

全息光栅拼接系统中的像差补偿法

钱国林¹, 吴建宏², 李朝明², 陈新荣²

¹ 苏州市职业大学电子信息工程学院, 江苏 苏州 215104;

² 苏州大学物理与光电能源学部, 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006

摘要 全息光栅拼接参数需要用参考干涉条纹来检测。系统像差会造成干涉条纹扭曲, 产生光栅拼接误差。为补偿像差造成的光栅拼接误差, 对像差与干涉条纹扭曲量之间的理论关系进行了研究, 利用计算机模拟了参考干涉条纹图像, 并将光栅拼接误差预调制到参考干涉条纹图像中。为验证该方法的有效性, 在曝光系统像差峰-峰值为 0.72λ 的情况下进行了光栅拼接实验, 在光栅拼缝处像差造成 -1 级衍射波面最大突变量为 0.36λ 。利用预制参考干涉条纹图像作为拼接参考时, 其最大突变量为 0.097λ 。实验结果表明, 在曝光系统像差较大的情况下, 干涉条纹预制法能够有效地控制光栅拼接误差。

关键词 衍射; 全息光栅; 拼接光栅; 像差补偿; 干涉条纹

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0305001

Compensational Method for Aberration in Mosaic System of Holographic Grating

Qian Guolin¹, Wu Jianhong², Li Chaoming², Chen Xinrong²

¹ College of Electronic Information Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou, Jiangsu 215104, China;

² College of Physics, Optoelectronics and Energy, Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract The reference interference fringe is used to detect the parameters of the holographic grating. The distortion of the interference fringes is caused by the system aberration, and the grating tiling-error is generated. In order to compensate the grating tiling-error, the relationship between the aberration and the distortion of interference fringe is studied. The reference interference fringes are simulated by computer, and the grating tiling-error is per-modulated into the interference fringe image. To verify the effectiveness of the proposed method, the grating splicing experiment is carried out under the condition of system aberration whose peak to peak value is 0.72λ . The maximum variation of the -1 st diffraction wave front at the grating seam is 0.36λ . When the prefabricated reference interference fringe images are used as the reference, and the maximum variation is 0.097λ . The experimental results show that the modulated interference fringes can effectively control the tiling-error of the grating in the exposure system with large aberration.

Key words diffraction; holographic grating; tiled-grating; aberration compensation; interference fringe

OCIS codes 050.1950; 090.1970; 320.5520; 230.1950

1 引 言

高功率啁啾脉冲激光放大器需要大口径光栅。日本大坂大学 LEX 激光系统所需衍射光栅口径为 $1800\text{ mm} \times 420\text{ mm}$ ^[1], 美国国家点火装置所需最大衍射光栅口径为 $2000\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$ ^[2]。我国啁啾脉冲激光系统所需光栅最大口径将达 $1400\text{ mm} \times 420\text{ mm}$ 。直接制作单口径米量级光栅难度很大, 将多块光栅拼接在一起, 可降低大光栅的制造难度和成本^[3-6]。全息光栅曝光拼接技术是一种较为可行的方法。Zeng 等^[7-8]提出了基于潜像的曝光拼接方法, 将参考光栅直接制作在光栅基片表面, 提高了检测光栅拼接参数的

收稿日期: 2016-09-09; **收到修改稿日期**: 2016-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(61178046)、江苏省高校自然科学研究重大项目(11KJA14001)

作者简介: 钱国林(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光信息器件与微纳制造方面的研究。E-mail: qgl_jy@jssvc.edu.cn

稳定性,但拼接光栅口径仅为 $90\text{ mm} \times (80+80)\text{ mm}$,且并未考虑像差对光栅拼接误差的影响。钱国林等^[9-10]对有像差情况下的全息光栅拼接进行了研究,实验中仅仅考虑了干涉条纹的对准情况,并未矫正曝光系统像差造成的拼接误差,在大像差情况下无法有效地控制光栅拼接误差。本文的主要目标是研制米级光栅,研究光栅拼接过程中像差造成的问题,控制像差造成的光栅拼接误差。提出了一种像差补偿法,使拼接光栅衍射波面在拼缝处保持连续性,抑制拼缝处衍射波面相位突变。根据曝光系统像差预制参考干涉条纹,使参考干涉条纹的密度和相位发生变化,以达到预矫正拼接光栅衍射波面的效果。在像差较大的情况下,用该方法进行了光栅拼接实验。

