

# 全息光栅制作中基底定位误差分析及补偿方法

董宁宁<sup>1</sup> 崔锦江<sup>1\*</sup> 徐建根<sup>1</sup> 许 杰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163

<sup>2</sup> 南京理工大学, 江苏 南京 210094

**摘要** 在全息光栅曝光光路中,基底的定位误差会直接影响光栅的技术指标。对平面全息光栅会造成光栅周期误差,对凹面全息光栅则会增大其像差。分析了全息光栅洛艾镜干涉系统中使用叠栅条纹方法调整干涉场周期时,标准光栅定位误差及基底定位误差对光栅周期的影响,指出通过调整基底使其与标准光栅表面平行可以补偿由标准光栅和基底定位误差带来的光栅周期误差。

**关键词** 衍射;光栅;全息;光栅常数;叠栅条纹;误差

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.s105001

## Substrate Positioning Error Analysis and Compensation Method in Holographic Grating Fabrication

Dong Ningning<sup>1</sup> Cui Jinjiang<sup>1</sup> Xu Jiagen<sup>1</sup> Xu Jie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

<sup>2</sup> Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

**Abstract** Substrate positioning error in exposure system will directly harm the groove accuracy of holographic grating. It will cause grating period error in the plane holographic grating, or increase the aberration of the concave holographic grating. The effects on grating period with the positioning error of the standard grating as well as the substrate are analyzed, while moiré fringe method is used to adjust the interference field period in the Lloyd's mirror interference system of holographic grating. The positioning error which can be compensated by adjusting the substrate parallel to the standard grating surface is pointed out.

**Key words** diffraction; grating; holography; grating constant; moiré fringe; error

**OCIS codes** 050.1950; 090.1000

## 1 引 言

全息光栅是将两束激光产生的干涉条纹记录在光刻胶上,后经显影转化为浮雕图形制作而成,主要分为平面全息光栅和凹面全息光栅两大类,干涉条纹的分布直接影响全息光栅的技术指标。光栅常数是平面全息光栅最重要的技术指标之一,干涉条纹周期的精度直接影响光栅常数的准确性<sup>[1-4]</sup>。由于干涉条纹周期一般都很小,实际中很难对其进行直接测量。有研究者提出一种利用叠栅条纹位移放大作用对干涉条纹进行测量的方法<sup>[5]</sup>:在干涉条纹的定域面放置一个与待制作全息光栅的光栅常数相同的标准机械刻光栅(以下称标准光栅),干涉条纹与光栅刻线叠加产生叠栅条纹,通过对叠栅条纹宽度和方向的检验实现对干涉条纹的

**收稿日期:** 2015-01-13; **收到修改稿日期:** 2015-03-04

**基金项目:** 江苏省自然科学基金(BK2012188)、江苏省产学研联合创新项目(BY2013034)、苏州市医疗器械与新医药专项(ZXY2013005,ZXY201429)、吉林省与中国科学院省院合作项目(2014SYHZ0005)

**作者简介:** 董宁宁(1981—),女,硕士,副研究员,主要从事医用激光技术及其设备开发方面的研究。

E-mail: dongnn@sibet.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: cuijj@sibet.ac.cn

检验。这种方法对于提高平面全息光栅的制作精度具有重要的实际意义。之后又先后出现了分别针对双反射镜系统和单反射镜系统干涉场周期的更加简便易行的叠栅条纹判别法<sup>[4,6]</sup>。对于全息光栅制作常用的洛艾镜干涉系统,在利用叠栅条纹法调整干涉场周期时要求标准光栅与洛艾镜垂直,制作光栅时基底也要与洛艾镜垂直。标准光栅的定位误差和基底的定位误差必然造成光栅周期的误差,大大降低叠栅条纹法作为一种精调手段的实际意义。

基底定位误差可以分为三种:旋转误差、俯仰误差和平移误差。旋转误差是指基底在光路主光轴所在的水平面内的转动,俯仰误差是指基底在与水平面垂直的竖直面方向的转动,由于基底装卡在上下左右有边框限制的卡具上,所以平移误差主要是基底的前后平移。对全息光栅来说,造成光栅常数误差的是旋转误差。

