

全息光栅并列拼接法的研究

钱国林^{1*}, 吴建宏², 李朝明²¹苏州市职业大学电子信息工程学院 & 江苏省光伏发电工程技术研究开发中心, 江苏 苏州 215104;²苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006

摘要 衍射波面像差及其远场衍射光场分布是大口径脉冲压缩光栅质量的重要体现。为进一步优化拼接光栅的远场光斑能量分布,提出了一种光栅并列拼接法。模拟了各种不同像差情况下的光栅并列拼接和光栅对准拼接案例,计算了对应波面的远场衍射光斑能量分布。统计结果表明,光栅并列拼接波面峰谷(PV)值比对准拼接波面PV值小。但光栅远场衍射光斑能量分布情况与像差种类、拼接方式均有关系。进行了全息光栅曝光拼接实验,结果表明光栅并列拼接法不仅可以降低光栅-1级衍射波面像差的PV值,也能够提高远场衍射光斑能量集中度,为全息拼接光栅提供了一种新的方法。

关键词 衍射; 光栅; 全息; 拼接光栅; 干涉条纹; 波像差

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2105002

Parallel Splicing Method for Holographic Gratings

Qian Guolin^{1*}, Wu Jianhong², Li Chaoming²¹College of Electronic and Information Engineering & Engineering Research and Development Center for Photovoltaic Technology of Jiangsu Province, Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, Jiangsu, China;²School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China

Abstract Diffracted wavefront aberration and distribution of far-field diffraction light are important manifestation for the quality of pulse compression gratings with a large aperture. In order to optimize the energy distribution of far-field light spots of splicing gratings, this paper proposes a parallel splicing method for gratings. Grating parallel splicing and grating aligned splicing are simulated under different aberrations, and the energy distribution of far-field diffraction light spots of the corresponding wavefront is calculated. The statistical results show that the peak valley (PV) value of the wavefront of gratings with parallel splicing is smaller than the that of gratings with aligned splicing. However, the energy distribution of the far-field scattering light spots of gratings is related to the type of aberrations and the modes of splicing. Experiments are carried out on gratings with holographic exposure splicing, and the results show that grating parallel splicing method can not only reduce the PV value of the -1st order diffracted wavefront aberration, but also improve the energy concentration of far-field diffraction light spots. Therefore, it provides a new method for holographic splicing gratings.

Key words diffraction; grating; holography; splicing grating; interference fringe; wavefront aberration

1 引言

大口径平面衍射光栅在天文光谱分析和超强啁啾脉冲激光系统等领域有着重要的作用^[1-4]。特别是超强超快激光系统的啁啾脉冲压缩器,其内部的激光束能量大、功率高,要求脉冲压缩光栅尺寸大、衍射效率高、波面像差小^[5-7]。为增加光栅口径,学者们提出了

各种光栅拼接方法,如机械拼接法^[8]、全息曝光拼接法^[9-11]和干涉条纹扫描曝光法^[12-13]等。

全息光栅拼接法通过二次或多次曝光获取较大口径的光栅掩模。在全息光栅拼接过程中,对光栅位置和角度的检测是核心工作。通常采用参考光栅与全息干涉光场形成的干涉条纹来检测光栅位置和角度,即光栅拼接参数。参考光栅可以采用独立基片光栅、同

收稿日期: 2022-02-23; 修回日期: 2022-04-21; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61178046)、苏州市职业大学青蓝工程(3170102)、苏州市职业大学光伏材料与器件创新团队(201804000061)

通信作者: *qgl_jy@jssvc.edu.cn

基片光栅或同基片潜像光栅。利用独立的参考光栅检测光栅拼接参数时,参考光栅与主光栅不在同一主基片上,容易产生相对位移和扭转现象,从而引入光栅拼接误差。将同一基片上前一次拍摄并显影的光栅作为后一次拍摄光栅时的参考光栅^[14],避免了参考光栅与主基片之间的相对移动,有利于提高光栅拼接精度。但拼接光栅依次显影增加了工艺上的复杂程度,也容易造成光栅掩模质量的下降。将同一基片上前一次拍摄但未显影的潜像光栅作为参考光栅^[11],既避免了参考光栅与主基片之间的相对移动,也避免了光栅分时显影的工艺步骤。因此本文采用潜像光栅作为参考光栅来检测光栅拼接参数。

目前全息光栅曝光拼接法的研究工作主要包括扩大光栅口径、提高光栅衍射效率及其均匀性、减小光栅衍射波面像差等。对于光栅衍射波面,最重要的指标之一是波像差小,要求远场衍射光斑能量的集中度高。根据夫琅禾费衍射理论,对于无像差系统,连续平面波对应着远场光斑最佳的能量集中度和最高斯特列尔比。实际上曝光系统像差必定存在,为使拼缝处的衍射波面保持较好的连续性,光栅对准拼接法中往往需要调整波面的倾斜度,但光栅整体衍射波面像差峰谷值往往会因此而增加^[9,11],特别是对于米级口径光栅,为保证其记录波面的连续性,记录的波面峰谷(PV)值增加量会更大。同时远场衍射光斑能量集中度和斯特列尔比并非一定是最佳值。为研究光栅拼接参数与衍射波面像差 PV 值、远场衍射光强分布之间的关系,提高全息光栅衍射波面质量,本文提出了全息光栅并列拼接法,该方法为进一步优化远场衍射光斑能量分布

