

文章编号: 1001-3806(2013)06-0747-05

全息拼接光栅的误差研究

钱国林^{1,2}, 李朝明¹, 陈新荣¹, 邹文龙¹, 吴建宏^{1*}

(1. 苏州大学 信息光学工程研究所, 苏州 215006; 2. 苏州市职业大学 电子信息工程学院, 苏州 215104)

摘要: 为了制作大面积拼接光栅, 对全息光栅拼接误差进行了分析。利用参考光栅与光场光栅形成的莫尔条纹来控制拼接光栅位置和误差, 确定了参考光栅莫尔条纹间距、倾斜度及相位与拼接光栅位置之间的关系。研究了参考光栅面和拼接光栅基片不平行时莫尔条纹与拼接光栅条纹的相位一致性, 计算了光程差漂移对拼接光栅相位对准误差的影响, 分析了工作平台移动对光栅拼接误差的影响。得出光栅拼接总误差为 0.15λ , 该误差接近光栅拼接精度要求, 通过实验验证了全息光栅拼接误差分析的正确性。结果表明, 利用参考光栅进行全息光栅拼接是可行的。全息拼接光栅的误差分析为制作米量级高精度拼接光栅提供了理论支持。

关键词: 全息; 光栅拼接; 全息曝光; 莫尔条纹; 条纹锁定**中图分类号:** O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.06.009

Error analysis of holographic mosaic gratings

QIAN Guo-lin^{1,2}, LI Chao-ming¹, CHEN Xin-rong¹, ZOU Wen-long¹, WU Jian-hong¹

(1. Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, China)

Abstract: In order to make large scale gratings, errors of holographic mosaic gratings were analyzed. The gratings' phase and rotation were designed by monitoring the Moiré fringes formed on the reference grating. The orientation and period of the Moiré fringes can show the grating's rotation condition, and the phase can express the grating's phase condition. The phase congruence of the Moiré fringes and the mosaic gratings is researched when the planes of reference grating and the mosaic grating's substrate are not parallel. In addition mosaic gratings' phase error brought by the drift of optical path difference was studied. The errors of mosaic gratings caused by the movement of workbench were analyzed. Considering all of the factors, the mosaic gratings' error is about 0.15λ . The value can meet the requirement of mosaic grating which is designed to be used for pulse compressor. Finally the precision of mosaic gratings' error was confirmed by the experiment. The results show that it is feasible to make the holographic mosaic grating by using the reference grating. The research of holographic mosaic gratings' error provides the method for making meter-order gratings.

Key words: holography; mosaic grating; holographic exposure; Moiré fringe; fringe locking

引 言

建立在啁啾脉冲放大技术上的脉冲激光系统能够提供超快、超强激光, 脉冲压缩光栅是啁啾脉冲放大技术中的核心器件^[1-2]。光栅在强激光直接作用下容易受物理损伤, 提高光栅损伤阈值^[3]和提高光

栅光通量可以解决该问题。因此脉冲压缩光栅必须有足够大口径, 而直接制作大口径光栅的难度和费用相当高, 利用光栅拼接技术^[4-6]获取大口径光栅是一种有效的替代方法。光栅拼接主要有机械光栅拼接^[7]和全息光栅拼接^[8-9]两种方式。本文中基于全息光栅拼接法对拼接误差进行了计算分析, 实验验证了误差分析的正确性, 证实了单基片多次曝光实验方案的可行性。

1 全息曝光光栅拼接方案

如图1所示, 机械法光栅拼接有6个拼接维度: 位置误差 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 和旋转误差 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z$ 。这6个量需要精确调整, 且光栅拼接完成后无法保证

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61178046; 60808013); 江苏省高校自然科学基金重大资助项目(11KJA140001)

作者简介: 钱国林(1980-), 男, 博士研究生, 现主要从事光信息器件与微纳制造的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jhwu@suda.edu.cn