2 全息光栅拼接原理

图 1(a)所示为涂有光致抗蚀剂的玻璃基片 H_0 ,通过全息曝光依次在其表面制造光栅掩模,称之为全息光栅曝光拼接法。图 1(a)左侧条纹为两束对称平行光形成的干涉条纹示意图,称之为光场光栅,经过一段时间曝光后,光致抗蚀剂记录下光栅 G_1 ,如图 1(b)左图所示,条纹平行于 y 轴,沿 x 轴方向周期为 d_{1x} , L 为曝光区域宽度, H 为曝光区域高度。移动主光栅基片 H_0 使未曝光区域进入光场,准备第二次曝光,如图 1(b)右图所示,记录下光栅 G_2 。光栅 G_2 沿 x 轴方向周期为 d_{2x} ,沿 y 轴方向周期为 d_{2y} , G_1 与 G_2 之间的间距为 Δx 。当 $d_{1x} = d_{2x}$, d_{2y} 为无穷大(等价于光栅线与 y 轴夹角 $\Delta\theta = 0$), $\Delta\varphi = 2\pi \cdot \text{mod}(\Delta x/d_{1x}) = 0$ 时,拼接光栅 G_1 、 G_2 的衍射波面为理想平面波,此时可把拼接光栅等同于一块光栅^[11]。

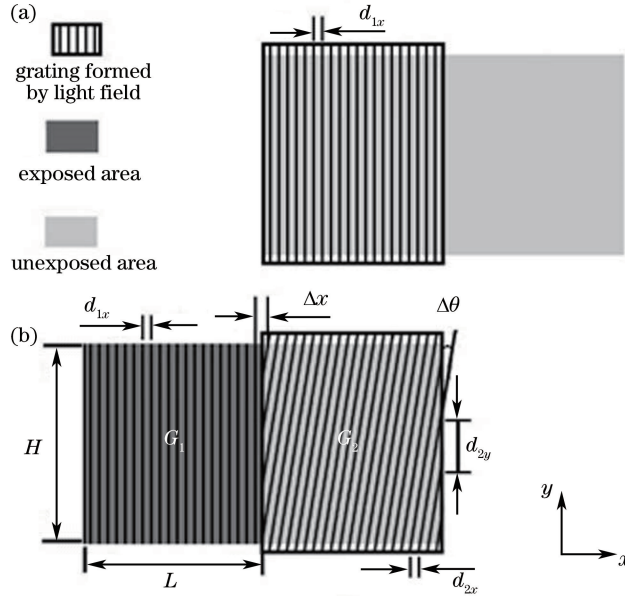


图 1 拼接光栅示意图。(a)第一次曝光;(b)第二次曝光

Fig. 1 Sketch of tiled-grating. (a) First exposure; (b) second exposure

实际上曝光系统有像差,设光束 I_1 的波像差为 $\varphi_1(x, y)$,光束 I_2 的波像差为 $\varphi_2(x, y)$,两者干涉形成的位相型光栅透射系数可表达为^[12]

$$\tau(x, y) = K \cdot \exp\left\{ja \cos\left[\frac{2\pi \cdot x}{d_0} + 2\pi \cdot w(x, y)\right]\right\}, \quad (1)$$

式中 K 、 a 为常数,光栅常数 $d_0 = \lambda_0 / (2\sin \alpha_0)$, α_0 为光束入射角, λ_0 为光源波长, $w(x, y) = \varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y)$,称之为曝光系统像差,像差使光栅条纹发生扭曲。拼接光栅透射系数可表达为

$$\tau(x, y) = \begin{cases} K \cdot \exp\left\{ja \cos\left[\frac{2\pi \cdot x}{d_{1x}} + 2\pi \cdot w(x, y)\right]\right\}, & 0 \leq x < L \\ K \cdot \exp\left\{ja \cos\left[\frac{2\pi \cdot x}{d_{2x}} + \frac{2\pi y}{d_{2y}} + 2\pi \cdot w(x - L, y) + \Delta\varphi\right]\right\}, & L \leq x < 2L \end{cases}, \quad (2)$$

式中周期误差可定义为 $\Delta d = d_{2x} - d_{1x}$,倾斜角误差 $\Delta\theta \approx d_{2x}/d_{2y}$,平移误差 $\Delta\varphi = 2\pi \cdot \text{mod}(\Delta x/d_{1x})$ 。

波面相位突变对激光脉冲压缩是不利的,而光栅拼缝处极易出现衍射波面相位突变。当系统像差 $w(x, y) \neq 0$ 时,即使 $d_{2x} = d_{1x}, d_{1y} = d_{2y} = \infty, \Delta\varphi = 0$,在拼缝处衍射波面也不连续。如果对拼接误差 $\Delta\theta$ 和 Δx 作适当微调,即微调(2)式中 d_{2x}, d_{2y} 和 $\Delta\varphi$,可提高拼缝处衍射波面的连续性,在拼缝 $x = L$ 处波面错位均方根(RMS)值可表达式为

$$R_{ms} = \sqrt{\sum_{j=1}^M [\omega_1(x_{1N}, y_j) - \omega_2(x_{21}, y_j)]^2 / M}, \quad (3)$$

式中 $\omega_1 = 2\pi \left[\frac{x}{d_{1x}} + w(x, y) \right]$ 为光栅 G_1 的 -1 级衍射波面相位, $x_{1N} = L, \omega_2 = 2\pi \left[\frac{x}{d_{1x}} + \frac{y}{d_{2y}} + w(x - L, y) \right]$ 为光栅 G_2 的 -1 级衍射波面相位, $x_{21} = L + L/N, N$ 为 x 方向的采样点数量, M 为 y 方向的采样点数量。在有像差的全息光栅曝光系统中,光栅拼接标准可定义为光栅拼缝处 -1 级衍射波面错位均方根值最小。