提供参考。

2 全息光栅并列拼接方法

对准拼接法^[9]是全息光栅拼接中常用的方法,其评价参数主要包括拼缝处的衍射波面相位突变量、拼接光栅整体衍射波面像差、光栅远场衍射光斑的斯特列尔比和能量集中度等。如果采用拼缝处的衍射波面相位突变量来衡量光栅拼接质量,其最小值并不代表最高的斯特列尔比值和能量集中度。假如将对准拼接光栅的衍射波面进行微调,使其中一块子光栅在拼缝处的衍射波面倾斜角度或相位发生变化,那么其整体衍射波面像差可能会变小。虽然拼缝处的波面相位突变量会增加,但对应的远场衍射光斑能量集中度或斯特列尔比值可能会更高。为此,本文提出了光栅并列拼接方法,使全息曝光波面并列记录在同一基片表面,其表面两块子光栅记录的波面完全相同,为全息光栅拼接提供一种新的实施方案。

2.1 拼接光栅衍射波面模拟

全息光栅曝光系统像差^[15]可定义为

$$w(x, y) = A_1(x^2 + y^2) + A_2y(x^2 + y^2) + A_3x(x^2 + y^2) + A_4y^2 + A_5x^2 + A_6xy + A_7(x^2 + y^2), \quad (1)$$

式中: A_1 为球差系数, A_2 、 A_3 为慧差系数, A_4 、 A_5 、 A_6 为像散系数, A_7 为离焦系数。对光栅基片进行全息曝光,将光栅掩模 G_1 和 G_2 依次制作在同一光栅基片上,如图 1 所示,其中 d_1 、 d_2 为光栅 G_1 、 G_2 沿 x 轴方向的周期, $\Delta\theta$ 为光栅 G_1 、 G_2 栅线之间的夹角, Δx 为光栅 G_1 、 G_2 相邻栅线之间的间距, H 为基片高度、 $2L$ 为基片宽度,则光栅记录的波像差可表示为

$$w_p(x, y) = \begin{cases} 2\pi \cdot w(x, y) & 0 \leq x < L \\ 2\pi \cdot w(x - L, y) + ax + by + \Delta\varphi & L \leq x < 2L \end{cases}, \quad (2)$$

式中: a 为光栅 G_2 记录波面相对 G_1 记录波面绕 y 轴方向上的倾斜系数, $a = 1/d_1 - 1/d_2$, 即对应两光栅沿 x 轴方向上的周期误差; b 为光栅 G_2 记录波面相对 G_1 记录波面绕 x 轴方向上的倾斜系数, $b = \sin(\Delta\theta)/d_1$, 即对应光栅 G_1 、 G_2 沿 y 轴方向上的周期误差; $\Delta\varphi$ 为两子光栅之间的相位平移误差, $\Delta\varphi = 2\pi \text{mod}(\Delta x/d_1)$, 其中 $\text{mod}(\cdot)$ 为求余函数, L 为子光栅沿 x 轴方向的长度。如曝光系统无像差,系数 a 、 b 、 $\Delta\varphi$ 均等于 0 时,两子光栅的记录波面完全相同,其 -1 级衍射光是无像差的平面波。

在全息曝光系统中进行光栅对准拼接实验时,要求拼接光栅 G_1 、 G_2 记录波面在拼缝处保持连续,但是像差对其连续性有很大的影响。以口径为 $1400 \text{ mm} \times 420 \text{ mm}$ 的光栅基片为模拟拼接目标,假设要求光栅 -1 级衍射波像差 PV 值为 1λ 。按照随机误差合成原则^[16],将整体波像差平均分解为光栅基片面形像差和光栅记录波面像差两个部分,其 PV 值分别为 0.7λ 。图 2(a) 所示点划线框内为全息曝光系统的单口径波面像差模拟图,其口径为 $700 \text{ mm} \times 420 \text{ mm}$, 对应式

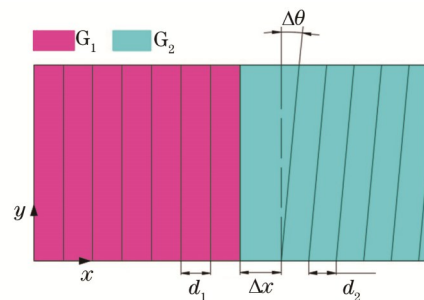


图 1 拼接光栅示意图

Fig. 1 Sketch of splicing grating

(1) 中慧差项 $A_3(x^2 + y^2)x$, 其像差 PV 值为 0.495λ 。为保证拼接处波面的连续性,需要微调光栅 G_2 记录波面的倾斜度和相位,对应式(2)中的 a 、 b 、 $\Delta\varphi$ 值。调整完毕后,得到如图 2(a) 所示实线框内的波面。光栅 G_1 、 G_2 整体的衍射波面像差 PV 值为 0.910λ , 该值明显大于单口径波面像差 PV 值 (0.495λ)。

如果使式(2)中的 $a = 0$ 、 $b = 0$ 、 $\Delta\varphi = 0$, 那么子光栅

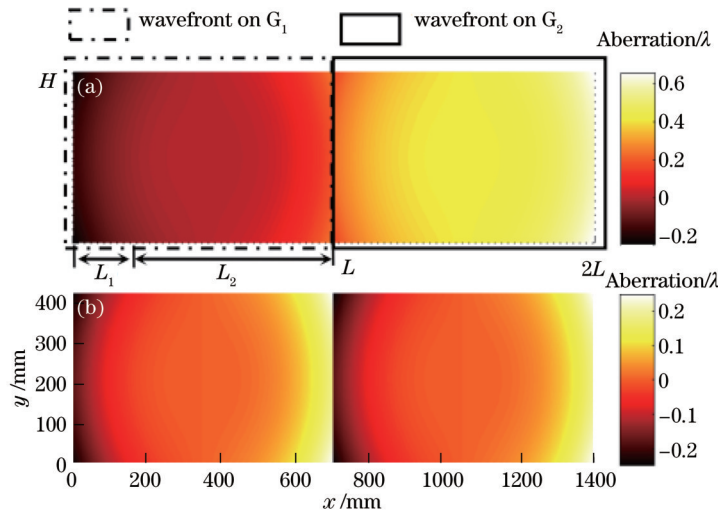


图 2 彗差波面拼接。(a)对准拼接模式;(b)并列拼接模式

Fig. 2 Coma wave surface splicing. (a) Aligned splicing mode; (b) parallel splicing mode

