

可用于四波横向剪切干涉波前检测的随机编码混合光栅设计

岳秀梅 杨甬英 凌 瞳 刘 东 罗言东 白 剑 沈亦兵

浙江大学光电信息工程学系现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 提出了一种可用于四波横向剪切干涉波前检测的随机编码混合光栅。由期望得到的四波前衍射频谱出发, 根据夫琅禾费衍射原理并结合光通量约束的随机编码方法得到了由振幅编码光栅和棋盘式相位光栅构成的随机编码混合光栅, 与改进的哈特曼模板(MHM)相比, 其衍射场中只有四个级次, 更好地实现了四波横向剪切干涉。分析确定了入射光束口径、光栅栅距以及观察距离等系统参数。分别给出了随机编码混合光栅和MHM的远场衍射光场分布及四波横向剪切干涉图, 对比发现随机编码混合光栅的远场衍射光场中只有四个等光强的光斑存在, 其四波横向剪切干涉图稳定, 可以实现任意畸变的波前检测。

关键词 测量; 随机编码混合光栅; 夫琅禾费衍射; 四波横向剪切干涉

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.1008006

Design of Randomly Encoded Hybrid Grating for Wavefront Testing by Quadriwave Lateral Shearing Interferometry

Yue Xiumei Yang Yongying Ling Tong Liu Dong Luo Yandong Bai Jian Shen Yibing

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract A new type of randomly encoded hybrid grating for wavefront testing by quadriwave lateral shearing interferometry is proposed. The randomly encoded hybrid grating which includes an amplitude encoded grating and a phase chessboard is obtained according to the Fraunhofer diffraction principle and the randomly coding method based on the quantization of radiant flux. Compared with the modified Hartmann mask (MHM), only four diffraction orders exist in its diffraction field, and the quadriwave lateral shearing interferometry is better achieved. System parameters such as the incident beam diameter, grating pitch and the distance from the grating to the imaging plane are analyzed and determined. Comparing the far-field intensity distribution and quadriwave lateral shearing interferograms of the randomly encoded hybrid grating with MHM, results show that only four spots with equal intensity exist in the far-field diffraction of the randomly encoded hybrid grating; the shearing interferogram is stable, and it is capable of detecting arbitrary wavefront aberrations.

Key words measurement; randomly encoded hybrid grating; Fraunhofer diffraction; quadriwave lateral shearing interferometry

OCIS codes 120.3180;050.1950;010.7350

1 引 言

横向剪切干涉技术利用待测波前自身进行错位干涉^[1], 从而实现对波面相位的直接测量, 由于它采用共

收稿日期: 2015-04-23; 收到修改稿日期: 2015-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(11275172、61475141)、现代光学仪器国家重点实验室资助项目(MOI2015B06)、航空科学基金(20140376001)

作者简介: 岳秀梅(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事瞬态波前检测研究。E-mail: yuexiumei2010@126.com

导师简介: 杨甬英(1954—), 女, 博士, 教授, 主要从事精密测试与计量技术、光电信息传感与纳米技术、气动光学及瞬态波前检测等方面的研究。E-mail: chuyyy@zju.edu.cn (通信联系人)

路系统,无需参考光束,因此干涉条纹稳定,抗干扰能力强,仪器结构简单,可用于短相干长度的光束质量检测。基于以上优点,横向剪切干涉技术常用于光学材料及元件的检验与测量、光束性能与参量的探测、光学系统校准、检验与评价等。

传统的横向剪切干涉仪^[2-3]以平板或棱镜作为波前分光器件,需要两路光学系统以产生绝对正交的沿 x 、 y 方向剪切的横向剪切干涉图,系统结构较为复杂。交叉光栅横向剪切干涉仪^[4-9]采用二维交叉光栅作为分光元件,可以同时沿 x 方向和 y 方向发生衍射,产生不同级次的衍射光,然后级次选择窗口对衍射光进行选择,使得只有 x 、 y 方向的 ± 1 级光通过,其他级次光被遮挡,最后通过级次选择窗口的四束光波之间发生剪切干涉。交叉光栅横向剪切干涉仪虽然可以直接得到两正交方向的剪切干涉图,实现瞬态波前的实时检测,但是级次选择窗口的存在导致系统调整结构复杂,仪器调节过程中需要保证只有 x 、 y 方向的 ± 1 级光通过窗口,其他级次完全被遮挡,因此对仪器调节机构精度要求高、调整难度大,而且级次选择窗口的大小会影响可测量的波前畸变范围。此外,级次选择窗口的位置和大小也会对四束光波之间的横向剪切干涉造成影响,从而降低瞬态波前检测的精度。现在常见的四波横向剪切干涉仪利用改进的哈特曼模板(MHM)作为分光元件^[10-15],不需要级次选择窗口也可获得待检测波前的相位信息。其中分光元件MHM由棋盘式相位光栅和振幅光栅组成,相位光栅周期是振幅光栅周期的2倍,并且振幅光栅占空比为2:3,MHM的衍射光场中偶级次光和 ± 3 倍级衍射光能够很好地被消除,但是 ± 5 、 ± 7 、 ± 11 等高级次衍射光仍然存在并影响 ± 1 级之间的横向剪切干涉,导致不同观察位置处干涉图对比度明显不同^[10,13],因此只能在有限的泰伯距离及其整数倍处进行波前检测,限制了剪切率的选择。

