

文章编号:1004-4213(2010)12-2174-4

# 一种制作投影灰度正弦光栅的新方法

程萍,张超,阿不力孜·阿不都艾尼,陈向东,吴本科

(合肥工业大学 电子科学与应用物理学院,合肥 230009)

**摘要:**针对传统方法难以制作结构光三维投影测量设备的灰度正弦光栅元件,并以 Ronchi 光栅代替从而影响测量准确度,提出了一种制作灰度按正弦分布的光栅模板的新方法.通过对银盐全息干板透过率特性曲线的理论分析,指出在对比度为一的正弦干涉条纹下曝光不能得到线性记录和变换的原因,并提出了采用均匀非相干光预曝光提供偏置点来实现线性记录的新方法.实验表明,采用空间滤波法能够获得对称双光束正弦干涉条纹记录,并准确控制正弦干涉条纹曝光在干板的线性区域,可以达到线性记录并获得尽可能高的反衬度.

**关键词:**全息术;灰度正弦光栅;线性记录;银盐全息干板

**中图分类号:**O438.1

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103912.2174

## 0 引言

在使用光栅投影的光学三维测量设备中,需要投影出具有标准正弦分布的光栅条纹<sup>[1-2]</sup>.灰度呈正弦分布的光栅一般采用全息光学方法记录正弦干涉条纹.对于银盐记录介质,一般情况下,曝光时的入射光强和显影后的透射光强之间的普遍关系是非线性的,只有在特殊条件下,才能变成线性变换关系<sup>[3]</sup>.所以,分析和利用银盐记录介质的强度(灰度)透射特性,可以为制作高质量的投影灰度正弦光栅提供理论上的指导.本文对依据强度透射特性曲线进行线性记录与非线性记录的原理进行了理论分析,提出了一种非相干光和相干光结合实现线性记录制作投影正弦光栅的新方法,在银盐记录介质允许的最大对比度范围内实现线性变换关系,实验证实了该方法的可行性.

## 1 线性记录原理与新方法

### 1.1 透过率曲线及反衬度分析

在制作透过率按正弦变化的全息光栅的情况下,使用记录介质的透过率  $T$  与曝光量  $E$  的关系曲线更合适,如图 1. 可以看出  $T$ - $E$  曲线是非线性的,只有处于  $l$  和  $r$  两点之间的曲线段接近线性变化,因此有线性记录与非线性记录两种情况.线性记录是控制曝光量在曲线的线性范围内变化,这样记录的透过率就与输入的曝光量有线性关系.如果记录

的透过率与输入曝光量不具有线性关系,则为非线性记录.不同银盐全息干板的  $T$ - $E$  曲线形状相似,但线性区域在曲线上的位置和范围是不同的.设  $l$  和  $r$  点的曝光量和透光率坐标分别为  $(E_l, T_l)$  和  $(E_r, T_r)$ .

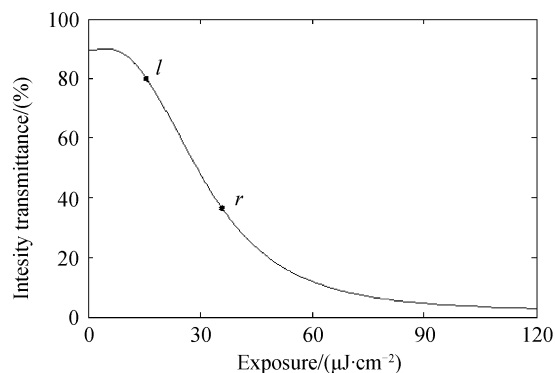


图 1  $T$ - $E$  曲线

Fig. 1  $T$ - $E$  curve

线性记录时,  $E$  在  $E_l$  到  $E_r$  范围内,透过率为

$$T = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot E \quad (1)$$

式中,  $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  是常量,且  $\alpha_1$  为负值;曝光量  $E$  为光强  $I$  与曝光时间  $t$  的乘积,即  $E = I \cdot t$ . 式(1)可写为

$$T = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot I \cdot t \quad (2)$$