G_1 、 G_2 记录的波面完全一样,如图 2(b)所示,称之为光栅并列拼接,整体拼接衍射波面像差 PV 值为 0.495λ ,与单口径曝光系统像差 PV 值相等,如表 1 所示。此时,并列拼接模式所记录的波像差明显下降。

对式(1)中像散项 A_{xy} 进行模拟,单口径波面像差 PV 值为 0.495λ 。图 3(a)所示为对准拼接波面,其整体像差 PV 值为 1.44λ 。图 3(b)所示为并列拼接波面,其整体像差 PV 值为 0.495λ 。对准拼接波面像差 PV 值明显大于并列拼接波面像差 PV 值,其主要原因是:为了保证拼接处波面的连续性,对准拼接时将 G_2 记录波面倾斜度进行调节,导致总波面像差 PV 值急剧增加。如以光栅衍射波面像差 PV 值大小来评价光

表 1 不同拼接模式下的光栅拼接评价参数

Table 1 Evaluation parameters of grating splicing under different modes

Splicing mode	Aberration expression	PV/ λ	Energy ratio	Strehl ratio
Aligned splicing mode	$(x^2+y^2)x$	0.890	0.759	0.918
	xy	1.440	0.700	0.331
Parallel splicing mode	$(x^2+y^2)x$	0.495	0.682	0.808
	xy	0.495	0.738	0.752

栅拼接质量时,光栅并列拼接方式明显优于光栅对准拼接方式。

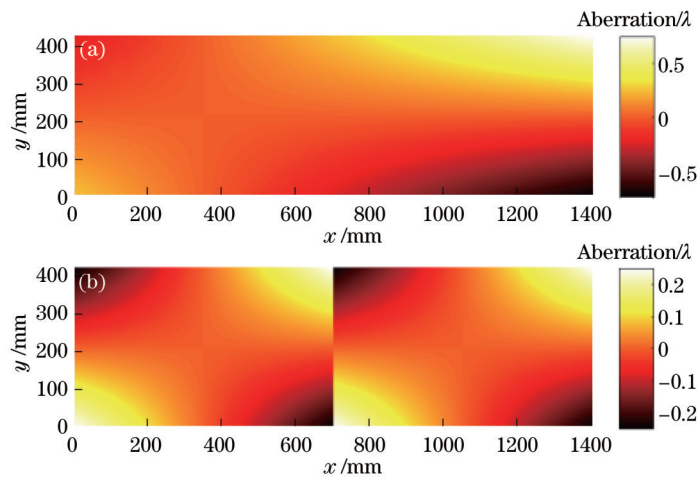


图 3 像散波面拼接。(a)对准拼接模式;(b)并列拼接模式

Fig. 3 Astigmatic wave surface splicing. (a) Aligned splicing mode; (b) parallel splicing mode

2.2 拼接光栅远场衍射光斑模拟

根据夫琅禾费衍射理论^[17]计算各种像差情况下拼

接光栅-1级衍射波面的远场光强分布,其表达式为

$$I(x_1, y_1, f) = K \left| \iint_{-L \cos \alpha, -H/2}^{L \cos \alpha, H/2} \left\{ \exp \left\{ -j[w_p(x, y) + w_j(x, y)] \right\} \exp \left[-\frac{j2\pi}{f\lambda} (x_1 x + y_1 y) \right] \right\} dx dy \right|^2, \quad (3)$$

式中： $w_p(x, y)$ 为拼接光栅记录的波面像差； $w_j(x, y)$ 为光栅基片面形引入的像差； K 为常数； f 为凸透镜焦距； λ 为入射于光栅的平行光波长； α 为-1级衍射光出射角。

对图 2、图 3 所示 4 种拼接波面的远场衍射光分布进行模拟，得到如图 4 所示的光强分布情况。图 4(a)为仅有慧差[对应的像差表达式为 $(x^2+y^2)x$]时对准拼接-1级衍射波面的远场光强分布情况。图 4(b)为仅考虑慧差(对应的像差表达式为 xy)时并列拼接光栅-1

级衍射波面远场光斑的光强分布情况。与对准拼接相比较，并列拼接的远场衍射光斑能量比、斯特列尔比值均相对较低。此时，对准拼接的波面远场衍射光斑能量集中度和斯特列尔比明显优于并列拼接。图 4(c)为仅考虑像散时对准拼接的远场衍射光强分布情况。图 4(d)为对应并列拼接波面的远场衍射光强分布情况。在仅考虑像散项时，并列拼接波面的远场衍射光斑能量集中度和斯特列尔比明显优于对准拼接方式。表 1 为不同拼接模式下的光栅拼接评价参数。

