

文章编号: 1001-3806(2008)06-0648-03

全息曝光条纹锁定系统特性研究

钱国林^{1,2}, 李朝明¹, 殷庆琰², 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 电子信息工程系, 苏州 215104)

摘要: 为了研究全息光栅拍摄过程中曝光对比度与干涉条纹漂移均方根值之间的关系和提高大面积光栅拍摄质量, 采用莫尔条纹原理和线阵电荷耦合器件照相机系统组成的条纹锁定系统进行了光栅拍摄实验。对莫尔条纹的漂移量进行了实时采集和分析, 发现条纹漂移主要由缓慢漂移和频率为 3.11 Hz 的振动合成。得到了条纹漂移均方根值与光栅曝光对比度之间的数值关系, 为预测光栅质量是否合格提供了理论参考。结果表明, 要提高光栅拍摄质量, 必须保证条纹漂移均方根值小于 0.05λ 。该条纹锁定系统完全可以满足此要求。

关键词: 衍射与光栅; 条纹锁定; 压电陶瓷; CCD 照相机

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

Study of characteristic of fringe locking system used to holographic exposure

QIAN Guo-lin^{1,2}, LI Chao-ming¹, YIN Qing-yan², WU Jian-hong¹

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

Abstract In order to study the relationship between the contrast of holographic grating and the root mean square (RMS) value of interferential fringe moving, a fringe locking system constituted by Moire fringe theory and charge coupled device camera is used to shot holographic grating. The value of moving Moire fringe is real time gathered by CCD. It has been discovered that the fringe moving is composed by slowly excursion and vibration of 3.11 Hz. And the RMS value of fringe moving is correlated with the contrast of holographic grating. Academic reference is put forward for testing whether the quality of holographic grating is eligible or not. The results showed that the RMS value should be less than 0.05λ to improve the quality of grating. And the fringe locking system can choke back the slowly fringe moving.

Key words diffraction and gratings; fringe locking; piezoelectric ceramics; CCD camera

引 言

在拍摄全息光栅时, 全息记录材料在长时间曝光的情况下, 外界因素可使干涉条纹缓慢漂移, 漂移量可达数个波长。因此, 用条纹锁定系统来提高干涉条纹稳定性具有很重要的意义^[1-2]。国外对半导体激光干涉条纹锁定研究得比较多, 大部分采用电反馈控制压电陶瓷或光学反馈来实现稳定干涉条纹的目的^[3-4], 而对氩、氦离子激光干涉条纹在长时间曝光条件下的稳定性研究较少。利用莫尔条纹原理的条纹锁定系统^[5]由于对激光器的输出功率变化不敏感, 特别适合于长时间曝光的条纹锁定场合。作者对该系统的条纹

锁定特征和条纹漂移特征进行了详细分析, 计算了条纹漂移均方根 (root mean square, RMS) 值与光栅曝光对比度之间的关系, 给出了曝光期间条纹漂移是否影响光栅质量的有效判据, 并对该条纹锁定系统提出了改进建议。

1 条纹锁定系统结构及主要原理

条纹锁定系统结构由分束器 P_1 、反射镜 M_1 、 M_2 、压电陶瓷 PZT、扩束器 W_1 、 W_2 、透镜 F_1 、 F_2 、CCD 照相机等构成, 如图 1 所示。在拍摄光栅 H_1 前, 先记录光

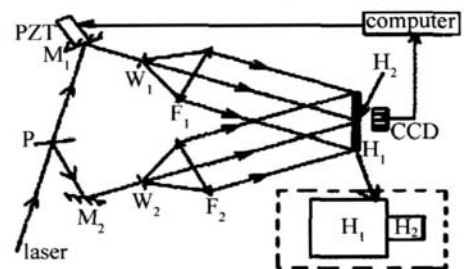


Fig 1 Optical path used for registering holographic grating

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2005AA849023); 江苏省高校自然科学基金资助项目 (07KJA51002)

作者简介: 钱国林 (1980-), 男, 助教, 硕士研究生, 主要从事光栅拍摄及光栅拼接的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jhwu@suda.edu.cn