收稿日期: 2013-04-08; 收到修改稿日期: 2013-05-17

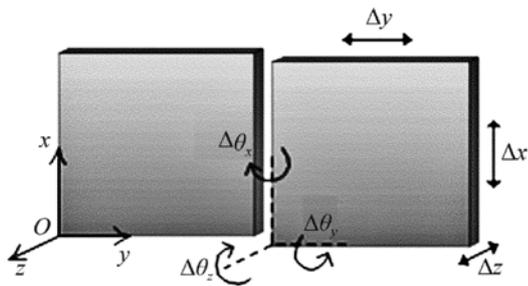


Fig. 1 Six degrees of freedom between mosaic gratings

各子光栅相对位置不发生变化。全息曝光拼接光栅法中子光栅结构 G_1 和 G_2 在同一基片平面内,如图 2 所示,理论上只要在曝光过程中子光栅线夹角 $\Delta\theta_2 = 0$,光栅拼缝 $\Delta y = n \cdot d_0$,子光栅周期 $d_1 = d_2 = d_0$, d_0 为参考光栅周期。

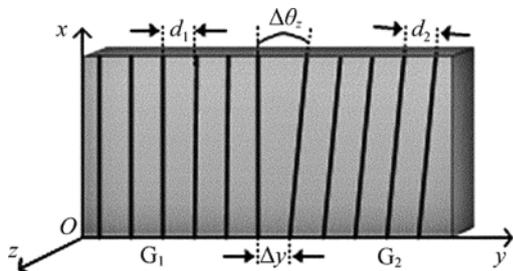


Fig. 2 Mosaic gratings on one substrate

图 3 所示为全息曝光拼接系统,当快门 S 打开时,激光经分束镜 P_1 、反射镜 M_1 和 M_2 、滤波器 W_1 和 W_2 、透镜 F_1 和 F_2 后分成两束平行光 I_1 和 I_2 ,在主基片 H_1 处形成干涉条纹,T 为精密移动平台。光场通过条纹锁定光栅 G_s 衍射后在屏 S_1 处形成莫尔条纹,曝光时开启条纹锁定系统^[10-11]保证光场光栅与主基片相对稳定。

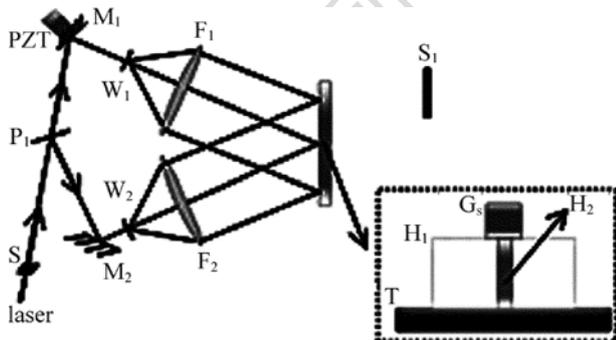


Fig. 3 Sketch of grating mosaic

参考光栅 H_2 用于检测拼接光栅位置,固定在主基片 H_1 之前,如图 3 中虚线框所示。调节支架使其表面形成 3 至 4 个平直莫尔条纹,如图 4a 所示。待系统稳定后用 CCD 照相机记录参考莫尔条纹 S_2 ,此图形代表主光栅 H_1 初始位置,然后对主基片 H_1

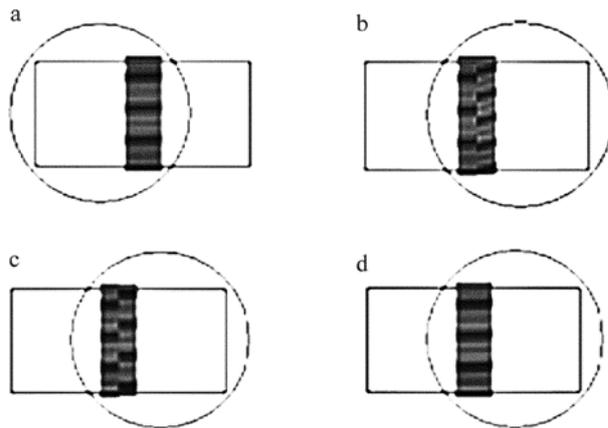


Fig. 4 Moiré fringes

a—reference fringes b—error caused by rotation $\Delta\theta_x, \Delta\theta_2$ c—error caused by Δy d—adjusted fringes