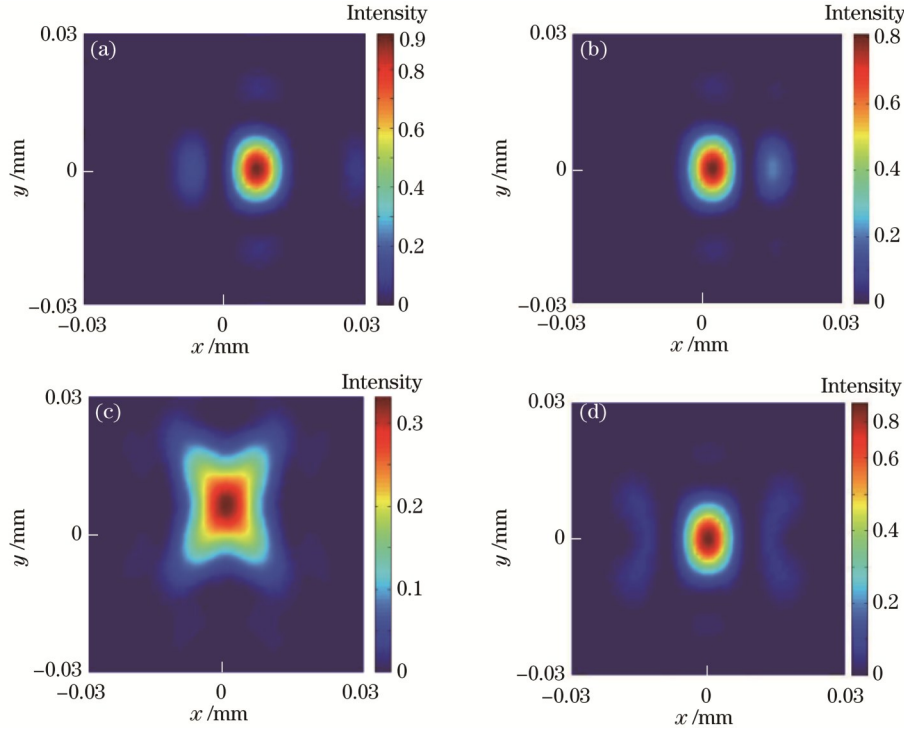


图 4 拼接波面远场衍射光强分布。(a)带慧差时的对准拼接模式；(b)带慧差时的并列拼接模式；(c)带像散时的对准拼接模式；(d)带像散时的并列拼接模式

Fig. 4 Distributions of far-field diffraction light intensity for splicing wavefront. (a) Aligned splicing mode with coma; (b) parallel splicing mode with coma; (c) aligned splicing mode with astigmatism; (d) parallel splicing mode with astigmatism

实际光学系统里存在着多种像差，设单口径波面像差 PV 值为 0.495λ ，根据式 (1) 和随机误差合成原则^[16]，将各种像差随机进行组合，合成 500 组不同的波面像差案例，每组波面口径为 $700\text{ mm} \times 420\text{ mm}$ ，并将这些波面分别模拟拼接成 $1400\text{ mm} \times 420\text{ mm}$ 口径。将模拟所得拼接波面像差 $w_p(x, y)$ 与基片面形像差

$w_j(x, y)$ 叠加，基片面形像差 PV 值为 0.7λ 。根据式 (3) 模拟远场衍射光场分布，整理得到如表 2 所示的对准拼接和并列拼接两种模式下的统计数据。从表 2 中可得：并列拼接波面 PV 值相对较小，且并列拼接的斯特列尔比相对略高一些。

表 2 不同模式下的光栅拼接评价参数统计

Table 2 Statistics for evaluation parameters of grating splicing under different modes

Splicing mode	Statistics value	PV/ λ	Energy ratio	Strehl ratio
Aligned splicing mode	Mean value	0.830	0.629	0.556
	Maximum probability	0.870	0.656	0.520
Parallel splicing mode	Mean value	0.772	0.624	0.577
	Maximum probability	0.820	0.647	0.619

通过以上结果分析可得，在曝光系统像差无法确定时，对准拼接波面 PV 值比并列拼接波面 PV 值大，但无法确认哪种拼接模式下的远场衍射光斑能量比更

大，也无法确定哪种模式下的斯特列尔比值更大。这说明光栅远场衍射光斑能量分布情况并非由 PV 值唯一决定，像差种类、拼接方式均会影响远场衍射光斑能

量分布。根据对 500 组不同波面像差拼接的统计数据,并列拼接模式所得拼接波面的 PV 值更小,远场衍射光斑的斯特列尔比值略大,而能量比值相差不大。所以从统计角度来说,如果以拼接波面 PV 值、远场衍射光斑斯特列尔比作为拼接光栅的评价指标,并列拼接模式优于对准拼接模式。

2.3 并列拼接参考干涉条纹预制原理

光栅拼接时需要利用参考干涉条纹对其相位误差 $\Delta\varphi$ 、倾斜度误差 $\Delta\theta$ 和周期误差 Δd ($\Delta d=d_2-d_1$) 进行检测和调整。常用的方法有参考光栅检测法^[9]和潜像光

栅检测法^[11]。在完成全息光栅 G_1 拍摄时,如图 5 所示,光刻胶内部已经形成微弱的折射率调制,即潜像光栅。所以在拍摄光栅 G_2 时,可以将光栅 G_1 边缘的部分潜像光栅作为参考光栅,通过插入平行玻璃板 M_1 和楔形玻璃板 M_2 ,形成参考干涉条纹 C ,如图 5 所示,可将其用于检测光栅拼接参数。参考干涉条纹的像差可表示为

$$W_c(x, y, \Delta L) = w(x, y) - w(x + \Delta L, y) + \Psi(x, y) + a_0x + b_0y + c_0, \quad 0 \leq x \leq L_1, \quad (4)$$

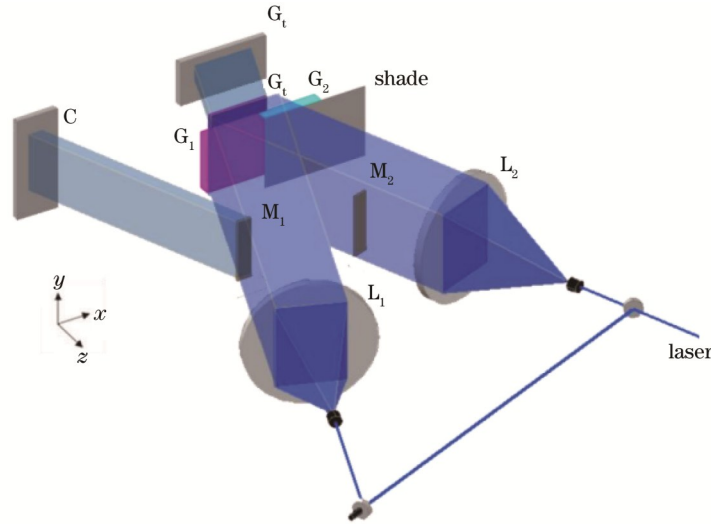


图 5 拼接光栅光路示意图
Fig. 5 Light path of splicing grating

式中: ΔL 为拍摄光栅 G_1 后、拍摄光栅 G_2 前基片沿 x 轴方向移动的距离; $w(x, y)$ 为曝光系统像差; L_1 为参考干涉条纹 C 的宽度; $\Psi(x, y)$ 为潜像光栅产生参考干涉条纹时引入的像差; a_0, b_0, c_0 为初始化参数,在模拟参考干涉条纹时,可以根据需要对其进行适当修改,以使光栅拼接参数满足光栅整体衍射波面的要求。参考干涉条纹表达式为