3 光栅衍射波面像差补偿法

3.1 光栅拼接参数检测方法

光栅拼接参数 $\Delta d, \Delta\theta$ 和 $\Delta\varphi$ 可由参考干涉条纹倾斜度、周期和相位进行检测^[10],它由光场光栅和参考光栅叠加形成,其表达式为

$$I = 1 + \cos \left\{ 2\pi \left[w(x - \Delta L, y) - w(x, y) + \frac{x}{d_0} - \frac{x}{d'_x} - \frac{y}{d'_y} \right] - \phi \right\}, \quad (4)$$

式中 ΔL 为参考光栅基片沿 x 轴方向移动距离, d_0 为参考光栅沿 x 轴方向的周期,沿 y 轴方向周期为无穷大, d'_x 为光场光栅沿 x 轴方向周期, d'_y 为 y 轴方向周期, ϕ 为常数。

全息光栅曝光拼接系统如图 2 所示,主要包括激光器,反射镜 M_1, M_2 ,空间滤波器 S_1, S_2 ,主透镜 L_1, L_2 ,激光束 I_1, I_2 ,主光栅基片 H_0 ,挡板,顶参考光栅 G_t ,摄像机,光屏 S_c ,镀铬平行玻璃板 A_1 ,镀铬相位玻璃板 A_2 ,边参考光栅 G_b ,透镜 L_3 ,电荷耦合器件(CCD),步进电机 Mo_1, Mo_2 ,压电陶瓷(PZT),支架,计算机等。

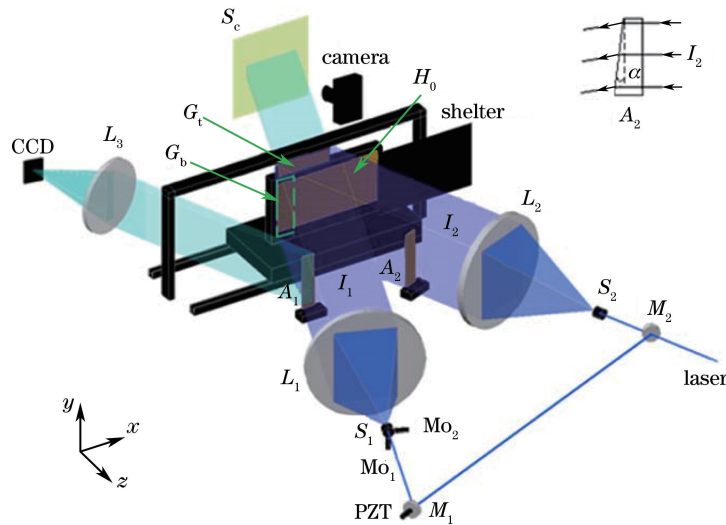


图 2 光栅拼接曝光系统

Fig. 2 Exposure system used to make tiled-grating

顶参考光栅 G_t 始终固定在主光栅基片 H_0 上方的支架下,用于检测拼接光栅周期变化,即 Δd 。根据(4)式可得,当 $d'_x = d_0$ 时,参考干涉条纹与 x 轴平行,其条纹间距为 d'_y ;当 $d'_x \neq d_0$ 时,参考干涉条纹与 x 轴之间产生倾斜角度。参考干涉条纹与 x 轴的倾斜角度代表了光栅 G_t 与光场光栅之间的周期误差。如主光栅基片 H_0 与顶参考光栅 G_t 前表面始终保持平行,则该参考干涉条纹倾斜度变化代表了 H_0 表面光场光栅周期变化。

清华大学光栅研制团队利用潜像参考光栅检测光栅线绕 z 轴旋转和相位变化^[8], 即 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\varphi$ 。当涂有光致抗蚀剂的 H_0 在光束 I_1, I_2 下被曝光后, 光致抗蚀剂已有微弱的相位调制, 称之为潜像光栅。主光栅基片 H_0 的部分潜像光栅作为边参考光栅 G_b , 潜像边参考光栅 G_b 无法像主参考光栅 G_r 一样直接放在光场中形成参考干涉条纹, 因为潜像光栅长时间暴露在光场时会被过度曝光而失去功能; 另外潜像光栅的相位调制微弱, 其反射光强、衍射光弱, 两者无法形成清晰的干涉条纹。为使 CCD 获得稳定、清晰的参考干涉条纹, 利用镀铬平行玻璃板 A_1 和镀铬相位玻璃板 A_2 来调制光束的强度和相位。镀铬可以使 I_1, I_2 光强衰减, 以防潜像光栅被过度曝光。相位玻璃板 A_2 可以使参考干涉条纹形成合适的周期, 即(4)式中 $d'_y \approx \lambda / [(n-1) \cdot \alpha]$, 其中 n 为折射率, λ 为曝光波长, α 为 A_2 表面倾角, 如图 2 右上角所示。干涉条纹周期可检测光场光栅与潜像光栅 G_b 之间的倾斜角变化 $\Delta\theta$; 干涉条纹相位可检测光场光栅与光栅 G_b 之间的相位变化 $\Delta\varphi$ 。根据(4)式, 该干涉条纹的表达式为

$$I = 1 + \cos \left\{ 2\pi \left[w(x - \Delta L, y) - w(x, y) + (W_{pi} - W_{xi}) + \frac{x}{d_0} - \frac{x}{d'_x} - \frac{y}{d'_y} \right] - \phi' \right\}, \quad (5)$$