左半部分进行曝光。

曝光完成后将平台向左移动距离 L ,使主基片 H_1 右半部分进入干涉光场。此时参考光栅 H_2 位于干涉光场左边缘,莫尔条纹的密度、倾斜度和相位发生了变化,如图 4b 所示,右侧为实时莫尔条纹,左侧为之前记录参考莫尔条纹 S_2 。参考光栅莫尔条纹变化表示平移后主光栅平行度、密度及相位发生了变化,分别由 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_2$ 和 Δy 引起。通过调节 $\Delta\theta_x$ 使莫尔条纹水平,调节 $\Delta\theta_2$ 使实时莫尔条纹密度与左侧一致,如图 4c 所示,通过压电陶瓷调节莫尔条纹相位使左右两侧对齐,如图 4d 所示,此时实时图像与参考莫尔条纹完全一致。取下参考光栅 H_2 ,对主基片 H_1 右半部分进行曝光。曝光完成后将主干版 H_1 取下显影,完成全息拼接光栅掩膜制作。

2 光栅拼接误差分析

按照实验设计,如实时莫尔条纹与参考莫尔条纹完全对准,如图 4d 所示,则可以得到无误差的拼接光栅。但在实际拼接过程中有多种因素影响光栅拼接精度,在拼接光栅时必须减小这些因素对拼接精度的影响。

2.1 参考光栅面 H_2 和主光栅面 H_1 不平行

如参考光栅基片与主干版完全平行,则只要保证参考光栅与干涉光场光栅空频相同即可。但实际上参考光栅基片 H_2 与主基片 H_1 无法保证完全平行,如图 5 所示。设参考光栅密度为 f_0 ,周期为 d_0 ,若参考莫尔条纹按图 4d 对准,则光场光栅在参考光栅 H_2 处的密度亦为 f_0 ,主干版曝光区域光场光栅密度为 $f = f_0 \cdot \cos\beta_x$ 。当平台移动时,参考光栅在 y 方

向位移为 $n_0 \cdot d_0$ (n_0 为整数), 其对应主基片长度为 $\frac{n_0 \cdot d_0}{\cos\beta_x}$, 所以主基片上干涉条纹移动周期数为:

$$n = \frac{n_0 \cdot d_0 / \cos\beta_x}{d_0 / \cos\beta_x} = n_0 \quad (1)$$

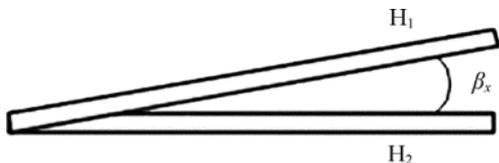


Fig. 5 Noncoplanar of H₁ and H₂

因此, 参考光栅与主基片不平行并不影响参考光栅代表主光栅位置的功能。

2.2 温度对光栅密度的影响

在光栅拼接过程中温度变化将导致光栅基片热胀冷缩, 使子光栅及参考光栅密度改变, 其改变量 $\Delta f = \alpha \Delta T \cdot f_1$ (lp/mm), 其中 α 为热膨胀系数, ΔT 为温度改变量, f_1 为光栅密度。如选用膨胀系数较小的二氧化硅玻璃做基片, 温度变化 1K, 则光栅密度改变量 $\Delta f = 8.7 \times 10^{-4}$ 条/mm, 在 100mm 主基片上栅线数量变化 0.087 条。因为使用参考光栅检测拼接子光栅和光场光栅密度差异, 所以参考光栅基片选用的材料与主基片材料相同时, 它们具有相同的热膨胀系数, 这将抵消大部分温度引起的拼接光栅密度误差。在实际拼接过程中, 环境温度变化控制在 $\pm 1K$ 以内, 因此可以忽略温度变化引起的拼接密度误差。

