &= \cos\left[(k - k_1) \left(z + \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z}\right)\right], \quad (10) \end{aligned}$$

上式给出了面内角度偏差与远场光强之间的关系。如图 4 所示。

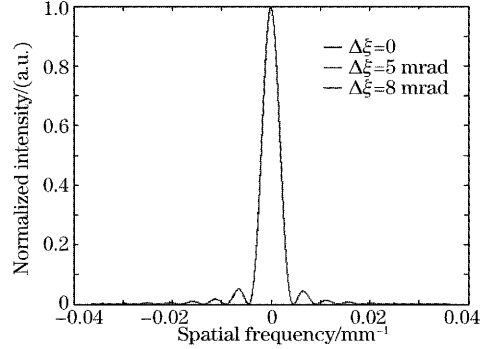


图 4 条纹不平行度与远场强度分布的关系

Fig. 4 The relation between tiling grating groove parallelism and far-field intensity distribution

数值模拟结果表明, 不考虑垂直基准光栅主截面内的光束行为时, 几种角度偏差情况下, 远场强度变化趋势相同, 条纹不平行对基准光栅主截面内光束的远场强度影响很小。

2.3 光栅拼缝对光束远场分布的影响

光栅 G_1, G_0 之间的拼缝宽为 L , α, β 为光束入射角与衍射角, 如图 5 所示。根据几何光学和衍射方程, 得到光栅 G_0, G_1 上的波前相位差^[11]:

$$\Delta\phi = \left(m_1 \frac{L}{d}\right) 2\pi, \quad (11)$$

m_1 是整数, 表示衍射级次。两部分边缘光束干涉远场强度为

$$I(x_0, y_0) = 2I_0(x_0, y_0)(1 + \cos \Delta\phi), \quad (12)$$

上式表明, 拼缝对干涉场的调制是周期性的, 将(11)式带入(12)式可以判断拼缝宽度对远场强度的影响是以 d 为周期的, n 为正整数, 表示周期数。数值计算结果如图 6, 图 7 所示。

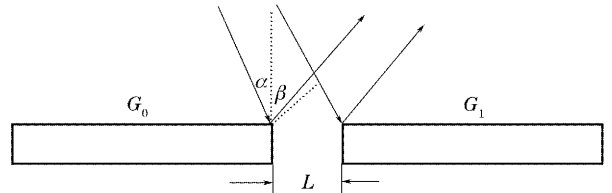


图 5 光栅间拼缝引起的衍射波面相位差

Fig. 5 The phase difference caused by the shift between two tiled gratings

参量设定为: $f_0 = 1740 \text{ l/mm}$, $l_x = 110 \text{ mm}$, $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$ 。理论分析和数值都说明, n 的大小并不影响远场强度变化趋势, 只有拼缝宽度变化在光

栅周期范围内时,才会对光斑强度分布起作用。

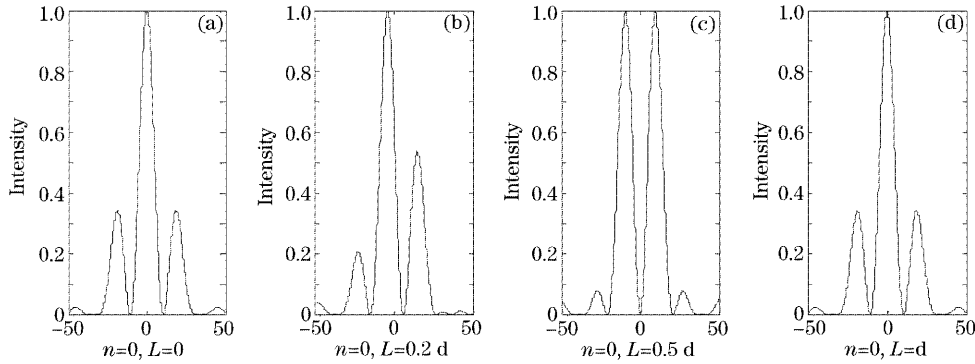


图 6 面内位移偏差在一个光栅周期以内变化,对远场强度分布的影响

Fig. 6 The effect on the far-field intensity distribution caused by in-plane shift during one grating period