本文提出了一种基于随机编码混合光栅的四波横向剪切干涉波前检测系统,并对随机编码混合光栅展开了深入研究,介绍了随机编码混合光栅的设计原理以及编码方法,并将其夫琅禾费衍射光场分布与MHM、相位光栅进行对比,发现随机编码混合光栅的衍射场中只有四个级次存在;依据光栅方程并结合几何关系,分析确定了入射光束口径、光栅栅距以及观察距离等系统参数;分别给出了实验获得的随机编码混合光栅和MHM的远场光斑分布及四波横向剪切干涉图,体现了随机编码混合光栅在四波横向剪切干涉中的明显优势。

2 随机编码混合光栅设计

基于随机编码混合光栅的四波横向剪切干涉波前检测系统主要由随机编码混合光栅和CCD组成,其中随机编码混合光栅包括振幅编码光栅和棋盘式相位光栅,如图1所示。待检测波前经过随机编码混合光栅发生衍射,在两正交方向上分别产生 ± 1 级衍射光,最后这四束衍射光在传播的过程中相互错位发生干涉,利用CCD接收其剪切干涉图。

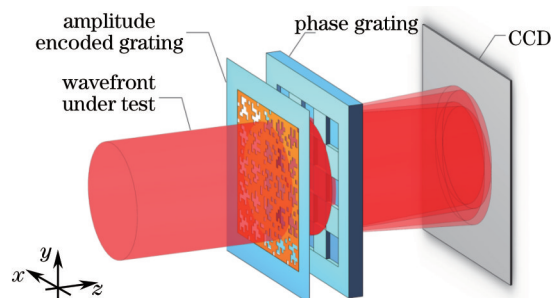


图1 基于随机编码混合光栅的四波横向剪切干涉系统

Fig.1 System layout of lateral shearing interferometer based on randomly encoded hybrid grating

CCD像面上获得的干涉图两相互正交方向的横向剪切干涉图,对干涉图进行傅里叶变换获取频谱图,分别取两正交方向的 $+1$ 级频谱进行滤波,再进行逆傅里叶变换,分别提取这两个方向的剪切差分干涉图,最后经过差分泽尼克拟合即可重构出待检测波前^[7-8]。

理想的四波横向剪切干涉要求光栅的衍射场中只有四个等光强的级次存在,据此从期望得到的理想衍射频谱出发,根据夫琅禾费衍射原理并结合光通量约束的随机编码方法可以得到由振幅编码光栅和棋盘式相位光栅组成的随机编码混合光栅。另外入射光束口径、光栅栅距以及观察距离影响着剪切率以及波前检

测结果,是横向剪切干涉系统的重要参数,需要在研究过程中加以考虑。

2.1 随机编码混合光栅原理

由于夫琅禾费衍射的实质是光栅透射率函数的傅里叶变换,据此可以采用逆推法对期望得到的光栅衍射频谱进行逆傅里叶变换,进而得到光栅透射率函数。在四波横向剪切干涉系统中,期望得到的光栅衍射频谱分布 $T(f_x, f_y)$ 为

$$T(f_x, f_y) = \delta\left(f_x - \frac{1}{d}, f_y - \frac{1}{d}\right) + \delta\left(f_x - \frac{1}{d}, f_y + \frac{1}{d}\right) + \delta\left(f_x + \frac{1}{d}, f_y - \frac{1}{d}\right) + \delta\left(f_x + \frac{1}{d}, f_y + \frac{1}{d}\right), \quad (1)$$

式中 $f_x = \lambda/x$, $f_y = \lambda/y$ 是空间坐标 (x, y) 的傅里叶共轭坐标, λ 是入射光波长, d 为光栅栅距。对(1)式进行逆傅里叶变换,得到衍射场中只有四个级次存在的理想光栅的透射率 $t_{id}(x, y)$ 为^[11,16]

$$t_{id}(x, y) = \cos\left(\frac{2\pi x}{d}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi y}{d}\right). \quad (2)$$