2.3 系统稳定性对拼接精度的影响

拍摄光栅过程中整个系统需要保持相对静止, 但全息台振动、空气扰动、温度等微小变化会使干涉光束光程差 φ 发生抖动, 光场干涉条纹和参考莫尔条纹也会相应较大的漂移, 导致光栅条纹对比度和拼接精度的降低。由锆钛酸铅 (PbZrO₃-PbTiO₃) 压电陶瓷 (piezoelectric, PZT)、计算机和电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 摄像机等组成的条纹锁定系统对反射镜 M₁ 的位置进行微控制, 抵消干涉条纹的缓慢漂移量 $\Delta\varphi$ ^[10], 保证光场干涉条纹与光栅基片相对静止。虽然条纹锁定系统抑制了干涉条纹大范围漂移, 但条纹会继续在一定范围内抖动。一方面, 条纹抖动使 CCD 记录的参考莫尔条纹 S₂ 相位难以准确表达已完成的子光栅相位; 另一方面, 实时莫尔条纹抖动, 给图 4 中所示莫尔条纹拼接造成困难。为此, 有必要研究莫尔条纹抖动特性及误差范围。

莫尔条纹的抖动量可以利用线阵 CCD 来测量, 启用条纹锁定系统时, 条纹漂移均方根值为 0.03λ , 条纹抖动峰谷值约为 0.20λ ^[11]。第 1 次曝光前所记录的参考莫尔条纹应该是位于平衡位置的图像, 而实际上瞬时记录的参考莫尔条纹位置与平衡位置的最大差值可达 0.1 个条纹以上。为减小莫尔条纹抖动对参考莫尔条纹位置产生的误差, 采用多幅图像取平均的方法获取参考莫尔条纹图像。利用 Visual Basic 编写一个图像处理程序来获取参考莫尔条纹图像。通过该方法得到的参考莫尔条纹与平衡位置的误差, 根据概率统计正态分布置信度为 $1 - \alpha$ 的置信区间为^[12]:

$$\bar{X} \pm \frac{\sigma z_{\alpha/2}}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

式中, \bar{X} 为平衡位置, 取值 0; σ 为振幅, 取值 0.3λ 。取 $n = 10$ 幅图像, 置信度为 95% 的置信区间为 $(-0.018\lambda, 0.018\lambda)$, 所以, 参考莫尔条纹位置误差对光栅拼接造成的误差可以忽略。

2.4 工作平台平移后的平台和光路调整

在两次曝光之间需要将装有参考光栅和主全息干版的精密工作平台平移, 将产生位移误差 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 和旋转误差 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z$, 如图 2 所示, 在本实验系统中, $\Delta x, \Delta z$ 和 $\Delta\theta_y$ 比较容易控制, 对拼接精度的影响很小。当平移后主基片绕 x 轴旋转, 干涉光入射角变化, 如图 6 所示, 第 2 次将记录的光栅频率发生变化, 该变化由莫尔条纹倾斜度表达。假设基片绕 x 轴转动控制量为 $\Delta\theta_x$ 。则前后两次对主干版曝光光栅空频变化为:

$$D_2 = \frac{D_1}{\cos\Delta\theta_x} \quad (3)$$

式中, D_1 为第 1 次曝光时的光栅周期, D_2 为第 2 次曝光时的周期。利用对称光路特性, 空间滤波器 W₁ 处的点光源在空间滤波器 W₂ 处产生一个对称的点光源像, 只要保证第 2 次曝光时主基片返回的点光源像位置不变即可。利用 CCD 来观测点光源像点的复位精度, 可达 10^{-2} mm 数量级, 透镜焦距为 3m, $\Delta\theta_x$ 的数量级为 10^{-5} rad 数量级, 此时根据 (3) 式可知, 该误差对拼接精度的影响可以忽略。