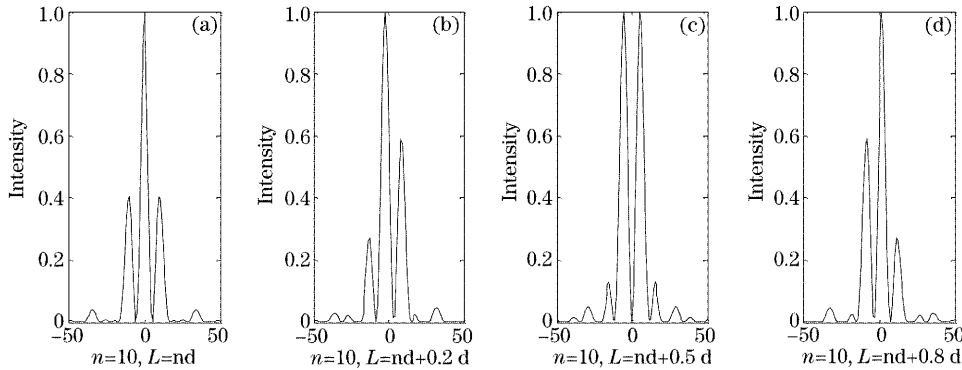


图 7 光栅面内位移偏差在 10~11 倍光栅周期内变化对远场强度分布的影响

Fig. 7 The far-field intensity distribution variation caused by the in-plane shift varying from 10 to 11 times grating periods

2.4 前后位移偏差的影响

假设拼接光栅面平行,条纹也平行,只考虑前后偏差对光束空间特性的影响,如图 8 所示,以单位平面波入射,由几何光学可得,两光栅边缘光束的光程差为

$$\Delta L = \Delta z (\cos \alpha + \cos \beta),$$

结合光栅方程,可以得到基准光栅 G_0 与偏移光栅 G_1 的相位差为

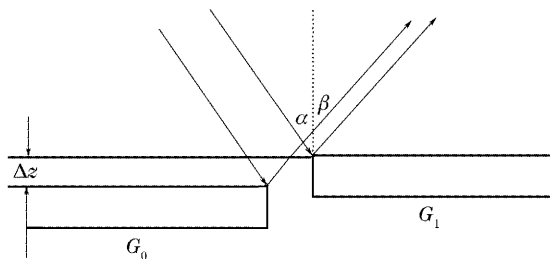


图 8 前后位移偏差引起的相位差

Fig. 8 The phase difference caused by the piston error

$$\Delta \phi = 2\pi \frac{\Delta z}{d / \sqrt{(d \cos \alpha / \lambda)^2 - 1} + 2d \sin \alpha / \lambda} = 2\pi (\Delta z / d'), \tag{13}$$

其中 Δz 为光栅的前后位移偏差。

同理,干涉场强度分布如(12)式,从(13)式可以看出,对给定的波长和光栅,前后位移偏差对强度分布的影响是以 d' 为周期的, n 为周期数,设定的参量与上一部分相同, $d' = 2.6 \mu\text{m}$,数值计算结果如图 9、图 10 所示。

3 结 论

通过理论分析和数值计算,得到以下结论:

- 1) 角度偏差对光束的空间分布影响并不显著;
- 2) 光栅间前后,左右偏差对光束远场强度分布的影响具有周期性,在位移偏差在一周期范围内变化时,强度分布有较大差异,会产生焦斑分裂现象。