$$I(x, y, \Delta L) = 1 + \cos\{2\pi[w(x, y) - w(x + \Delta L, y) + \Psi(x, y)] + a_0x + b_0y + c_0\}, \quad 0 \leq x \leq L_1. \quad (5)$$

3 全息光栅拼接实验

3.1 光栅并列拼接

光栅拼接实验所用光栅基片口径为 $400 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。为模拟米量级光栅拼接,将曝光实验系统像差略微调大。在拍摄子光栅 G_1 时,其口径为 $210 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。完成光栅 G_1 拍摄后且基片未移动时,用电荷耦合器件 (CCD) 采集零位参考干涉条纹图像 C_0 ,如图 6(a) 所示,即图 5 中条纹 C ,其宽度 $L_1=60 \text{ mm}$ 。此时式 (5) 中的 $\Delta L=0$,微调 a_0, b_0, c_0 ,根据式 (5) 模拟得到如图 6(b) 所示的干涉条纹 C_{0m} ,它与图 6(a) 条纹相同,完成预制干涉条纹的初始化。由于此时潜像光

记录波面和曝光波面相同,所以两像差刚好相互抵消。此时干涉条纹的周期、相位和扭曲程度仅由式 (5) 中的 $\Psi(x, y)$ 确定。

拍摄子光栅 G_2 前需要将基片沿 x 轴方向移动距离

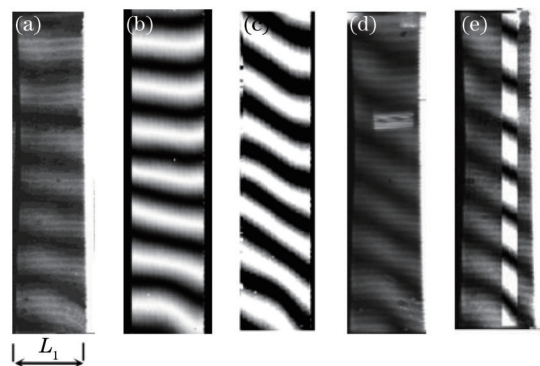


图 6 并列拼接模式下的参考干涉条纹 C 。(a) 零位条纹 C_0 ;
(b) 模拟零位条纹 C_{0m} ;(c) 预制条纹 C_{0B} ;(d) 实时条纹 C_1 ;
(e) 实时条纹 C_1 与预制条纹 C_{0B} 对准锁定

Fig. 6 Reference interference fringes C for parallel splicing mode. (a) Initial fringe named C_0 ; (b) simulated initial fringe named C_{0m} ; (c) prefabricated fringe named C_{0B} ; (d) real time fringe named C_1 ; (e) prefabricated fringe C_{0B} aligned with real time fringe C_1

$\Delta L=L_2=150\text{ mm}$ 。按照光栅并列拼接要求,光栅 G_1 、 G_2 记录波面相同,即拼接波面像差完全一样,此时式(2)中 $a=0$ 、 $b=0$ 、 $\Delta\varphi=0$ 。利用零位干涉条纹 C_{0m} 和预先测量得到的曝光系统像差数据,初始化式(5)中的参数 a_0 、 b_0 、 c_0 ,获取预制参考干涉条纹 C_{0b} ,如图 6(c)所示,并将其作为光栅并列拼接时的参考标准。由于潜像光栅记录波面与曝光波面叠加时的错位距离 ΔL 已达 150 mm ,此时干涉条纹的周期、相位和扭曲程度不仅受式(5)中 $\Psi(x,y)$ 的影响,还受左右光场像差的影响。左右边缘光场的像差叠加后无法相互抵消,所以形成的干涉条纹相位、周期及倾斜度均发生了明显变化。

微调光栅基片姿态,CCD 相机可采集到实时干涉条纹 C_1 ,如图 6(d)所示。在对光栅 G_2 曝光前,将实时条纹 C_1 与图 6(c)所示预制参考条纹 C_{0b} 对准锁定,如图 6(e)所示,其中对比度较高的窄长竖条纹是静止参考图像 C_{0b} ,对比度较为模糊的部分图像是实时条纹 C_1 。

光栅拼接完成后对基片显影,得到如图 7 所示的光栅掩模照片,将其放回原光路可得如图 8 所示的干涉条纹,拼接处条纹明显未对齐,说明拼接处波面错位的相位差较大。利用 Zygo 干涉仪测量其 -1 级衍射光,得到如图 9 所示的波面,其峰谷值 PV1 为 0.718λ ,如表 3 所示。利用 Zygo 干涉仪测量得到光栅 ± 1 级衍射波面数据,将其处理后得到去除基片面形后的 -1 级衍射波面,即光栅记录的并列拼接波面,如图 10(a)所示,其峰谷值 PV2 为 0.584λ 。受潜像参考光栅区域、工艺边等实验上的限制,并列拼接区域宽度只有 150 mm ,如图 10(a)中点划线区域和实线区域所示。理论上,并列拼接时点划线框和实线框的波面是完全一致的,对于两区域波面各自左边缘对应的相位错位值,其错位均方根 R_{ms} 值为 0。但实际拼接过程中无法做到两区域波面完全一致,且由于测量误差存在等因素,两区域波面各自左边缘对应的相位错位均方根 R_{ms} 值为 0.046λ ,如表 3 所示。