式中 ΔL 为光栅 H_0 移动距离, W_{pi} 为平行板 A_1 造成的透射波面像差, W_{xi} 为相位板 A_2 造成的透射波面像差。

当潜像光栅 G_1 制造完成后, 为使 CCD 能获得清晰的参考干涉条纹 C_0 , 需要将平行玻璃板 A_1 和相位玻璃板 A_2 插入光路, 它们在 H_0 表面投影如图 3(a) 所示, 与 G_b 重叠, 其宽度为 L_b , 对应 CCD 采集的干涉条纹 C_0 , 如图 4(a) 所示。工程上为防止直边衍射影响参考干涉条纹清晰度, 在 A_1, A_2 边缘放置挡光软边, 宽度为 ΔX_1 。

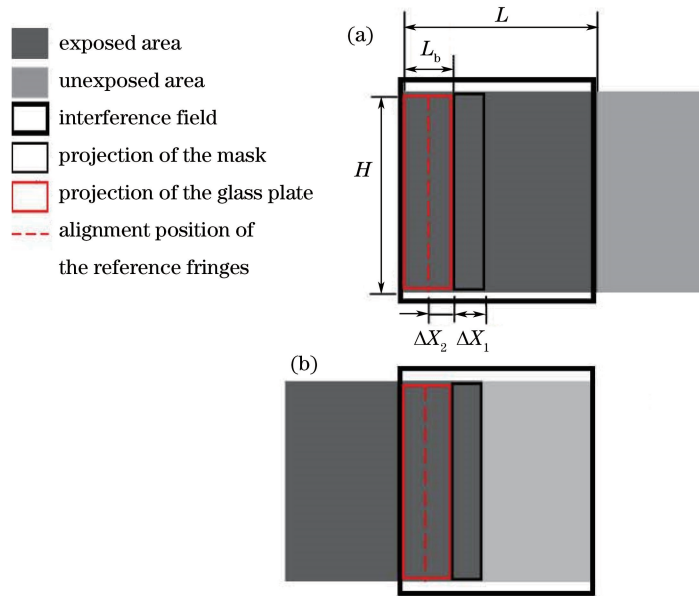


图 3 主基片表面投影。(a) G_1 曝光时; (b) G_2 曝光时

Fig. 3 Projection on the main substrate. (a) During the exposure time of G_1 ; (b) during the exposure time of G_2

在拍摄光栅 G_2 时, 需要实时监测 CCD 采集的干涉条纹, 并使其保持固定的周期和相位。第二次曝光区域比第一次曝光区域宽度小 $L_b + \Delta X_1$, 如图 3(b) 所示, H_0 向左移动距离 $\Delta L = L - \Delta X_1 - L_b$, 红色框区域为参考光栅 G_b , 虚线位置为参考干涉条纹的对准位置。对应 CCD 采集到的实时干涉条纹图像如图 4(b) 所示。由于系统存在较大的像差, 干涉条纹变形严重。该参考干涉条纹与图 4(a) 直接对准时^[13-14], 会产生光栅拼接误差, 该误差由曝光系统像差 $w(x, y)$ 造成。当曝光系统像差造成的线性拼接误差大于 0.1λ 时^[9], 该误差需要进行补偿, 以减弱拼缝处衍射波面相位突变。

3.2 参考干涉条纹预制方法

光栅 ± 1 级衍射波面均包含了光栅基片面形和曝光系统像差, 全息曝光系统像差可表达为

$$w(x, y) = [w_{+1}(x/\cos\beta_1, y) - w_{-1}(x/\cos\beta_1, y)] / 2, \quad (6)$$

式中 β_1 为干涉仪测量光栅 ± 1 级衍射波面时的入射角。在曝光系统中制造了口径为 $400 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的

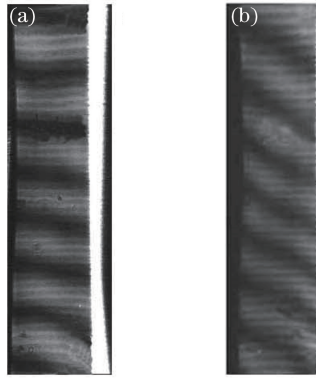


图 4 干涉条纹。(a)参考条纹 C_0 ; (b)实时条纹 C_1

Fig. 4 Interference fringes. (a) Reference fringe C_0 ; (b) real time fringe C_1

光栅。用 Zygo 干涉仪对其进行测量,得到如图 5(a)所示光栅 -1 级衍射波面 $w_{-1}(x, y)$,和如图 5(b)所示 +1 级衍射波面 $w_{+1}(x, y)$ 。根据(6)式计算得到曝光系统像差 $w(x, y)$,如图 6 所示。曝光系统组建完成后其像差是固定的,根据像差数据可模拟参考干涉条纹 C_0 图像,可预先调制参考干涉条纹的相位和周期,用其替代干涉条纹 C_0 ,从而补偿像差造成的拼接误差,称之为预制干涉条纹法。通过该方法,使光栅 G_2 记录波面的相位和倾斜度得到矫正,从而改善拼接光栅拼缝处的衍射波面连续性。