(2)式表明理想光栅的透射率介于 ± 1 之间,其可以被分解为透射率介于 0 和 1 之间的振幅光栅和两台阶棋盘式相位光栅,即

$$\begin{aligned} t_a(x, y) &= \left| \cos\left(\frac{2\pi x}{d}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi y}{d}\right) \right|, \\ t_p(x, y) &= \left\{ \text{rect}\left(\frac{2x}{d}\right) * \left[\text{comb}\left(\frac{2x}{d}\right) \exp(2j\pi x/d) \right] \right\} \\ &\quad \left\{ \text{rect}\left(\frac{2y}{d}\right) * \left[\text{comb}\left(\frac{2y}{d}\right) \exp(2j\pi y/d) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $t_a(x, y)$ 、 $t_p(x, y)$ 分别表示振幅光栅和相位光栅的透射率,*表示卷积,(3)式表明振幅光栅透射率介于 0 和 1 之间并按照 $\left| \cos\left(\frac{2\pi x}{d}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi y}{d}\right) \right|$ 函数分布;棋盘式相位光栅的相位分别为 0 、 $-\pi$,栅距为 d 。

传统的振幅光栅制作方法是设计光路利用全息方法获得余弦分布的光场^[17],但是(3)式中振幅光栅透射率并不是严格按照余弦分布,而是余弦函数的绝对值,很难设计光路制作此类光栅,但是可以采用基于光通量约束的随机编码方法生成二值化振幅光栅来近似代替^[16,18]。首先对计算机仿真得到的振幅光栅透射率分布进行均匀网格划分,位于第 ξ 行第 η 列的网格用坐标对 (ξ, η) 标记,并将每个网格细分为 $M \times M$ 个像元,其中像元是编码过程中采用的最小编码单位,可以是边长为 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 的正方形,然后根据透射率分布公式计算出所有网格中所有像元中心位置处的透射率,位于第 p 行第 q 列的像元透射率记为 $t_a(x_p, y_q)$,而网格 (ξ, η) 处的平均透射率用其细分得到的 $M \times M$ 个像元透射率的平均值表示,即

$$\bar{t}_a(\xi, \eta) = \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M t_a(x_{M\xi-M+i}, y_{M\eta-M+j}). \quad (4)$$

最后对每个网格中的 M^2 个像元进行 0 和 1 随机编码,使得每个网格中编码为 1 的像元个数与 M^2 之比约为该网格的平均透射率大小。图 2 是编码原理举例示意图,其中图 2(a)为振幅光栅单个周期的透射率分布,图

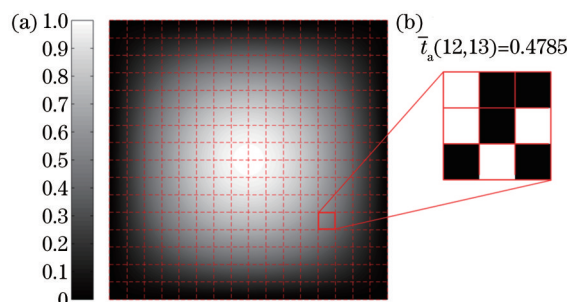


图 2 编码原理示意图。(a) 振幅光栅单个周期的透射率分布;(b) 某一网格的编码结果

Fig.2 Schematic diagram of coding theory. (a) One period transmittance distribution of amplitude grating; (b) coding results of the grid in Fig.2 (a)

2(b)是根据图 2(a)中某网格的平均透射率得到的该网格对应的编码结果,图 2(b)中白色区域表示编码为 1,黑色区域表示编码为 0。

图 3(a)是利用基于光通量约束的随机编码方法生成的振幅编码光栅,其透射率按照 $\left| \cos\left(\frac{2\pi x}{d}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi y}{d}\right) \right|$ 函数分布,像元尺寸为 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$,图 3(b)为其局部放大图,图 3(c)是(3)式中与振幅编码光栅对应的棋盘式相位光栅,二者组合构成了随机编码混合光栅。其中相位光栅的栅距为随机编码混合光栅栅距,振幅编码光栅的栅距为随机编码混合光栅栅距的 1/2。