鉴于此,本文分析了标准光栅与基底的旋转误差对全息光栅周期的影响,提出一种简便有效的可以对光栅周期误差进行补偿的方法,以降低全息光栅的制作误差。

## 2 全息光栅周期误差分析与补偿

图1为制作全息光栅所使用的单反射镜曝光系统,也称为洛艾镜干涉系统。M为洛艾镜,基底S上涂有光刻胶P,准直光的上半部分 $I_2$ 经洛艾镜反射后与下半部分 $I_1$ 叠加形成干涉场。为了能够精确测量干涉场的条纹周期,在基底处放置一个与待制作全息光栅刻线密度相同的标准光栅。洛艾镜与光栅卡具固定在一个转台上,调整转台角度,当干涉条纹周期与光栅常数接近时就能在光栅表面观察到叠栅条纹。设标准光栅的光栅常数为 $d_0$ ,干涉条纹周期为 $d_1$ ,叠栅条纹宽度为 $b$ ,则

$$b = \frac{d_1 \times d_0}{|d_1 - d_0|}, \quad (1)$$

即叠栅条纹是由于 $d_1$ 与 $d_0$ 的微小不同所产生的差频效果。因为 $d_1$ 与 $d_0$ 非常接近,所以干涉条纹周期的绝对误差为

$$|\Delta d| = \frac{d_0^2}{b}, \quad (2)$$

相对误差为

$$\eta = \frac{|\Delta d|}{d_1} = \frac{d_0}{b}. \quad (3)$$

若制作宽度为85 mm、1200 line/mm的全息光栅, $b=85$  mm,则可认为叠栅条纹无穷宽,此时 $\eta=9.8 \times 10^{-6}$ 。

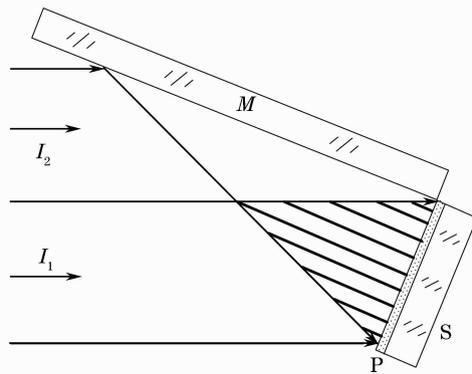


图1 单反射镜曝光系统

Fig. 1 Single mirror exposure system

在使用叠栅条纹法对干涉场周期进行精确控制时,只有当标准光栅与洛艾镜垂直,也就是光栅法线平分 $I_1$ 与 $I_2$ 形成的夹角时,才能达到理论精度。实际上这一点很难做到,如图2所示,MG为标准光栅,光栅常数为 $d_0$ 。光栅法线 $N_0$ 与干涉光束 $I_1$ 、 $I_2$ 的夹角平分线 $B$ 之间的夹角为 $\theta_0$ ,以 $B$ 为基准, $N_0$ 若在 $B$ 左侧, $\theta_0$ 为正;否则 $\theta_0$ 为负。粗实线代表干涉条纹,方向与 $B$ 相同,周期为 $a_0$ 。当叠栅条纹无穷宽时, $d_0$ 与 $a_0$ 满足关系