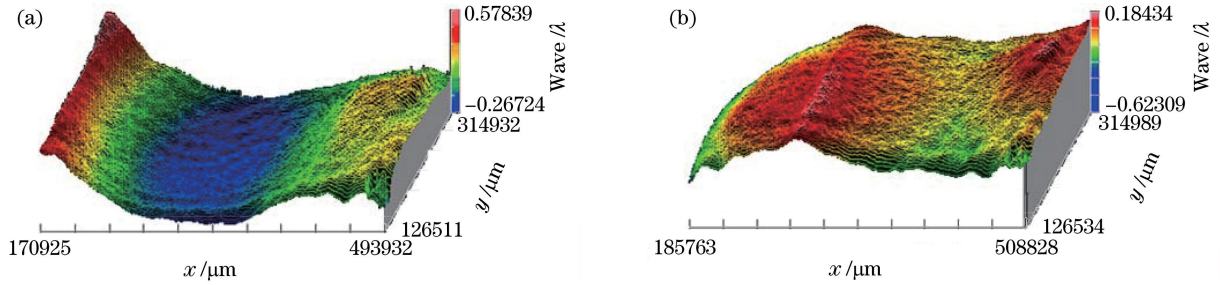


图 5 光栅衍射波面。(a) -1 级波面; (b) +1 级波面

Fig. 5 Diffraction wave front of grating. (a) -1st order wave front; (b) +1st order wave front

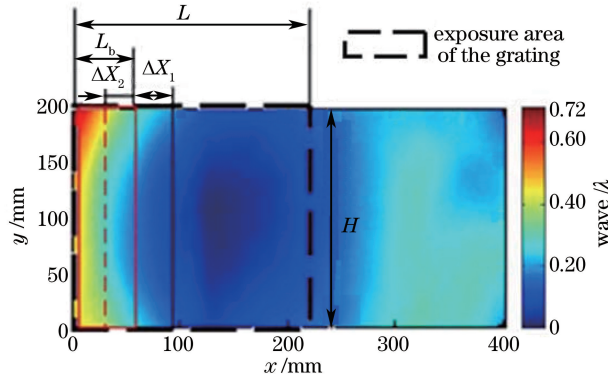


图 6 曝光系统像差

Fig. 6 Aberration of the exposure system

曝光系统像差 $w(x, y)$ 由光束 I_1 、 I_2 的波像差 $W_1(x, y)$ 和 $W_2(x, y)$ 叠加而成,所以也可表达为

$$w(x, y) = W_1(x, y) - W_1(x, y), \quad (7)$$

(7)式与(6)式等价。光束 I_1 透过平行板 A_1 ,被 H_0 表面潜像光栅衍射后的波面像差为

$$W'_1(x, y) = W_1(x, y) + W_{pi}(x, y) + w_0(x, y) \cdot \cos \beta_0 + W_2(x + \Delta L, y) - W_1(x + \Delta L, y), \quad (8)$$

式中 β_0 为光束 I_1 和 I_2 入射角, $w_0(x, y)$ 为 H_0 面形。光束 I_2 透过相位板 A_2 ,被 H_0 反射后的波面像差为

$$W'_2(x, y) = W_2(x, y) + W_{xi} + w_0(x, y) \cdot \cos \beta_0, \quad (9)$$

经过 H_0 的反射光和衍射光叠加后形成参考干涉条纹,可表达为

$$M_{ol}(x, y, \Delta L) = \sin [2\pi \cdot W_{mol}(x, y, \Delta L) + \varphi], \quad (10)$$

式中 φ 为常数, W_{mol} 为两束光波面叠加后的像差, 参考干涉条纹由平行玻璃板 A_1 背面反射后被 CCD 采集, 其像差可表达为

$$W_{mol}(x, y, \Delta L) = W'_1(x, y) - W'(x, y) = w(x, y) - w(x + \Delta L, y) + (W_{pi} - W_{xi}), \quad 0 \leq x \leq L_b, \quad (11)$$

(11)式与(5)式中的像差项相等。干涉仪测量所得平行玻璃板 A_1 和相位玻璃板 A_2 透射波像差 W_{pi} 、 W_{xi} 分别如图 7(a)、(b)所示, 宽高为 $L_b \times H$ (50 mm \times 200 mm)。