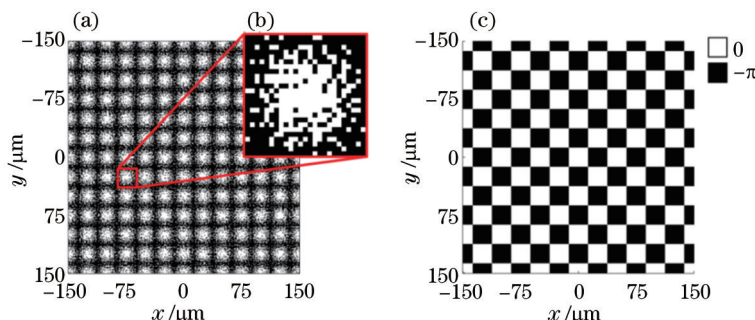


图 3 随机编码混合光栅。(a) 振幅编码光栅透射率分布;(b) 振幅编码光栅的局部放大;(c) 相位光栅相位分布

Fig.3 Randomly encoded hybrid grating. (a) Transmittance distribution of amplitude encoded grating; (b) zoom on a part of Fig.3(a); (c) phase distribution of phase grating

为衡量随机编码混合光栅的衍射效果,并将其与理想光栅进行对比,采用平面波入射光栅发生夫琅禾费衍射

$$U(x,y) = \frac{1}{j\lambda L} \exp(jkL) \exp\left[\frac{jk}{2L}(x^2 + y^2)\right] \mathcal{F}[t(x,y)], \quad (5)$$

式中 $t(x,y)$ 为光栅透射率, $\mathcal{F}[t(x,y)]$ 表示光栅透射率函数的傅里叶变换,波数 $k = 2\pi/\lambda$ 表示单位长度上产生的位相变化, L 为观察距离,即 CCD 接收面与光栅之间的距离。分别将相同尺寸相同栅距的理想光栅、随机编码混合光栅、MHM、相位光栅的透射率代入(5)式,可以得到相同观察距离处其夫琅禾费衍射级次分布。图 4 为光栅夫琅禾费衍射归一化光强的一维分布图,图中横坐标为空间频率,以 $1/d$ 为一个单位,纵坐标为归一化光强。

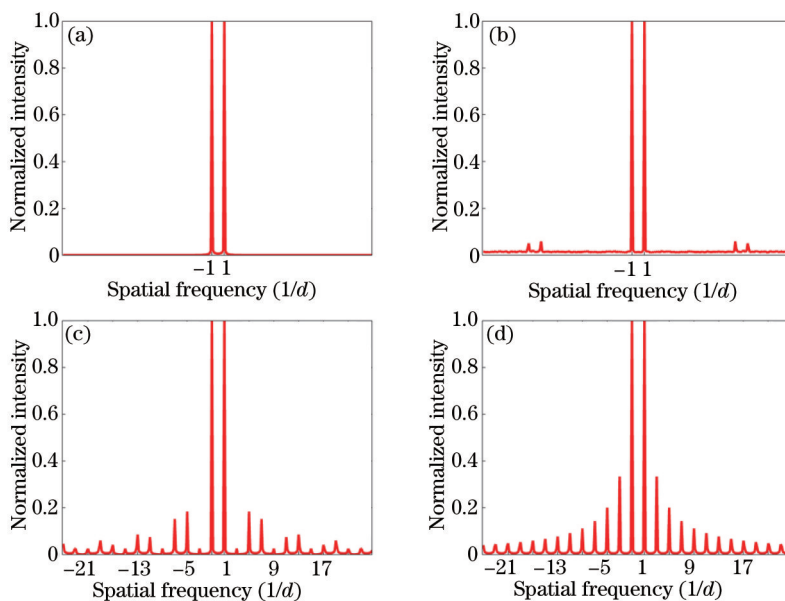


图 4 夫琅禾费衍射归一化光强一维分布图。(a) 理想光栅;(b) 随机编码混合光栅;(c) MHM;(d) 相位光栅

Fig.4 One dimensional normalized intensity distribution of Fraunhofer diffraction. (a) Ideal grating; (b) randomly encoded hybrid grating; (c) MHM; (d) phase grating

比较图4中四种光栅的夫琅禾费衍射归一化光强分布,发现随机编码混合光栅的衍射光场中只存在 ± 1 级光,绝大部分高级次光被消除,虽然存在一些量化噪声,但是与现在常用的MHM、相位光栅相比,其衍射效果更加接近理想光栅。比较图4(b)与图4(d),发现相同栅距的随机编码混合光栅和相位光栅的 ± 1 级衍射角相同,说明光栅方程衍射理论同样适用于随机编码混合光栅。