根据式(2)对该波面右半侧实线框的并列拼接波面进行微调,得到优化过的模拟并列拼接波面,如图 10(b)所示,整体波面 PV2 值为 0.562λ 。点划线框和实线框左边缘相位错位均方根 R_{ms} 值为 0.012λ ,如表 3 所示。通过对比实验数据和模拟数据可以得到本次光栅并列拼接误差为两者之差,等于 0.034λ 。

3.2 光栅对准拼接

光栅对准拼接的实验步骤与并列拼接基本一致。

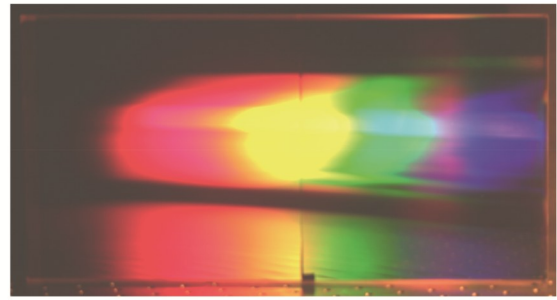


图 7 并列拼接光栅掩模照片
Fig. 7 Mask of parallel splicing grating

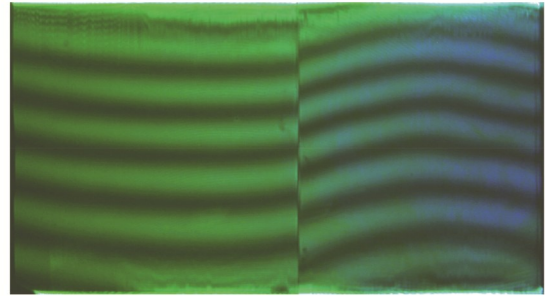


图 8 并列拼接光栅的干涉条纹
Fig. 8 Interference fringe of parallel splicing grating

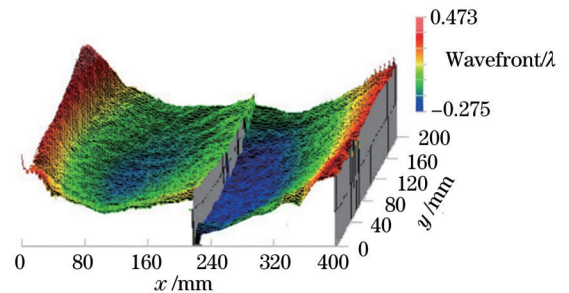


图 9 并列拼接光栅 -1 级衍射波面
Fig. 9 -1 st order diffraction wavefront of parallel splicing grating

为保持光栅基片面形引入像差的一致性,对准拼接所用光栅基片与并列拼接所用光栅基片为同一块。拍摄第一块子光栅 G_1 时 $\Delta L=0$,根据式(5)模拟零位干涉条纹图像 C_{0m} ,使其与 CCD 采集的零位干涉条纹图像 C_0 相同,完成模拟干涉条纹图像的初始化。

拍摄光栅 G_2 前需要将基片沿 x 轴方向移动距离 $\Delta L=L_2=150\text{ mm}$ 。按照光栅对准拼接要求,根据式(2)将参数 a 、 b 、 $\Delta\varphi$ 进行微调,以使拼接处两光栅衍射

表 3 两种拼接模式的实验数据汇总

Table 3 Summary of experimental data for two splicing modes

Splicing mode	PV1	PV2	R_{ms}	Energy ratio	Strehl ratio
Parallel splicing mode in experiment	0.718λ	0.584λ	0.046λ	0.533	0.429
Parallel splicing mode in simulation	0.703λ	0.562λ	0.012λ	0.558	0.443
Aligned splicing mode in experiment	1.150λ	1.060λ	0.049λ	0.479	0.381
Aligned splicing mode in simulation	1.130λ	1.040λ	0.046λ	0.486	0.388

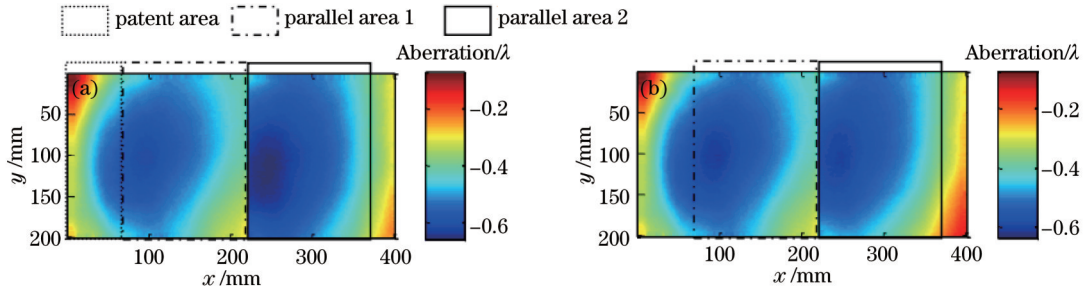


图 10 并列拼接光栅记录的波面。(a)实验结果;(b)模拟结果

Fig. 10 Recorded wavefront of parallel splicing gratings. (a) Experimental result; (b) simulated result

波面尽量保持连续,在这里以波面错位均方根值为参考标准。利用零位参考干涉条纹 C_0 和预先测量得到的曝光系统像差数据,继续微调式(5)中的参数 a_0, b_0, c_0 , 补偿系统像差引入的拼接误差,获取参考干涉条纹模拟图像,将其作为光栅对准拼接时的参考标准^[9]。