当平移后主干版绕 z 轴旋转时, 此时的光场光栅与已经记录的子光栅条纹平行度误差为 $\Delta\theta_z$, 该误差与莫尔条纹数改变量一致, 可折算为 $\frac{H \sin(\Delta\theta_z)}{d_0}$ 条, 其中 H 为参考光栅高度, 通过步进电机微调空

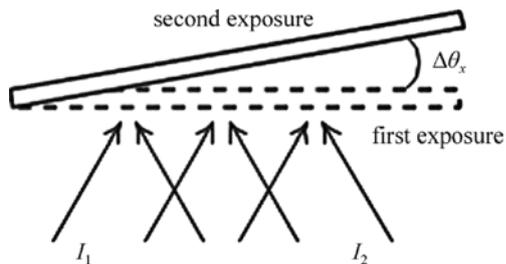


Fig. 6 Rotation of the grating substrate

间滤波器,其精度为 30nm。光栅高度为 100mm,激光波长 413.1nm,光栅周期为 1/1740mm,折算成莫尔条纹数量变化约为 10^{-3} 条,对拼接精度的影响也可忽略不计。

当平移后主基片 H_1 完成曝光的子光栅与右侧待曝光光栅在 y 方向上间隔 $\Delta y \neq n \cdot d_0$,此相位误差与参考莫尔条纹间的相位差一致,如图 4c 所示,调节压电陶瓷电压使莫尔条纹相位对准即可。压电陶瓷调节精度在纳米量级,折算成莫尔条纹调节精度为 1/400 个条纹,对拼接精度的影响可以忽略。

2.5 拼接精度估算

从光栅拼接方法和机械调节精度来看,全息光栅拼接可以基本实现无误差拼接。但实际上光栅莫尔条纹倾斜度、密度、相位等受分辨率限制无法完全对准,而分辨率受莫尔条纹对比度限制。同时在拼接过程中必须保证光栅基片 H_1, H_2 及支撑支架之间无相对运动。所以可以估算参考莫尔条纹与实时显示莫尔条纹相位对准精度为 0.1 个条纹;条纹抖动造成参考莫尔条纹 S_2 位置误差 0.018 个条纹;莫尔条纹的倾斜与光场光栅在基片 H_1 上的密度相关,其误差为 0.1 个条纹。按统计平均计算,总误差值为 $(0.1^2 + 0.018^2 + 0.1^2)^{1/2} = 0.143$ 个条纹。曝光系统像差的存在使莫尔条纹发生局部弯曲变形,导致参考莫尔条纹与实时莫尔条纹无法完全对准,如果能保证整体像差变化较小,则对拼接精度的影响较小。

3 实验结果

根据实验方案进行光栅拼接实验,参考光栅密度为 1740lp/mm,激光波长为 413.1nm,主基片(高×宽)为 100mm×200mm,单次曝光面积 100mm×100mm。图 7 所示为第 2 次曝光前参考莫尔条纹与实时莫尔条纹的对准情况。由图可得两次曝光时莫尔条纹相互平行,说明两次曝光时干涉条纹在主干版上形成的空间频率相同;莫尔条纹密度相同,说