2.2 基于随机编码混合光栅的四波横向剪切干涉系统参数的确定

入射光束口径 D 、光栅栅距 d 以及观察距离 L 是四波横向剪切干涉系统的重要参数^[19],直接影响剪切干涉的剪切率和测量结果,因此需要先确定这些系统参数。

平行光入射随机编码混合光栅的系统结构如图5所示,由于随机编码混合光栅中振幅编码光栅和相位光栅分别加工在两个石英片上,而且石英片本身有一定的厚度,所以实验中需要将振幅编码光栅的编码面与相位光栅的刻蚀面贴合。图5(a)为系统结构在 $yo z$ 平面上的投影图,其中 D 为入射光束口径, H 为石英衬底的厚度, L 为干涉图接收装置与光栅的距离即观察距离, θ_{+1} 为 $+1$ 级衍射光的衍射角, θ'_{+1} 为 $+1$ 级光在石英衬底和空气分界面处的折射角,也是 $+1$ 级光最终的出射角,图中 A 、 B 、 C 、 E 为四束衍射光斑的上下边界在 $yo z$ 平面上的投影,根据几何关系得 $\overline{AB} = \overline{CE}$ 。

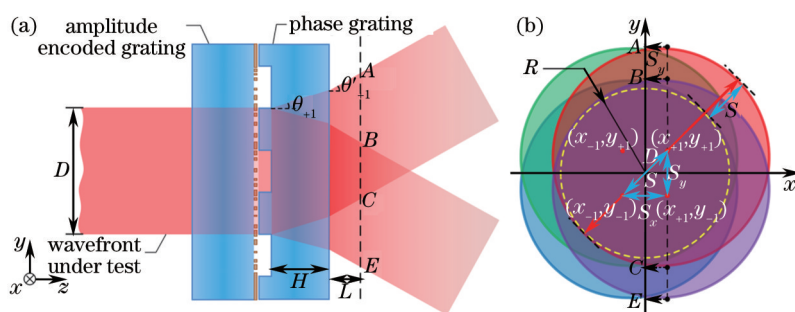


图5 平行光入射随机编码混合光栅的系统结构图。(a)系统结构在 $yo z$ 平面上的投影图;(b)衍射波前分布

Fig.5 System structure diagram of plane wave incident on the randomly encoded hybrid grating.

(a) Projection of system structure in the $yo z$ plane; (b) diffraction wavefronts distribution of randomly encoded hybrid grating

根据光栅方程和折射定律

$$\begin{cases} d \sin \theta_{+1} = \lambda \\ n \sin \theta_{+1} = \sin \theta'_{+1} \end{cases} \quad (6)$$

式中 n 为熔石英衬底折射率,结合图5(a)中的几何关系,得到

$$\overline{AB} = 2L \tan \left[\arcsin \left(n \frac{\lambda}{d} \right) \right] + 2H \tan \left[\arcsin \left(\frac{\lambda}{d} \right) \right]. \quad (7)$$

图5(b)为随机编码混合光栅的衍射波前分布图,由于位于中心原点的0级光被消除,即 x 、 y 轴上不存在衍射光,所以衍射场中四个主级次波前不是位于坐标轴上,而是对称分布在坐标轴对角线上,图5以及所述的级次 (x_i, y_j) 均表示该级次在 x 方向上位于第 i 级、在 y 方向上位于第 j 级。与图5(a)对应,图5(b)中衍射光斑大小为 D , (x_{+1}, y_{+1}) 级与 (x_{-1}, y_{-1}) 级光斑中心的距离 S 为四波横向剪切干涉的剪切量, S_x 、 S_y 分别为 x 方向、 y 方向剪切量, A 、 B 、 C 、 E 为四束衍射光斑的上下边界在 y 方向上的投影,由几何关系得到 y 方向剪切量 $S_y = \overline{AB} = \overline{CE}$,图5(b)中 R 为四束光波剪切干涉重合区域的内切圆半径。根据剪切量的定义结合图5(b)中的几何关系,得到四波横向剪切干涉的剪切量 S 为

$$S = D - 2R. \quad (8)$$

则剪切率 β 可以表示为

$$\beta = \frac{D - 2R}{D}. \quad (9)$$

四束光波剪切干涉区域大小受CCD感光面尺寸的限制,实验中为了充分利用CCD,需要将四束光波的重合区域充满CCD的感光面,所以 R 为定值。分析(9)式发现,在干涉重合区域一定的情况下,剪切率只与入射光束口径大小有关系。

由于随机编码混合光栅衍射级次分布具有对称性,根据图 5(b)中几何关系可得剪切量 $S = \sqrt{2}S_y$, 结合 (7)、(8)式及几何关系 $S_y = \overline{AB}$ 得到入射光束口径 D 与光栅栅距 d 、观察距离 L 之间的关系为

$$D - 2R = 2\sqrt{2} \left\{ L \tan \left[\arcsin \left(n \frac{\lambda}{d} \right) \right] + H \tan \left[\arcsin \left(\frac{\lambda}{d} \right) \right] \right\}. \quad (10)$$