$$a_0 = d_0 \times \cos \theta_0. \quad (4)$$

由标准光栅放置误差引起的干涉条纹周期绝对误差为

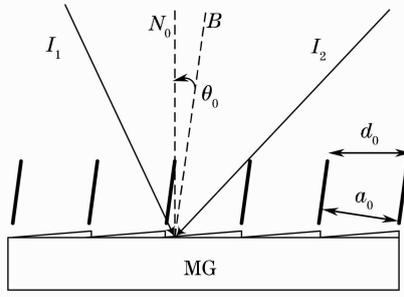


图 2 叠栅条纹法调节干涉场周期

Fig. 2 Adjustment of the period of the interference pattern using moiré fringe

$$|\Delta d|_1 = d_0 \times (1 - \cos \theta_0), \quad (5)$$

相对误差为

$$\eta_1 = \frac{|\Delta d|_1}{a_0} = \frac{1}{\cos \theta_0} - 1. \quad (6)$$

图 3 给出了  $\theta_0$  为  $10^\circ \sim -10^\circ$  时干涉条纹周期的相对误差, 当  $|\theta_0| > 0.25^\circ$  时标准光栅定位误差造成的干涉场周期误差就已经超过了叠栅条纹法带来的误差  $\eta = 9.8 \times 10^{-6}$ 。可见在使用叠栅条纹法调整干涉场周期时, 对标准光栅的定位精度要求很高, 干涉条纹周期精度难以保证。

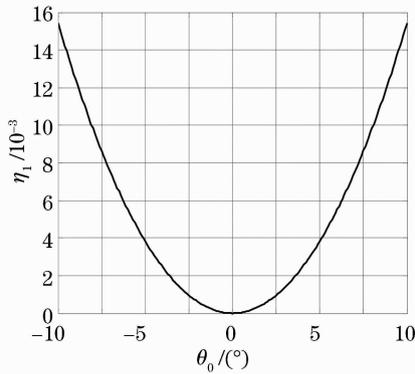


图 3 干涉条纹周期相对误差

Fig. 3 Relative error of the interference pattern period

由于基底之间个体差异以及安装误差的存在, 在将基底安装到光栅卡具上时, 基底法线与调整光路时机刻光栅的法线不可能完全重合, 如图 4 所示。  $N_0$  为原来标准光栅的法线位置,  $N$  为全息光栅基底法线,  $B$  为干涉光束  $I_1$  与  $I_2$  的角平分线,  $\theta_0$  与图 2 中相同,  $\delta$  为  $N$  相对  $N_0$  的偏离角, 若  $N$  在  $N_0$  左侧  $\delta$  为正,  $\theta$  为  $N$  相

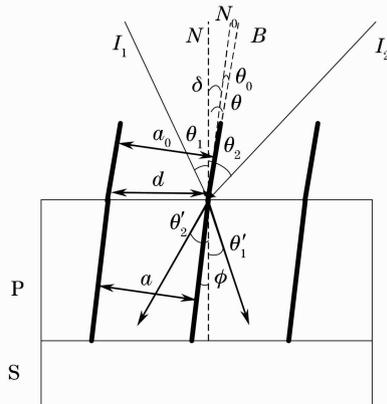


图 4 光刻胶内干涉条纹示意图

Fig. 4 Interference pattern in the photoresist

对  $B$  的偏离角, 则

$$\theta = \theta_0 + \delta. \quad (7)$$

图 4 中粗实线分别代表空气中和光刻胶内的干涉条纹, 则  $a_0$  与  $a$  之间满足关系

$$\frac{a_0}{\cos \theta} = \frac{a}{\cos \phi} = d, \quad (8)$$

式中  $d$  为全息光栅周期,  $\theta$  与  $\phi$  分别表示两组干涉条纹与基底法线  $N$  的夹角,

$$\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}, \quad \phi = \frac{\theta'_1 + \theta'_2}{2}, \quad (9)$$

其中,  $\theta_1, \theta_2$  与  $\theta'_1, \theta'_2$  分别为  $I_1, I_2$  的入射角与折射角. 结合(4)式、(7)式与(8)式得全息光栅周期的相对误差为

$$\eta_2 = \frac{|d - d_0|}{d} = \left| 1 - \frac{\cos(\theta_0 + \delta)}{\cos \theta_0} \right|. \quad (10)$$