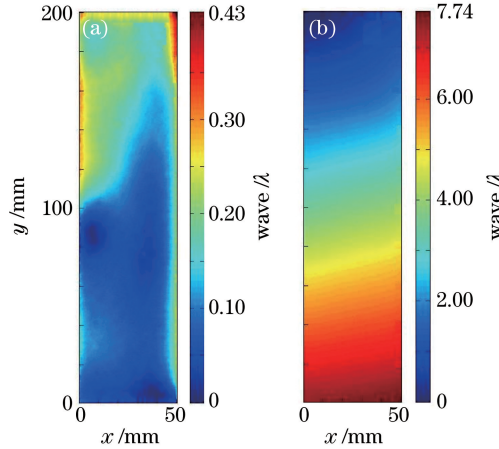


图 7 透射波面。(a) A_1 的像差;(b) A_2 的像差

Fig. 7 Transmission wave front. (a) Aberration caused by A_1 ; (b) aberration caused by A_2

图 6 所示黑色虚线框为曝光区域的系统像差, 宽高为 $L \times H$ (210 mm \times 200 mm)。 A_1 、 A_2 插入光路后投影至图 3 所示红色实线框区域。当 H_0 移动距离 $\Delta L = 0$ 时, 根据(10)式模拟得到干涉条纹图像与 CCD 采集的参考干涉条纹 C_0 相同, 如图 4(a)、8(a)所示。此时参考干涉条纹扭曲情况只与玻璃板 A_1 和 A_2 的透射波面像差 $W_{pi} - W_{xi}$ 有关。当 $\Delta L \neq 0$ 时, 参考干涉条纹形状因系统像差而发生变化, 其变化情况与 ΔL 相关。系统像差造成的拼接光栅衍射波面突变量为

$$\Delta w(y) = w(L_b + \Delta X_1, y) - w(L_b + \Delta X_1 + \Delta L, y) - (a_1 y + a_2), \quad (12)$$

式中 a_1 和 a_2 为常数, 对 $w(L_b - \Delta X_2, y) - w(L_b - \Delta X_2 + \Delta L, y)$ 直线拟合后所得。(12)式也是一组非线性数据, 对该数据进行直线拟合, 得到常数 b_1 和 b_2 , 其线性表达式为

$$\Delta w'(y) = b_1 y + b_2, \quad (13)$$

线性误差均可调节图 2 中空间滤波器 S_1 和 PZT 进行补偿, 将该误差叠加至(11)式得

$$W_{mol}(x, y, \Delta L) = w(x, y) - w(x + \Delta L, y) + (W_{pi} - W_{xi}) + \Delta w'(y), \quad (14)$$

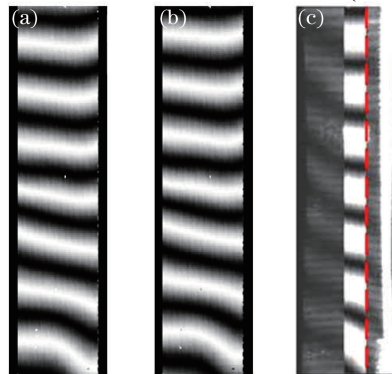


图 8 干涉条纹预制。(a) 干涉条纹 C_0 ; (b) 干涉条纹 C_{0y} ; (c) 干涉条纹 C_1 与 C_{0y} 对准

Fig. 8 Prefabricated interference fringe. (a) Fringe C_0 ; (b) fringe C_{0y} ; (c) fringe C_{0y} aligned by C_1

根据(14)式预制参考干涉条纹 C_{0y} , 如图 8(b)所示, 用其替代参考干涉条纹 C_0 , 作为光栅拼接参考, 补偿系统像差造成的拼接误差。

4 光栅拼接实验

曝光系统主透镜口径为 500 mm, 系统调节到最优情况下, 其有效区域像差峰谷(PV)值小于 0.3λ , 此时进行光栅拼接无法显示干涉条纹预制法的优越性^[10]。为使本系统像差能够接近更大口径曝光系统像差, 微调光路增加曝光系统像差, 曝光系统像差如图 6 所示, 像差 PV 值为 0.72λ 。拼接光栅口径为 $(210+190)$ mm \times 200 mm, 顶参考光栅 G_t 口径为 200 mm \times 50 mm。光栅曝光区域像差如图 6 黑色虚线框所示, 口径为 $L \times H$ (210 mm \times 200 mm), $L_b=50$ mm, $\Delta X_1=10$ mm, $\Delta X_2=20$ mm。

用 CCD 采集的参考干涉条纹 C_0 直接作为光栅拼接参考图像, 利用图 6 所示虚线框波面进行模拟拼接, 相当于图 3(b)所示光场记录波面在虚线处与第一次曝光记录波面对准, 则光栅记录波面在拼缝处的相位突变量如图 9 所示, 该误差主要由曝光系统像差造成, 最大突变量为 0.36λ , 均方根值为 0.28λ 。拼缝处的波面包含了明显的整体偏移和绕 x 轴方向的旋转。在光学系统中完成光栅掩模制作后将基片 H_0 放回原光路, 在图 2 光屏 S_0 上形成干涉条纹, 如图 10 所示。在拼缝处干涉条纹有明显错位, 右侧条纹比左侧条纹周期略宽, 光栅拼接误差最大值约为 0.45λ , 这个误差中包含了系统像差造成的误差和拼接调整时产生的误差。实验与模拟所得拼接误差值均很大, 确认了曝光系统像差较大情况下, 以 CCD 采集的干涉条纹 C_0 作为拼接参考时, 该拼接方法不能保障光栅拼接精度。光栅拼接误差与曝光系统像差、参考干涉条纹选取位置、拼缝位置及拼接调整误差均相关。