收稿日期: 2007-09-04; 收到修改稿日期: 2008-01-22

栅 H_2 , 经显影处理后放回原位置。物光和参考光相干所得虚光栅与 H_2 实光栅重叠形成莫尔条纹。以 H_2 平面法线为转轴调整虚实光栅线夹角 θ 得莫尔条纹等差线^[6]:

$$q = \frac{x(1 - \cos\theta) + y\sin\theta}{d} \quad (1)$$

式中, y 为莫尔条纹位置, d 为光栅周期, θ 角极小。

虚光栅条纹会随光程差改变量 $\Delta\delta$ 变化而发生漂移, 即等差线位置随 $\Delta\delta$ 漂移, 由 (1) 式可得:

$$\Delta y = d \cdot \Delta\delta / \lambda\theta \quad (2)$$

所以莫尔条纹的漂移量完全代表了 H_1 上干涉条纹的漂移情况。

适当调整夹角 θ 选取莫尔条纹 1 个周期, 用线阵 CCD 采集相应光强如图 2 所示。用莫尔条纹波谷位

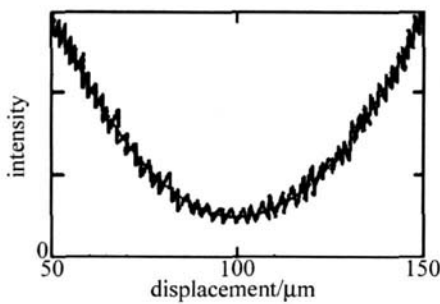


Fig 2 Intensity of Moire fringe

置表示莫尔条纹位置。利用最小二乘法对光强曲线进行 2 次曲线拟合, 得到图 2 中的平滑曲线。波谷坐标的变化量即代表了 H_1 上干涉条纹漂移量。线阵 CCD 每隔时间 Δt 对莫尔条纹光强采集一次, 可得波谷坐标 x_i , 相应莫尔条纹漂移量为 $X(i) = x_i - x_0$, 其中 x_0 为参考波谷坐标。将莫尔条纹漂移量 $X(i)$ 反馈至压电陶瓷从而控制与压电陶瓷上反射镜的位置, 保证莫尔条纹波谷处于参考位置 x_0 处^[7]。控制电压为^[5]:

$$U(i) = U(i-1) + k_p X(i) + k_d [X(i) - X(i-1)] \quad (4)$$

式中, k_p 为比例系数, k_d 为微分系数, $X(n)$ 为条纹漂移量。

2 条纹漂移 RMS 值与曝光对比度数据分析

与光栅记录直接相关的物理量应是条纹曝光量对比度。研究条纹漂移均方根值和条纹曝光量对比度的关系可以试图测量 RMS 直接评价条纹锁定系统的锁定性能。条纹漂移量的 RMS 值由下式表示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X(i)^2}{n}} \quad (5)$$

式中, $X(i)$ 为莫尔条纹的波谷漂移量, n 为总采样次数, σ 为波谷坐标 RMS 值。

光栅记录的条纹曝光对比度为图 1 中全息记录材

料 H_1 处的, 其对比度和 H_2 处的莫尔条纹的曝光对比度应该相同。对一个周期的莫尔条纹光强进行采集, 采样时间间隔为 Δt , 在位置 x 处曝光量为:

$$H(x) = \sum_{i=1}^n I(x, t_i) \Delta t \quad (6)$$

式中, $I(x, t_i)$ 为第 i 个时间采样点在位置 x 处的光强。对 (6) 式取极大、极小值, 光栅记录条纹曝光对比度^[8] 为:

$$V = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}} \quad (7)$$

设莫尔条纹光强最弱处为 Q 最强处为 $2I_0$, 由 (2) 式, (6) 式, (7) 式, 通过计算机模拟运算得条纹漂移量 $X(i)$ 按各种不同方式漂移时其 RMS 值与曝光对比度之间的关系: (1) 干涉条纹漂移量 $X(i)$ 按线性规律变化, 变化范围 (Q 0) 到最大变化范围 ($-1.25\lambda, 1.25\lambda$), 相应 RMS 值为 (Q 0.73λ), 如图 3 中实线所示; (2) 干涉

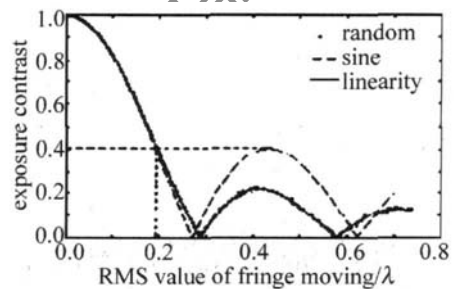


Fig 3 The relation between the RMS value of fringe moving and the contrast of holographic grating