由(10)式可以看出当  $\theta_0$  一定时, 令  $\delta = 0^\circ$  或  $\delta = -2\theta_0$  就能得到  $\eta_2 = 0$ . 图 5(a) 给出了  $\theta_0$  分别取  $-3^\circ, 0^\circ, 3^\circ$  时,  $\eta_2$  随  $\delta$  的变化曲线. 也就是说, 只要使基底法线  $N$  与标准光栅法线  $N_0$  平行或相对  $B$  对称就能消除由标准光栅安装误差带来的全息光栅周期误差. 显然使  $N$  平行  $N_0$  更容易做到, 基于此, 本文提出一种全息光栅周期误差补偿方法. 平面全息光栅制作中的零级光定位装置如图 6 所示, 将一束 He-Ne 激光通过一个带有刻度的靶标  $T$  中心打到标准光栅表面  $S$  上, 使零级光原路返回到靶标中心, 此时光线与  $S$  垂直. 换上待制作基底后, 调整卡具, 使激光束经基底表面  $S'$  反射后回到靶标中心. 靶标距基底 2 m, 最小刻度 1 mm, 假设反射光偏离靶标中心 1 mm, 反射光与入射光的夹角为  $\arctan(1/2000) = 0.029^\circ$ ,  $N$  与  $N_0$  的夹角  $\delta = 0.029/2 = 0.014^\circ$ . 图 5(b) 给出了  $\delta$  分别取  $0.014^\circ, 0.1^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ$  时  $\eta_2$  随  $\theta_0$  的变化曲线, 可见误差对  $\delta$  是非常敏感的. 令  $\theta_0 = 5^\circ, \delta = 0.014^\circ, \eta_2 = 2.14 \times 10^{-5}$ , 这已经很接近叠栅条纹法的精度  $\eta = 9.8 \times 10^{-6}$ . 在实际调整光路时完全可以把  $\delta$  控制到比 0.014 更小, 所以通过零级光定位法能够很好地补偿由标准光栅和基底的定位误差带来的光栅周期误差, 充分发挥叠栅条纹法高精度调节平面全息光栅刻线密度的优点.