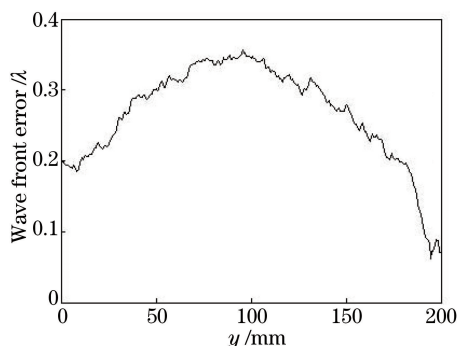


图 9 拼缝两侧衍射波面突变量模拟结果
Fig. 9 Simulated results of diffraction wave front on both sides of the seam

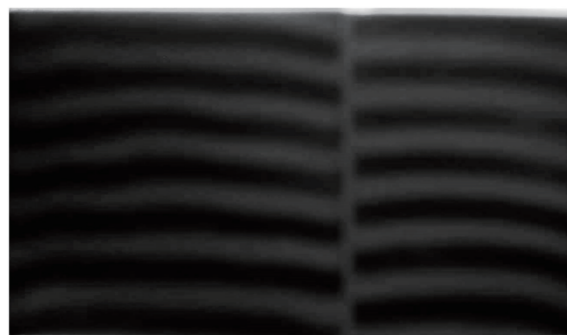


图 10 光栅拼缝附近的干涉条纹
Fig. 10 Interference fringe near the seam of tiled-grating

将计算机模拟得到的预制参考干涉条纹 C_{0y} 作为拼接参考图像, 如图 8(b)所示。光栅 G_1 拍摄完成后, 主基片 H_0 向左移动 $\Delta L=L-\Delta X_1-L_b$, 如图 3(b)所示。调节光栅基片和光路后, CCD 采集到实时干涉条纹 C_1 , 如图 4(b)所示, 微调光路使其在虚线处与预制干涉条纹 C_{0y} 对准, 如图 8(c)和图 3(b)所示, 然后对光栅 G_2 曝光。拼接光栅制作完成后得到如图 11 所示光栅掩模, 将其放回原光路, 得到如图 12 所示干涉条纹。在拼接处干涉条纹连续性较好, 说明光栅拼接误差较小。

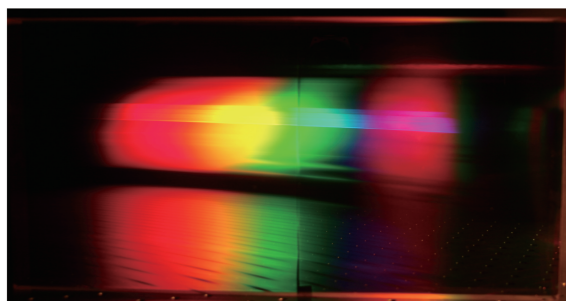


图 11 拼接光栅掩模图
Fig. 11 Mask of tiled-grating



图 12 拼接光栅形成的干涉条纹
Fig. 12 Interference fringe of the tiled-grating

用 Zygo 干涉仪测量得到如图 13 所示的光栅 -1 级衍射波面,其 PV 值为 1.15λ ,在拼缝处的波面突变量不明显。拼缝两侧衍射波面突变量如图 14(a)所示,其均方根值 $R_{ms} = 0.049\lambda$,峰-峰值为 0.097λ 。用计算机模拟拼接光栅两侧的衍射波面,使其波面突变量 R_{ms} 值最小,为 0.046λ ,峰-峰值为 0.117λ ,其突变量如图 14(b)所示。由模拟数据可知,拼缝两侧的衍射波面突变是无法完全消除的。与实验数据对比可知,干涉条纹预置法所得光栅衍射波面突变量已得到了很好的控制。