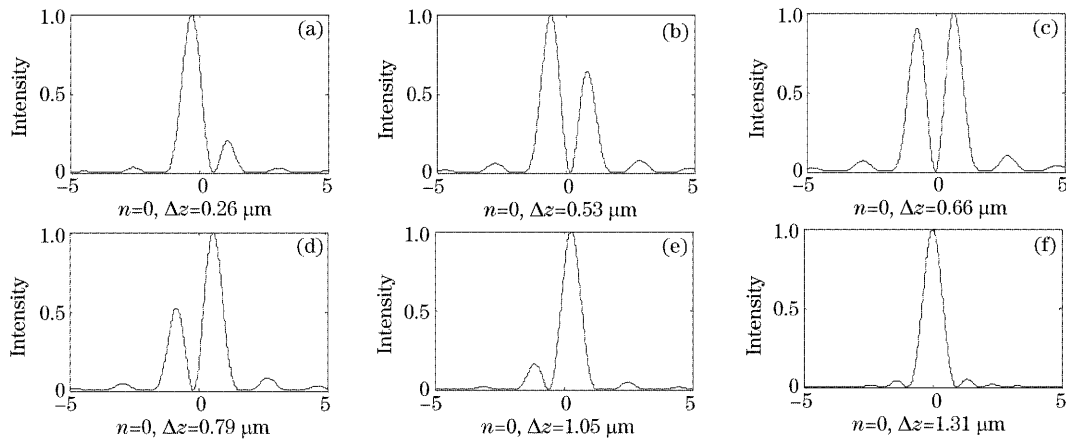


图 9 前后位移偏差在周期 d' 范围内变化,对远场强度分布的影响, n 表示周期数

Fig. 9 Intensity distribution variation caused by the piston error varying within d' period and n denotes the number of period

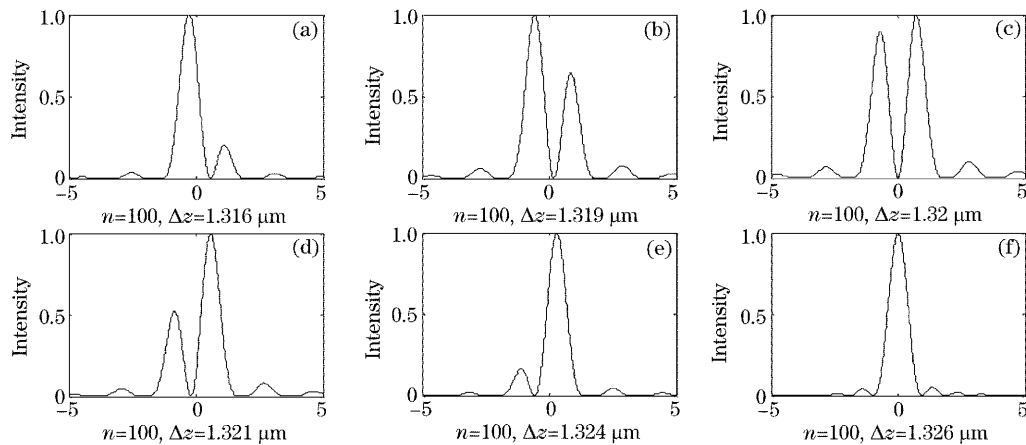


图 10 前后位移偏差在 100~101 倍 d' 范围内变化,对远场强度分布的影响

Fig. 10 Intensity distribution variation caused by piston error varying from 100 to 101 times d' periods

参 考 文 献

- 1 Wang Zhile, Zhang Wei, Long Funian. Image quality evaluation for diffraction-limited optical synthetic aperture system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **25**(1): 35~39 (in Chinese)
王至乐,张 伟,龙夫年. 衍射受限光学合成孔径成像系统像质评价[J]. *光学学报*, 2004, **25**(1): 35~39
- 2 Fan Weijun, Zhou Bifang, Wang Haitao *et al.*. Research of Fourier phase in optical synthetic-aperture technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 408~412 (in Chinese)
范伟军,周必方,王海涛等. 光学综合孔径成像中得傅里叶相位研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 408~412
- 3 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
- 4 T. J. Kessler, J. Bunkenburg, H. Huang. Grating array systems having a plurality of gratings operative in a coherently additive mode and method for making such grating array systems [P]. U. S. 2004/0227956A1, 2004-11
- 5 Tiejun Zhang, Motoki Yonemura, Yoshiaki Kato. An array-grating compressor for high-power chirped-pulse amplification lasers[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **145**: 367~376
- 6 Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1968
- 7 N. Yaitskova, K. Dohlen. Tip-tilt error for extremely large segmented telescope: detailed theoretical analysis and numerical simulation[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(7): 1274~1285
- 8 Carles Pizarro, Josep Arasa, Ferran Laguarda *et al.*. Design of an interferometric system for the measurement of phasing errors in segmented mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4562~4570
- 9 E. B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1969, **5**(9): 454~459
- 10 Zhao Bo, Hao Defu. Tiling to make large area diffraction grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(5): 503~507 (in Chinese)
赵 博,郝德阜. 拼接法获取大面积衍射光栅[J]. *光学精密工程*, 2000, **8**(5): 503~507
- 11 Zhongyang Wang, Zhizhan Xu, Zhengquan Zhang. A new theory for the treatment of a pulsed beam propagating through a grating pair[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **37**(1): 1~11