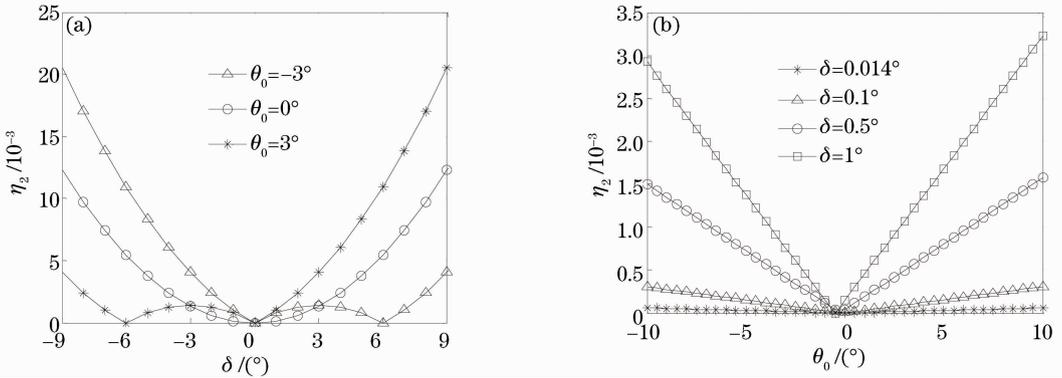


图 5 平面全息光栅周期误差曲线

Fig. 5 Relative error of the period of the plane holographic grating

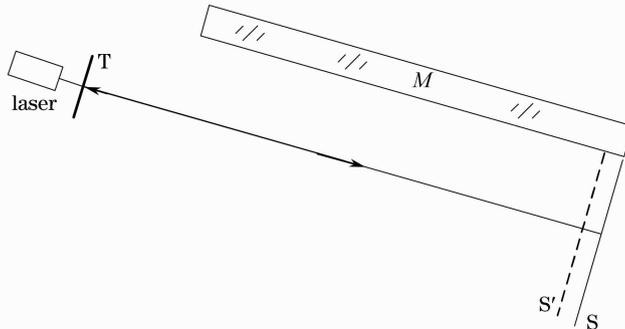


图 6 平面全息光栅制作中的零级光定位装置

Fig. 6 Adjustment of the substrate in the plane holographic grating fabrication

### 3 实验结果及分析

按照第 2 节所述的方法建立全息光栅制作光路并进行光路调整,所要制作的全息光栅为 1200 line/mm,因此选用刻线密度同样为 1200 line/mm、光栅宽度为 85 mm 的标准光栅进行光路调整,且使标准光栅法线  $N_0$  与干涉光束  $I_1$ 、 $I_2$  的角平分线  $B$  之间的夹角为  $\theta_0 = 10^\circ$ ,即有目的的使光路配置为倾斜,调整后使叠栅条纹宽度达到最大,调整 He-Ne 激光照射在标准光栅上并使反射光原路返回靶标 T 中心。然后取下标准光栅,将待曝光的涂有光刻胶的光栅基底安装在曝光场内,调整光栅基底使得反射光偏离靶标中心的距离在 1 mm 以内,且光栅基底距离靶标中心的距离为 2 m。通过曝光、显影等工艺将光栅制作完成并进行光栅周期测定,经测定的光栅周期为 833.4 nm,与 1200 line/mm 标准光栅的光栅常数 833.3 nm 相差 0.1 nm。此结果表明,即使在标准光栅安装倾斜时,通过调整待曝光光栅基底与标准光栅表面平行,即可制作出具有相当高刻线精度的光栅,足够满足全息光栅的制作要求。本文给出的调整方法能够大大简化全息光栅曝光光路的调整过程。从而简化全息光栅制制过程。

### 4 结 论

在使用叠栅条纹法调整洛艾镜干涉系统时,标准光栅与洛艾镜的垂直度误差导致干涉场周期产生误差,基底定位误差使平面全息光栅的周期误差进一步被放大。分析发现,只要使基底表面与标准光栅表面相平行就能补偿上述由定位误差带来的光栅周期误差。采用此补偿方法能够将基底与标准光栅表面的平行度调整到很高的精度,大大降低由标准光栅和基底定位误差带来的光栅周期误差,最大限度的发挥叠栅条纹法高精度调整光栅周期的优点。该方法不仅适用于洛艾镜干涉系统,也同样适用于其他平面全息光栅曝光系统。

### 参 考 文 献

- 1 E G Loewen, E Popov. *Diffraction Gratings and Applications* [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1997.
- 2 E A Sokolova, V Kruizinga, D De Bruijn, *et al.*. Computer modeling of a wavefront diffracted at a concave grating [J]. *J Opt Technol*, 2003, 70(8): 600–606.
- 3 Zhou Qian, Zeng Lijiang, Li Lifeng. Numerical simulation and experimental demonstration of error compensation between recording structure and use structure of flat-field holographic concave gratings [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(7): 1674–1678.  
周 倩, 曾理江, 李立峰. 平场全息凹面光栅制作结构与使用结构之间误差补偿作用的数值模拟与实验验证[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(7): 1674–1678.
- 4 Li Wenhao. *Study on the Plane Holographic Grating and IV-Type Concave Holographic Grating Design and Manufacture Technology of Holographic Grating* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008.  
李文昊. 平面及 IV 型凹面全息光栅曝光系统设计及掩模制作关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2008.
- 5 Yang Houmin. A new method for accurate determining the grooves of the plane holographic grating (PHG) during manufacturing [J]. *Optical Mechanical*, 1989, (5): 1–6.  
杨厚民. 平面全息光栅制作过程中精确判断线槽的新方法 [J]. *光学机械*, 1989, (5): 1–6.
- 6 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所. 一种平面全息光栅制作中精确控制刻线密度的方法: 中国, 200310115844.2 [P/OL]. 2004-11-10[2015-01-13]. <http://ir.ciomp.ac.cn/handle/181722/11303>.

栏目编辑: 史 敏