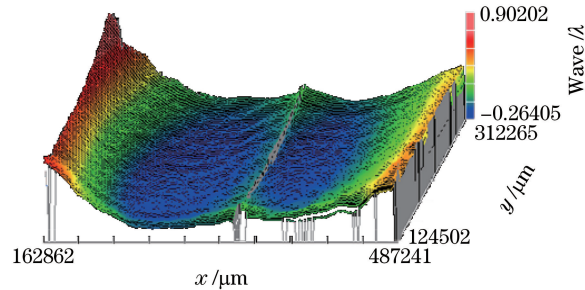


图 13 拼接光栅 -1 级衍射波面

Fig. 13 -1st order diffraction wave front of tiled-grating

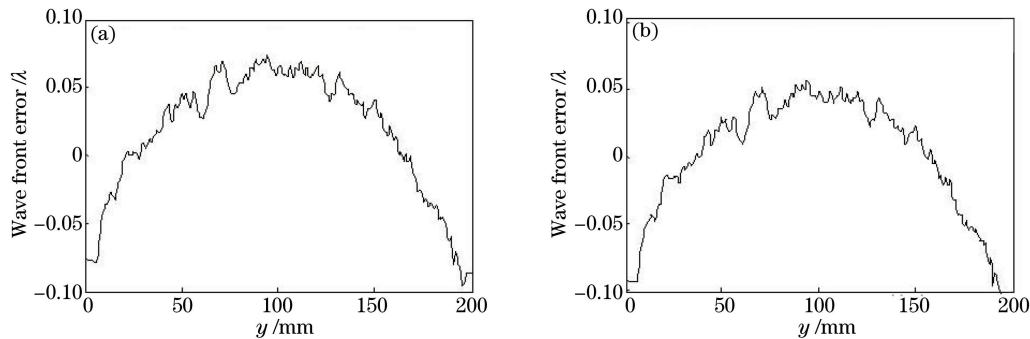


图 14 拼缝两侧衍射波面突变量。(a)实验结果;(b)理想结果

Fig. 14 Misplacement of diffraction wave front on both sides of the seam. (a) Experimental result; (b) ideal result

5 结 论

大口径光栅拼接系统的像差较大,当利用光学系统自身形成的干涉条纹作为光栅拼接参考时,拼接误差无法得到有效控制。将曝光系统像差预先设置到参考干涉条纹中,用其作为光栅拼接参考,达到了补偿光栅拼接误差的效果,降低了光栅拼缝处衍射波面突变量,解决了大像差情况下无法保障光栅拼接精度的问题,为制造米量级拼接光栅提供了技术保障。今后的工作将致力于解决光栅基片面形和曝光系统像差相互补偿的问题,以使光栅远场衍射光斑能量分布满足激光脉冲压缩的要求。

参 考 文 献

- [1] Jitsuno T, Motokoshi S, Okamoto T, *et al.* Development of 91 cm size gratings and mirrors for LEX laser system [C]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 112(3): 032002.
- [2] Britten J A, Jones L M, Carlson T C, *et al.* Enabling technology for fabrication of meter-scale gratings for high-energy petawatt lasers[C]. Third International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2003: 153261.
- [3] Habara H, Xu G, Jitsuno T, *et al.* Pulse compression and beam focusing with segmented diffraction gratings in a high-power chirped-pulse amplification glass laser system[J]. Optics Letters, 2010, 35(11): 1783-1785.
- [4] Zheng Wanguo, Deng Ying, Zhou Wei, *et al.* Development of laser technology in research center of laser fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3082-3090.
郑万国, 邓颖, 周维, 等. 激光聚变研究中心激光技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3082-3090.
- [5] Chvykov V, Yanovsky V. Precise alignment of large-aperture compressor gratings for high-power lasers by using diffraction interferometry[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009: JWB4.

- [6] Montoya J. Toward nano-accuracy in scanning beam interference lithography[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006: 28-50.
- [7] Zeng L, Li L. Optical mosaic gratings made by consecutive, phase-interlocked, holographic exposures using diffraction from latent fringes[J]. Optics Letters, 2007, 32(9): 1081-1083.
- [8] Shi L, Zeng L, Li L. Fabrication of optical mosaic gratings with phase and attitude adjustments employing latent fringes and a red-wavelength dual-beam interferometer[J]. Optics Express, 2009, 17(24): 21530-21543.
- [9] Qian Guolin, Wu Jianhong, Li Chaoming. The analysis of wave aberration of meter-sized mosaic-grating made in holographic exposure system[J]. Laser Journal, 2013, 34(5): 16-18.
钱国林, 吴建宏, 李朝明. 米级光栅全息曝光拼接系统像差分析[J]. 激光杂志, 2013, 34(5): 16-18.
- [10] Qian Guolin, Wu Jianhong, Li Chaoming, *et al.* Study of gratings tiled by holographic exposure with wave aberration [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0305002.
钱国林, 吴建宏, 李朝明, 等. 有像差情况下的全息光栅拼接研究[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0305002.
- [11] Turukhano B G, Gorelik V P, Kovalenko S N, *et al.* Phase synthesis of a holographic metrological diffraction of unlimited length[J]. Optics & Laser Technology, 1996, 28(4): 263-268.
- [12] Su Xianyu, Li Jitao. Information optics[M]. Beijing: Science Press, 1999: 145.
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 145.
- [13] Cotel A, Castaing M, Pichon P, *et al.* Phased-array grating compression for high energy chirped pulse amplification lasers[J]. Optics Express, 2007, 15(5): 2742-2752.
- [14] Bunkenburg J, Kessler T J, Skulski W., *et al.* Phase-locked control of tiled-grating assemblies for chirped-pulse-amplified lasers using a Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Letters, 2006, 31(10): 1561-1563.