条纹漂移量 $X(i)$ 按正弦规律变化, 变化范围 (Q 0) 到最大变化范围 ($-0.5\lambda, 0.5\lambda$), 相应 RMS 值范围为 (Q 0.71λ), 如图 3 中虚线所示, 图形与正弦振动频率无关; (3) 干涉条纹漂移量 $X(i)$ 按无规则变化时, 变化范围 (Q 0) 到最大变化范围 ($-1.25\lambda, 1.25\lambda$), 相应 RMS 值范围为 (Q 0.72λ), 如图 3 中点线所示。如果条纹漂移量范围在 ($-a, a$) 之间, 以上 3 点也利用 (5) 式推导: 按线性规律漂移或无规则漂移, 相应 RMS 值为 $a/\sqrt{3}$ 按正弦规律漂移, 则 RMS 值为 $\sqrt{2}a$ 。

由图 3 可得, 当 RMS 值处于 (Q 0.05λ) 范围时, 曝光对比度变化较小且均保持在 95% 以上。随着 RMS 值的增加, 曝光对比度迅速下降, 当 RMS 值大致为 0.29λ 时, 曝光对比度第 1 次下降到 Q 。

从以上分析可得: 无论条纹以何种方式漂移或振幅有多大, 只要 RMS 值在 (Q 0.19λ) 内, 曝光对比度仅与条纹漂移量 RMS 值有关且唯一对应。因此要保证光栅曝光对比度较高, 必须确保条纹漂移量 RMS 值足够小。

3 对现有条纹锁定系统条纹漂移数据分析

3.1 未使用条纹锁定系统

数据采集时间 1400s 采样时间间隔为 0.0340s 条纹漂移 RMS 值为 0.119 λ 。条纹漂移量随时间变化

如图 4 所示。如增加曝光时间,则条纹漂移 RMS 值将继续增加。由图 3 知此时光栅曝光对比度约为 0.72。

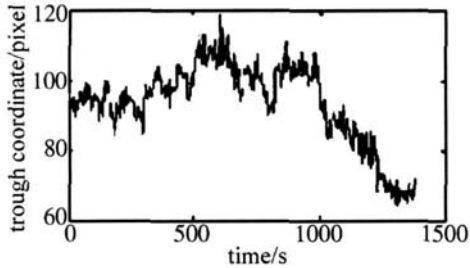


Fig 4 Quantity of fringe moving without fringe locking system

对所得数据进一步分析可知,条纹有明显的正弦振动存在,但正弦振动并不规则,叠加了许多振幅更小的不规则振动。对其进行傅里叶变换后得正弦振动频率为 3.1 Hz 。此时条纹漂移 RMS 值主要由缓慢漂移、正弦振动和小幅振动 3 部分组成。

3.2 使用条纹锁定系统

数据采集时间 1400 s , 采样时间间隔 0.0339 s , 条纹漂移 RMS 值为 0.029λ 。条纹漂移量随时间变化见图 5, 干涉条纹稳定性明显提高。其中正弦振动造成

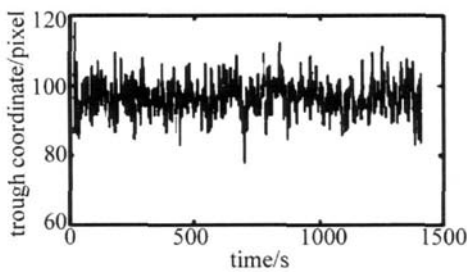


Fig 5 Quantity of fringe moving with fringe locking system

的条纹漂移 RMS 值为 0.012λ 。条纹锁定系统能使曝光对比度保持在 0.99 以上。如增加曝光时间,条纹漂移量 RMS 值无显著改变。因此,在一般情况下使用现有条纹锁定系统即可保证干涉条纹的稳定性。

对数据继续分析可知,正弦振动仍然存在,频率仍为 3.1 Hz 。此时条纹漂移 RMS 值主要由正弦振动和不规则小幅振动两部分组成。说明条纹锁定系统对条纹缓慢漂移控制效果良好,而正弦振动和不规则振动并未得到有效控制。

如正弦振动振幅较大时,则条纹对比度会下降,以致不能满足记录全息光栅要求。此时需要削弱正弦振动造成的条纹漂移,控制 RMS 值保持在所需范围内。由于正弦振动的振幅和相位会随时间发生偏移,因此可采用线阵 CCD、计算机等组成的预处理系统,根据已采集数据对下一周期振幅和相位进行预测。然后将此信息通过正弦信号发生器负反馈至压电陶瓷,控制反射镜 M_1 运动,从而减弱正弦振动,实现提高光栅曝光对比度的目的。

3.3 光刻胶光栅曝光试验结果

为验证全息干涉条纹稳定系统的使用效果,做两组实验进行对比,采用图 1 光路拍摄全息光栅,曝光时间 20 min 。第 1 组实验不用条纹锁定系统,记录下全息光栅电镜照片见图 6a, 光刻胶浮雕型光栅齿高度较低,即条纹对比度较低。相应条纹漂移 RMS 值为 0.119λ 。由图 3 知其曝光对比度为 0.72。第 2 组实验使用条纹锁定系统,记录的全息光栅电镜照片见图 6b, 光刻胶光栅齿高度较高,即条纹对比度较高。相应