将光栅显影后放回原光路,得到如图 11 所示的干涉条纹,拼接处的条纹基本对准,说明拼接处的波面连续性较好。用 Zygo 干涉仪测量该光栅 -1 级衍射光,得到如图 12 所示的波面, PV 值为 1.15λ。通过 Zygo 干涉仪测量光栅 ±1 级衍射波面数据。将数据处理后得到去除基片面形后的 -1 级衍射波面,即光栅记录的对准拼接波面,如图 13 所示,其 PV 值为 1.06λ, 中间拼接处衍射波面错位均方根值为 0.049λ。利用该波面数据进行模拟对准拼接,得到拼接处衍射波面错位均方根值为 0.046λ, 该值由系统像差造成,为理论上的最小值。所以去除系统像差造成的波面错位成分,实际对准拼接误差均方根值为 0.003λ。

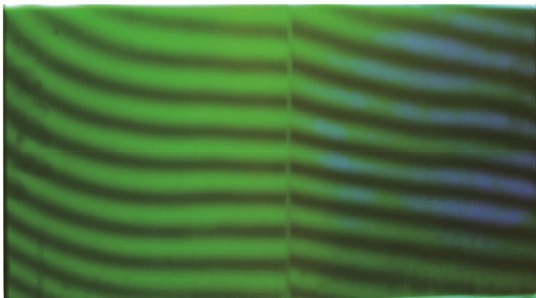


图 11 对准拼接光栅的干涉条纹

Fig. 11 Interference fringes of aligned splicing grating

4 分析与讨论

为进一步研究光栅对准拼接与并列拼接的差异,对两种拼接方式的光栅远场衍射光场分布进行计算。光栅衍射波面测量波长 $\lambda_1=632.8\text{ nm}$, 光栅使用波长 $\lambda_2=1053\text{ nm}$, 光栅 -1 级衍射波面可表示为

$$w_y(x, y) = \frac{w_{+1}(x, y) - w_{-1}(x, y)}{2} + \frac{w_{+1}(x, y) + w_{-1}(x, y)}{2\cos\beta_1} \frac{\lambda_1 \cos\beta_2}{\lambda_2 \cos\beta_1}, \quad (6)$$

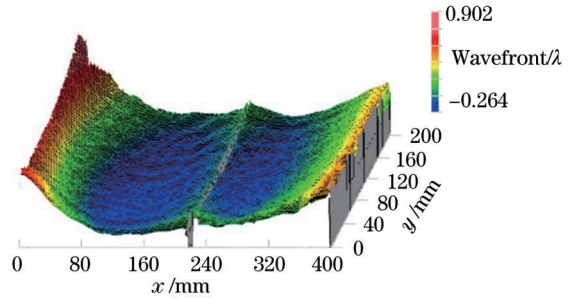


图 12 对准拼接光栅的 -1 级衍射波面

Fig. 12 -1st diffraction wavefront of aligned splicing grating

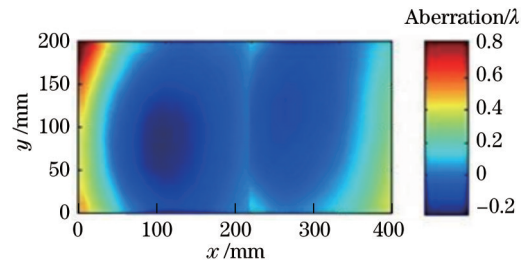


图 13 对准拼接光栅记录的波面

Fig. 13 Recorded wavefront of aligned splicing grating

式中: β_1 为测量光 -1 级衍射角; $w_{+1}(x, y)$ 为光栅 +1 级衍射波面; $w_{-1}(x, y)$ 为光栅 -1 级衍射波面; β_2 为使用光 -1 级衍射角。式(6)右边第一项表达式为光栅记录波面像差, 第二项为基片面形引入的波面像差。将该波面数据代入式(3), 计算拼接光栅远场衍射光斑能量分布情况。并列拼接光栅的远场衍射光强分布如图 14(a) 所示, 其能量比为 53.3%, 斯特列尔比为 42.9%, 如表 3 第 1 行所示。对实验所得记录波面进行并列拼接模拟优化, 得到的最佳并列拼接光栅远场衍射光强如图 14(b) 所示, 其能量比为 55.8%, 斯特列尔比为 44.3%, 如表 3 第 2 行所示。对准拼接光栅的远场衍射光强分布如图 14(c) 所示, 其能量比为 0.479, 斯特列尔比为 0.381。对实验所得记录波面进行对准拼接模拟优化, 最佳对准拼接光栅的远场衍射光强分布如图 14(d) 所示, 其能量比为 0.486, 斯特列尔比为 0.388。

将拼接光栅 -1 级衍射波面像差 PV 值、衍射波面错位均方根值 R_{ms} 、远场光斑能量比和斯特列尔比汇总后得到如表 3 所示数据。由表 3 可知: 并列拼接光栅

-1 级衍射波面 PV 值明显小于对准拼接 PV 值;无论是对准拼接还是并列拼接,衍射波面错位 R_{ms} 值均小于 0.05 个波像差;在本实验系统的像差情况下,并列拼