明

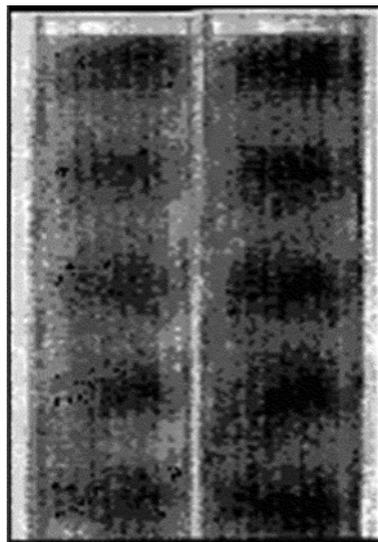


Fig. 7 Moiré fringes of the reference grating

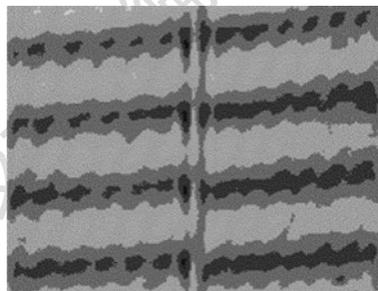


Fig. 8 Moiré fringe near gap of the mosaic grating

主基片上子光栅栅线与光场干涉条纹相互平行;莫尔条纹相互对准,说明主干版上两套光栅间距为干涉条纹的整数倍。

完成曝光后,将主基片 H_1 显影并放回原位,调节平台使拼缝移动至干涉光场中央,适当微调主基片 H_1 位置,形成两套莫尔条纹,如图 8 所示,左右两侧莫尔条纹的差异分别代表了两侧子光栅的拼接误差。左右条纹相差约 0.15 个,与第 2.5 节中预测的拼接误差基本一致。

4 结 论

实验结果说明,利用参考光栅莫尔条纹来监测拼接光栅位置是可行的,验证了光栅拼接误差分析的正确性,证实了全息曝光光栅拼接法的可行性,为更大面积光栅拼接提供实验参考和误差理论依据。

参 考 文 献

[1] WEI Zh Y, WANG Zh H, HAN H N, et al. Progress on ultrashort and ultraintense laser pulse technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(6): 773-777 (in Chinese).

- [2] XU G, QIAN L J, FAN D Y. Optimization of the single-grating stretcher in chirped-pulse amplification[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(12):1067-1070 (in Chinese).
- [3] KONG W J, SHAO J D, ZHANG W L, *et al.* Design and character analysis of multi-layer dielectric film used in pulse compressed gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(5):701-706 (in Chinese).
- [4] WEI J, WU J H. Theoretical study on wave aberration of mosaic compression gratings [J]. Laser Technology, 2011, 35(3):349-351 (in Chinese).
- [5] ZHANG T, YONEMURA M, KATO Y. An array-grating compressor for high-power chirped-pulse amplification lasers [J]. Optics Communications, 1998, 145(1):367-376.
- [6] KESSLER T J, BUNKENBURG J, HUANG H, *et al.* Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high-energy chirped-pulse-amplified lasers[J]. Optics Letters, 2004, 29(6):635-637.
- [7] ZHAO B, HAO D F. Manufacturing large-size grating by mosaic way[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(5):503-507 (in Chinese).
- [8] ZENG L J, LI L F. Optical mosaic gratings made by consecutive, phase-interlocked, holographic exposures using diffraction from latent fringes[J]. Optics Letters, 2007, 32(9):1081-1083.
- [9] QIAN G L, WU J H, LI Ch M. Theoretical analysis of tiled grating by multiple-exposure hologram on single substrate [J]. Optical Instruments, 2008, 30(6):81-85 (in Chinese).
- [10] LI Ch M, WU J H, ZHU Y Y, *et al.* The method and device used to control the interference fringe's stability: China, 200610039967.6[P]. 2006-10-11 (in Chinese).
- [11] QIAN G L, LI Ch M, YIN Q Y, *et al.* Study of characteristic of fringe locking system used to holographic exposure [J]. Laser Technology, 2008, 32(6):648-650 (in Chinese).
- [12] SHENG Zh, XIE Sh Q, PAN Ch Y. Probability and statistics [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1989:171 (in Chinese).

· 简 讯 ·

请向邮局订阅 2014 年度《激光技术》!

国内邮发代号:62-74;国内统一刊号:CN51-1125/TN