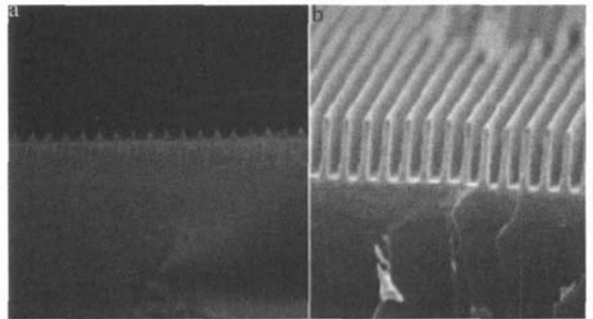


Fig 6 Photos of the grating shot by electron microscope

条纹漂移 RMS 值为 0.029λ 。由图 3 知其曝光对比度在 0.99 以上。实验结果证实了条纹漂移 RMS 值与曝光对比度理论上的关系是正确的。条纹漂移 RMS 值在一定程度上可预测曝光对比度。在实际光栅拍摄过程中可用条纹漂移 RMS 值初步判定光栅质量是否合格^[9]。

4 结 论

(1) 光栅记录时的条纹曝光对比度与干涉条纹漂移的方式无明显关系,条纹漂移量 RMS 值与条纹曝光对比度有对应关系,以条纹对比度 0.95 为参考标准时,条纹漂移 RMS 值应小于 0.05λ 。(2) 通过实验数据分析和光栅齿照片表明,参考文献 [7] 中给出的条纹锁定系统能够满足长时间全息曝光要求。(3) 参考文献 [7] 中的条纹锁定系统有效抑制了缓慢的条纹漂移,但对条纹漂移中 3.1 Hz 的正弦振动无法消除,当正弦振动严重影响条纹漂移量 RMS 值时,需要采取相应的措施来消除正弦振动。

参 考 文 献

- [1] GAO L, LIN H, ZENG L, JIA C. Observer feedback system used for improving the stability of interference fringes [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004, 2(1): 23-25 (in Chinese).
- [2] YU J, YANG Q M, SHI J H, et al. A method to stabilize interference fringe in taking a reflecting hologram [J]. Laser Journal, 2002, 23(6): 42-43 (in Chinese).
- [3] BAO Y Q, SU H S, YANG Y. Fringe locking phenomenon in a laser diode interferometer with optical feedback [J]. SPIE, 2005, 5638: 797-803.

(下转第 654 页)

应。取 $n_1 = 4 \times 10^{-4}$, $\bar{n} = 1.45$, $L = 0.01\text{m}$, $\lambda_B = 1.55 \times 10^{-6}\text{m}$, $N = 300$, $M = 900$ 脉冲宽度为 20ps 在 $\lambda = 1.5504 \times 10^{-6}\text{m}$ 和 $\lambda = 1.5503 \times 10^{-6}\text{m}$ 的情况下, 入射光、输出光与反射光的波形分别如图 4 所示。

由图可知, 由于色散的影响, 脉冲被展宽, 且波长偏离布拉格波长越远, 输出脉冲展宽幅度越小, 基于这一特性, FBG 可作为色散补偿器件。

3.3 非线性条件下高斯脉冲输入

如果考虑非线性效应, (4) 式变为:

$$\begin{cases} + i \frac{\partial A_+}{\partial z} + i \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_+}{\partial z} + \delta A_+ + \kappa A_- + \\ \Gamma |A_+|^2 A_+ + 2\Gamma |A_-|^2 A_+ = 0 \\ - i \frac{\partial A_-}{\partial z} + i \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_-}{\partial z} + \delta A_- + \kappa^* A_+ + \\ \Gamma |A_-|^2 A_- + 2\Gamma |A_+|^2 A_- = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\Gamma = 2\pi n_2 / \lambda_B$ 为非线性参量, n_2 为非线性 Kerr 系数, 取 $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$, 脉冲幅度为 $1 \times 10^8 \text{W}^{1/2}/\text{m}$, $\lambda = 1.5508 \times 10^{-6} \text{m}$ (位于光栅带隙内, 靠近带隙边缘), 其它参量同上, 得到的波形如图 5 所示。