实验中采用的 CCD 感光面尺寸为 $6.4 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$, 所以 $2R = 4.8 \text{ mm}$ 。根据(9)式得到剪切率 β 与入射光束口径 D 之间的关系曲线如图 6(a)所示,剪切率随着入射光束口径的增大而非线性增大,综合考虑测量口径和灵敏度,一般取剪切率 $\beta = 0.1$,即保证全口径有 90%的波前参与干涉,则相应的入射光束口径在 5~6 mm。图 6(b)为根据(10)式得到的不同入射光束口径下观察距离 L 与光栅栅距 d 之间的关系曲线,其中石英折射率 $n = 1.46$,衬底厚度 H 为毫米量级,激光器波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,发现光束口径相同时观察距离与光栅栅距呈线性关系,并且光束口径越大,线性斜率越大。图 6(c)为入射光束口径 $D = 6 \text{ mm}$,观察距离 $L = 3 \text{ cm}$ 时,根据(9)与(10)式得到的剪切率 β 与栅距 d 之间的关系曲线,剪切率 β 随着栅距 d 的增大而非线性减小,综合考虑剪切率和光栅尺寸的限制,栅距可取 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ 。

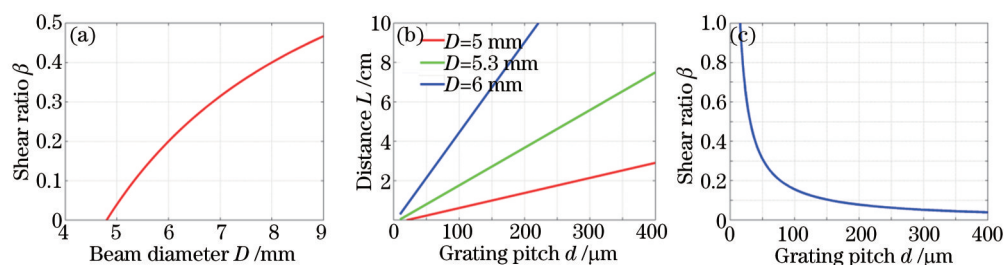


图 6 (a) 剪切率与栅距关系曲线;(b) 不同光束口径时观察距离与栅距的关系;(c) 剪切率与栅距关系曲线

Fig.6 (a) Relationship between shear ratio and beam diameter; (b) relationship between the distance from the grating to the imaging plane and grating pitch with different beam diameters; (c) relationship between the grating pitch and the shear ratio

另外,随机编码混合光栅栅距的大小影响着横向剪切干涉仪的波前检测能力^[20],剪切波前斜率与栅距 d 之间的关系为

$$\left[\frac{\partial(\Delta W_x)}{\partial x} \right]_{\max} < 2 \frac{\lambda}{d}, \quad (11)$$

式中 ΔW_x 为 x 方向剪切波前,对 y 方向剪切波前斜率的分析同上。(11)式表明,光栅栅距越小,可检测的最大剪切波前斜率越大,但是受到编码方案的限制,随机编码混合光栅的栅距相对偏大,因此基于随机编码混合光栅的四波横向剪切干涉仪可检测的剪切波前斜率也受到一定限制,当栅距 $d = 100 \mu\text{m}$ 时,可检测的剪切波前最大梯度约为 0.0127 rad 。

3 实验结果

根据前述对随机编码混合光栅栅距参数的分析制作振幅编码光栅和棋盘式相位光栅,其中振幅编码光栅的编码像元尺寸为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 。图 7(a)和(b)分别是利用金相显微镜得到的振幅编码光栅局部版面图和利用台阶仪测得的栅距为 $120 \mu\text{m}$ 的相位光栅的剖面图,图 7(a)中黑色部分表示透光区域,白色部分为铬膜

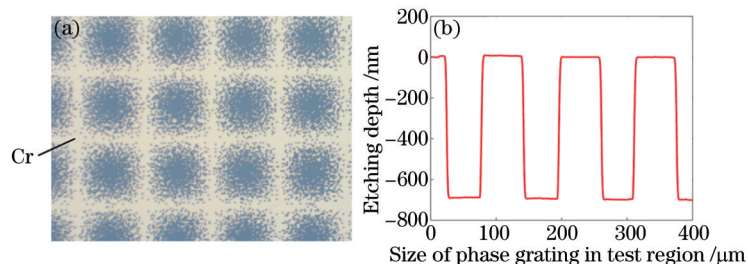


图 7 (a) 振幅编码光栅局部版面图;(b) 利用台阶仪测得的相位光栅剖面图

Fig.7 (a) Part of the manufactured amplitude encoded grating; (b) sectional view of the manufactured phase grating tested by step tester