接光栅的远场衍射光斑能量比和斯特列尔比值明显优于对准拼接光栅,证实了并列拼接光栅的远场衍射光斑能量分布优于对准拼接光栅的可能性。

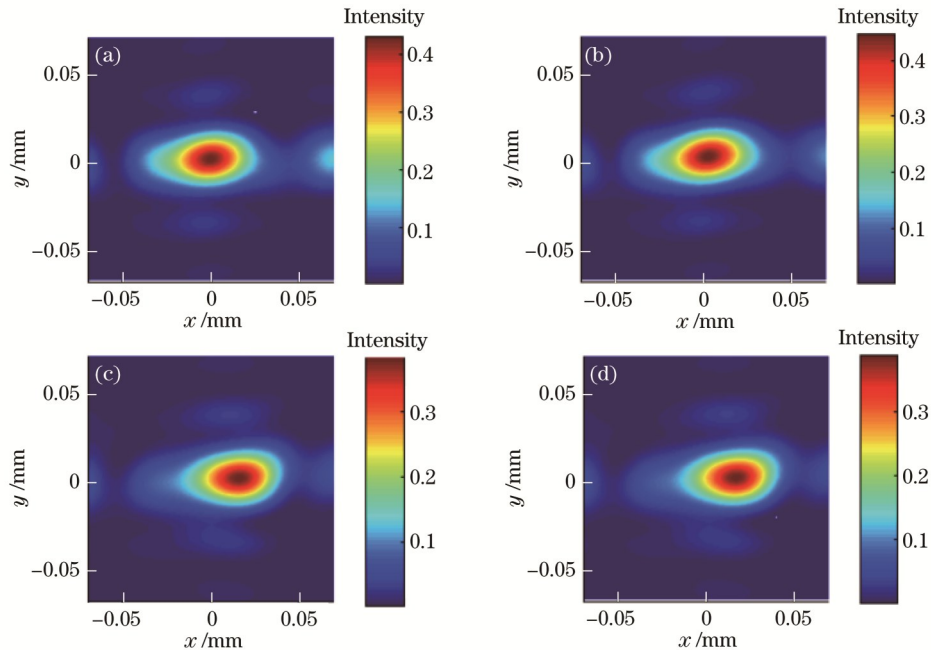


图 14 拼接光栅远场衍射光强分布。(a)实验并列拼接;(b)模拟并列拼接;(c)实验对准拼接;(d)模拟对准拼接

Fig. 14 Distributions of far-field diffraction light intensity for splicing grating. (a) Parallel splicing in experiment; (b) parallel splicing in simulation; (c) aligned splicing in experiment; (d) aligned splicing in simulation

5 结 论

在全息光栅拼接中,相对于光栅对准拼接法,并列拼接法可以有效抑制光栅拼接导致的衍射波面像差 PV 值增加。在不同全息曝光系统像差的情况下,无法确定哪种拼接方式的远场衍射光斑能量更集中,但在像差确定的曝光系统中,可以根据系统像差和光栅基片面形来选择合适的拼接方式,以提高光栅远场衍射光斑能量的集中度。光栅并列拼接法为减小光栅衍射波面像差 PV 值、优化其远场衍射光斑能量分布提供了新的解决方法。下一步工作将致力于对光栅并列拼接法的工艺化,并实施更大口径的光栅并列拼接实验,为米级光栅拼接提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 杨国军, 齐向东, 于海利, 等. 大尺寸反射式光栅拼接技术的研究进展[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 542-551.
Yang G J, Qi X D, Yu H L, et al. Development of mosaic technology for large-size reflective gratings[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(3): 542-551.
- [2] Mi X T, Qi X D, Zhang S W, et al. High-quality and large-area echelle grating ruled on 500-mm ruling engine for the fiber array solar optical telescope (FASOT)[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 38268-38279.
- [3] Jitsuno T, Motokoshi S, Okamoto T, et al. Development of 91 cm size gratings and mirrors for LEX laser system[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 112(3): 032002.
- [4] Liu S J, Xu L B, Zhang X, et al. Precision measurement methods of wavefront error for meter-size planar optical components applied to ICF systems[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11552: 1155202.
- [5] Qiao J, Kalb A, Nguyen T, et al. Demonstration of large-aperture tiled-grating compressors for high-energy, petawatt-class, chirped-pulse amplification systems[J]. Optics Letters, 2008, 33(15): 1684-1686.
- [6] 韩建, 姜明达, 张凯, 等. 基于干涉条纹傅里叶分析技术对拼接光栅调整偏角的计算分析[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0311001.
Han J, Jiang M D, Zhang K, et al. Fourier-transform method for analyzing angular errors from interferograms for mosaic grating alignment[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0311001.
- [7] Xie L Y, Zhang J L, Zhang Z Y, et al. Rectangular multilayer dielectric gratings with broadband high diffraction efficiency and enhanced laser damage resistance [J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2669-2678.
- [8] Cong M, Qi X D, Xu J, et al. Analysis and removal of five-dimensional mosaicking errors in mosaic grating[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 1968-1980.
- [9] 李朝明, 吴建宏, 陈新荣, 等. 脉冲压缩光栅光学拼接方法研究[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1943-1946.
Li C M, Wu J H, Chen X R, et al. Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression

- mosaic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1943-1946.
- [10] Turukhano B G, Gorelik V P, Kovalenko S N, et al. Phase synthesis of a holographic metrological diffraction grating of unlimited length[J]. *Optics & Laser Technology*, 1996, 28(4): 263-268.
- [11] Ma D H, Zhao Y X, Zeng L J. Achieving unlimited recording length in interference lithography via broad-beam scanning exposure with self-referencing alignment [EB/OL]. (2017-03-21) [2017-04-19]. <https://www.nature.com/articles/s41598-017-01099-3.pdf>.
- [12] 宋莹, 赵旭龙, 姜岩秀, 等. 移栅型全息光栅曝光干涉条纹锁定[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0509001.
Song Y, Zhao X L, Jiang Y X, et al. Interference fringe locking by grating-shifting holographic grating exposure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0509001.
- [13] Liu Z W, Yang H, Li Y B, et al. Active control technology of a diffraction grating wavefront by scanning beam interference lithography[J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 37066-37074.
- [14] Zhou F, Wu J H, Su Y F, et al. A judgement method for mosaic grating error based on diffraction wavefront measured under multiple incident angles[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11170: 1117010.
- [15] 于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
Yu M W. *Optical holography and its applications*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996.
- [16] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 7 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
Fei Y T. *Error theory and data processing*[M]. 7th ed. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [17] 梁铨廷. 物理光学[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.
Liang Q T. *Physical optics*[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2008.