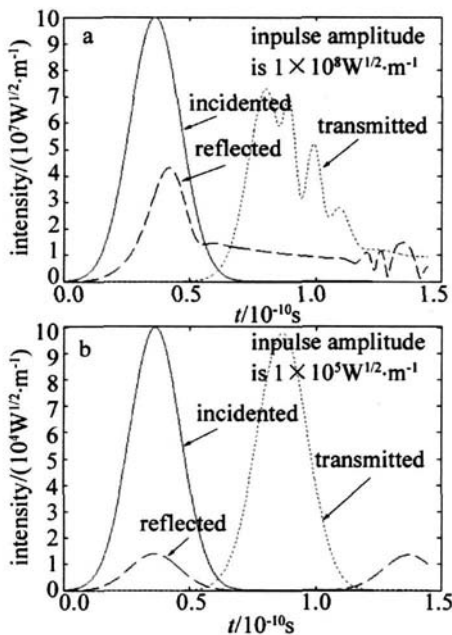


Fig 5 Reflected transmitted and incident waves of the grating with the input of pulse of different intensity

由上可知, 在非线性情况下, 如果脉冲幅度超过一定值, 输出脉冲会发生脉冲分裂的现象。

4 结 论

介绍了利用坐标变换和有限差分法求解耦合波方程的算法, 并给出了一个简单的实现以避免计算后的坐标变换, 进而数值计算了线性情况下均匀 FBG 在连续波输入条件下反射率的动态响应以及高斯脉冲输入下的波形。与龙格-库塔法得到的结果相比, 本文中算法在计算一定的时间间隔后可以得到与之相符的结果, 足以证明算法的正确性。同时计算了考虑非线性效应条件下高斯脉冲, 得到了脉冲分裂的波形。

参 考 文 献

- [1] WANG L B, ZHANG B M, WANG Y F, *et al*. A kind of fiber Bragg grating strain sensor with jacket [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(5): 385-387(in Chinese).
- [2] GUO M J, JIANG D SH, YUAN H C, *et al*. Study on fiber Bragg grating pressure sensors on two different diaphragms [J]. *Laser Technology* 2005, 29(6): 611-614(in Chinese).
- [3] YU D K, QIAO X G, JIA Zh A, *et al*. The fiber Bragg grating temperature and pressure sensing system applied in oil pipeline [J]. *Laser Technology* 2007, 31(1): 12-14(in Chinese).
- [4] PENG W B, WU D L, LIH Y. Analysis of response of optical fiber Bragg grating sensors in non-homogeneous strain fields [J]. *Optical Technique* 2003, 29(2): 188-190(in Chinese).
- [5] LI Y J, HU Sh Zh. Study of the nonlinear characteristics of fiber Bragg gratings by transformatrix method [J]. *Science Mosaic* 2005(2): 16-21(in Chinese).
- [6] LIU Y M, YU Ch Y, YANG H B, *et al*. The investigation of the nonlinear characteristics of fiber Bragg gratings [J]. *Laser Technology* 2006, 30(1): 101-103(in Chinese).
- [7] LIU Y, YE Zh Q. Differences between using Runge-Kutta method and matrix method to analyse linear chirped optical fiber grating [J]. *Optical Communication Technology*, 2002, 26(1): 54-56(in Chinese).
- [8] YE Zh Q, ZOU D W, ZOU L J *et al*. Analysis of apodized and chirped Bragg fiber gratings using matrix method [J]. *Acta Photonica Sinica* 2001, 30(2): 184-187(in Chinese).
- [9] de SPERKE C M, JACKSON K R, ROBERT B D. Nonlinear coupled-mode equations on finite interval: a numerical procedure [J]. *J O S A*, 1991, 8(2): 403-412.
- [10] HARRER E, NÖRSETT S P, WANNER G. Solving ordinary differential equations I: nonstiff problems [M]. 2nd ed Beijing Science Press 2006 211-214(in Chinese).

(上接第 650 页)

- [4] LIU J Y, YAMAGUCHI I. Fringe locking in a laser diode interferometer by optical feedback during modulation of injection current [J]. *Optical Review*, 1999, 6(2): 100-103.
- [5] XIE Sh J, CHEN Sh T, LOU Sh T. Application of digital PID algorithms in brushless DC motor [J]. *Modern Electronics Technique* 2004, 2(1): 59-61(in Chinese).
- [6] YU M W. Optical holography and its applications [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press 1996 402-407(in Chinese).

- [7] LI C M, WU J H, ZHU Y Y, *et al*. The method and device to stabilize holographic interference fringe [J]. *China Optics Letters* 2006, 8(10): 10-11(in Chinese).
- [8] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 247-249(in Chinese).
- [9] LIU Q, WU J H, LI C M. Design of beam sampling grating and study on its diffraction action [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4): 398-400(in Chinese).