覆盖区域,即不透光区域。

为验证上述对随机编码混合光栅夫琅禾费衍射的理论分析和计算机仿真的正确性,体现随机编码混合光栅在四波横向剪切干涉中的优势,根据第2节所述的横向剪切干涉原理搭建图1所示的实验系统,实验中采用的激光器波长 λ 为632.8 nm,光束口径为6 mm,将栅距为180 μm 的随机编码混合光栅和MHM分别置于系统中获得相应的实验结果。远距离观察处得到的随机编码混合光栅和MHM的衍射光斑分布如图8(a)和(f)所示,随机编码混合光栅的远场衍射光场中只有四个等光强的光斑存在,而MHM的远场衍射光场中还存在 $(x_{\pm 5}, y_{\pm 1})$ 、 $(x_{\pm 1}, y_{\pm 5})$ 、 $(x_{\pm 7}, y_{\pm 1})$ 、 $(x_{\pm 1}, y_{\pm 7})$ 等其他级次;图8(b)和(g)分别为近距离观察处得到的基于随机编码混合光栅和MHM的四波横向剪切干涉图,为便于比较,将干涉图局部放大,其中图8(c)、(d)、(e)为不同观察距离处得到的基于随机编码混合光栅的四波横向剪切干涉图的局部放大,图8(h)、(i)、(j)为相应观察距离处得到的基于MHM的四波横向剪切干涉图的局部放大,比较发现基于MHM的四波横向剪切干涉图随观察距离的变化而变化,不同观察位置处干涉图对比度明显不同,只能在有限的泰伯距离及其整数倍处进行波前检测,而基于随机编码混合光栅的四波横向剪切干涉图,条纹均匀稳定,对比度维持在0.933左右,并且干涉图不随观察距离的变化而产生周期性的泰伯效应。

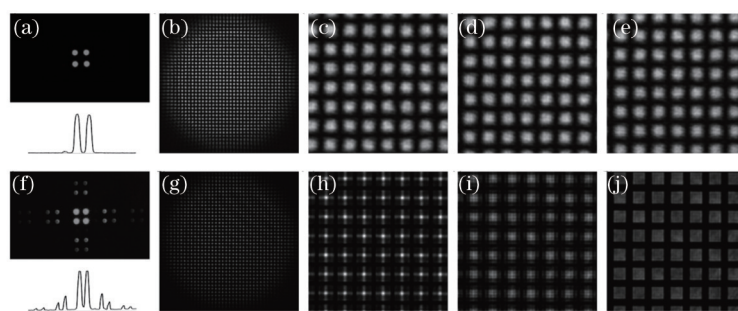


图8 实验结果。(a)和(f)分别为随机编码混合光栅、MHM的远场光斑分布;(b)和(g)分别为基于随机编码混合光栅和MHM的四波横向剪切干涉图;(c)、(d)和(e)分别为不同观察距离处基于随机编码混合光栅的四波横向剪切干涉图的局部放大;(h)、(i)和(j)分别为相应观察距离处基于MHM的四波横向剪切干涉图的局部放大

Fig.8 Experimental results. (a) and (f) are the far-field intensity distribution of randomly encoded hybrid grating and MHM, respectively; (b) and (g) are the quadriwave lateral shearing interferograms based on randomly encoded hybrid grating and MHM, respectively; (c), (d) and (e) are the zoom on a part of the quadriwave lateral shearing interferograms based on randomly encoded hybrid grating with different distances from the grating to the imaging plane, respectively; (h), (i) and (j) are the zoom on a part of the quadriwave lateral shearing interferograms based on MHM with different distances from the grating to the imaging plane, respectively

4 结 论

提出了一种可用于四波横向剪切干涉波前检测的随机编码混合光栅,其衍射光场中只有四个等光强级次存在,较好地实现了四波横向剪切干涉。详细介绍了随机编码混合光栅的设计原理及光栅栅距等系统参数的确定方法。利用计算机仿真得到随机编码混合光栅夫琅禾费衍射级次分布,并与MHM、相位光栅进行对比,体现了随机编码混合光栅在四波横向剪切干涉中的明显优势。实验验证了随机编码混合光栅的远场衍射场中只有四个等光强的光斑存在,并且基于随机编码混合光栅的四波横向剪切干涉图条纹稳定,不随观察距离的变化产生周期性的泰伯效应,相比于交叉光栅横向剪切干涉仪可以实现任意畸变的波前检测。

本文提出的随机编码混合光栅夫琅禾费衍射光场中只有四个级次,较好地实现了四波横向剪切干涉,因此基于随机编码混合光栅的四波横向剪切干涉仪不仅结构紧凑、仪器调节简单、干涉条纹稳定,而且可以实现任意畸变的波前检测,可用于波前传感、光刻投影物镜波像差测量等领域。

参 考 文 献

- 1 Peng Aihua, Ye Hongwei, Li Xinyang. Effect of aperture distribution on wavefront recovery of lateral shearing interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0401002.
彭爱华, 叶红卫, 李新阳. 孔径分布对横向剪切干涉仪波前复原的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0401002.

- 2 M Murty. The use of a single plane parallel plate as a lateral shearing interferometer with a visible gas laser source[J]. Appl Opt, 1964, 3(4): 531-534.
- 3 Liu Lei, Zeng Aijun, Zhu Linglin, *et al.*. Lateral shearing interferometer for the wavefront test of small beam[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108003.
刘 蕾, 曾爱军, 朱玲琳, 等. 可用于小口径光束波前检测的横向剪切干涉仪[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108003.
- 4 K Sugisaki, M Okada, K Otaki, *et al.*. EUV wavefront measurement of six-mirror optic using EWMS[C]. SPIE, 2008, 6921: 69212U.
- 5 Fang Chao, Xiang Yang. A thirteen-step phase restoration algorithm in lateral shearing interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508003.
方 超, 向 阳. 十三步光栅横向剪切干涉相位复原算法[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508003.
- 6 Lei Sun, Dong Liu, Tong Ling, *et al.*. Mathematical modeling analysis on a small and compact two-dimensional CGLSI interference system[C]. SPIE, 2013, 8840: 88400N.
- 7 Tong Ling, Dong Liu, Lei Sun, *et al.*. Wavefront retrieval for cross-grating lateral shearing interferometer based on differential Zernike polynomial fitting[C]. SPIE, 2013, 8838: 88380J.
- 8 Tong Ling, Yongying Yang, Xiumei Yue, *et al.*. Common-path and compact wavefront diagnosis system based on cross grating lateral shearing interferometer[J]. Appl Opt, 2014, 53(30): 7144-7152.
- 9 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chunsheng. Simultaneous phase-shifting interferometry based on two-dimension grating[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 663-667.
左 芬, 陈 磊, 徐春生. 基于二维光栅分光的同步移相干涉测量技术[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 663-667.
- 10 Jérôme Primot, Nicolas Guérineau. Extended Hartmann test based on the pseudoguiding property of a Hartmann mask completed by a phase chessboard[J]. Appl Opt, 2000, 39(31): 5715-5720.
- 11 JCF Chanteloup, M Cohen. Compact, high resolution, four wave lateral shearing interferometer[C]. SPIE, 2004, 5252: 282-292.
- 12 Pierre Bon, Guillaume Maucort, Benoit Wattellier, *et al.*. Quadriwave lateral shearing interferometry for quantitative phase microscopy of living cells[J]. Opt Express, 2009, 17(15): 13080-13094.
- 13 Julien Rizzi, Timm Weitkamp, Nicolas Guérineau, *et al.*. Quadriwave lateral shearing interferometry in an achromatic and continuously self-imaging regime for future x-ray phase imaging[J]. Opt Lett, 2011, 36(8): 1398-1400.
- 14 Sabrina Velghe, Jérôme Primot, Nicolas Guérineau. Wave-front reconstruction from multidirectional phase derivatives generated by multilateral shearing interferometers[J]. Opt Lett, 2005, 30(3): 245-247.
- 15 Hai Wang, Yanqiu Li, Ke Liu. Approach to characterize manufacture tolerances of two-dimensional cross-phase grating[J]. Opt Eng, 2013, 52(10): 104101.
- 16 Tong Ling, Dong Liu, Xiumei Yue, *et al.*. Quadriwave lateral shearing interferometer based on a randomly encoded hybrid grating[J]. Opt Lett, 2015, 40(10): 2245-2248.
- 17 Huang Dekang, Cao Wanghe, Zhu Maohua, *et al.*. Making of high quality holographic gratings [J]. Optical Technique, 2002, 28(3): 255-256.
黄德康, 曹望和, 朱茂华, 等. 高质量全息光栅的制作[J]. 光学技术, 2002, 28(3): 255-256.
- 18 Li Pingping, Zhang Qican. New method of sinusoidal grating generation based on area encoding[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2011, 9(1): 36-41.
李平平, 张启灿. 产生正弦光栅的二值化面积编码新方法[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(1): 36-41.
- 19 Li Jie, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.*. System errors analysis of grating lateral shearing interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508006.
李 杰, 唐 锋, 王向朝, 等. 光栅横向剪切干涉仪及其系统误差分析[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508006.
- 20 Meng Xiaochen, Hao Qun, Zhu Lianqing. Study on relationship between fringe bandwidth and wave-front slope in interferometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 031201.
孟晓辰, 郝 群, 祝连庆. 干涉条纹带宽与波前斜率分布关系研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031201.

栏目编辑: 何卓铭