考虑一维情况,设光强为  $I_1$  和  $I_2$  的两束相干平面光波产生干涉条纹的光强分布为

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \sin(2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot x) \quad (3)$$

式中,  $\xi$  是条纹的空间频率. 光强的最大值为  $I_m = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2}$ , 最小值为  $I_m = I_1 + I_2 - 2 \sqrt{I_1 I_2}$ , 当曝光量满足

$$E_l \leq I_m \cdot t < I_m \cdot t \leq E_r \quad (4)$$

即为线性记录. 注意到式(3)中当  $I_1 = I_2$  时,  $I_m =$

$0 < E_1$ , 则不可能实现线性记录. 将式(3)代入式(2)并整理可得

$$T = c_1 + c_2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot x) \quad (5)$$

式中  $c_1 = \alpha_0 + \alpha_1 t \cdot (I_1 + I_2)$ ,  $c_2 = 2\alpha_1 t \sqrt{I_1 I_2}$ .

式(5)表明, 在线性记录条件下, 正弦变化的光强变换为正弦变化的透过率.

由于透射光强正比于透过率, 从正弦条纹光场的反衬度的定义<sup>[4]</sup>可得所制作的透明胶片投影光栅其投影条纹的反衬度为

$$V = \frac{-c_2}{c_1} = \frac{-2\alpha_1 t \sqrt{I_1 I_2}}{\alpha_0 + \alpha_1 t (I_1 + I_2)} < 1 \quad (6)$$

式(6)表明干涉光场给定条件下, 通过透明胶片的线性记录下的反衬度总是低于曝光时干涉条纹的反衬度, 且随曝光时间(或曝光量)变化. 因此可以控制曝光时间获得需要的反衬度. 当曝光量变化部分充满 T-E 曲线的线性区, 即式(4)中的等号成立时, 制作的投影光栅的投影光场反衬度为

$$V = \frac{T_l - T_r}{T_l + T_r} \quad (7)$$

式(7)是线性记录下, 理论上的最大反衬度. 所以, 对给定的记录介质, 控制曝光量以充分利用线性区域, 可制作出反衬度高的光栅.

## 1.2 最小曝光量的预置

为制作高质量的投影低频正弦光栅, 采用本课题组提出的消散斑的空间滤波成像法产生正弦条纹<sup>[5]</sup>. 该方法具有可以精确控制光栅常量, 成像信噪比高等优点. 这种方法利用滤波后的正负一级谱点对称干涉成像, 即满足  $I_1 = I_2$ , 且有  $I_m = 0$ , 像面正弦干涉条纹的反衬度最高. 但是, 如果直接用正弦干涉条纹对全息干板曝光, 从前文分析可知将不可能得到曝光量和显影后透过光强度的线性变换. 针对这种不能由正弦条纹直接提供所需的最小阈值曝光量的情况, 本文设计了一种新的方法来实现银盐全息干板的线性记录: 由于线性记录的曝光量可看作由不变的部分和变化的部分组成, 所以整个曝光过程可分两步实现, 第一步利用均匀非相干光场记录预置最小曝光量, 第二步利用正弦相干光场记录变化曝光量. 由于采用均匀非相干光, 记录过程中全息干板后表面即使有反射光也不会产生干涉条纹, 抑制了相干噪音, 这一优点是相干光无法比拟的.

## 2 实验及结果

### 2.1 测量 T-E 曲线

不同记录介质的特性是不同的, 使用之前必须测量记录介质 T-E 曲线. 测量光路如图 2(a). 通过检测激光器功率变化, 调节可调光密度板以保持光强恒

定, 改变曝光时间可得到一系列曝光量, 显影后分别对应不同的透过率. 选用国产全息干版进行实验, 为获得高的信噪比和良好的光稳定性<sup>[6]</sup>, 将 D-19 显影液稀释 10 倍, 显影 5 min, 温度控制在 20 °C.

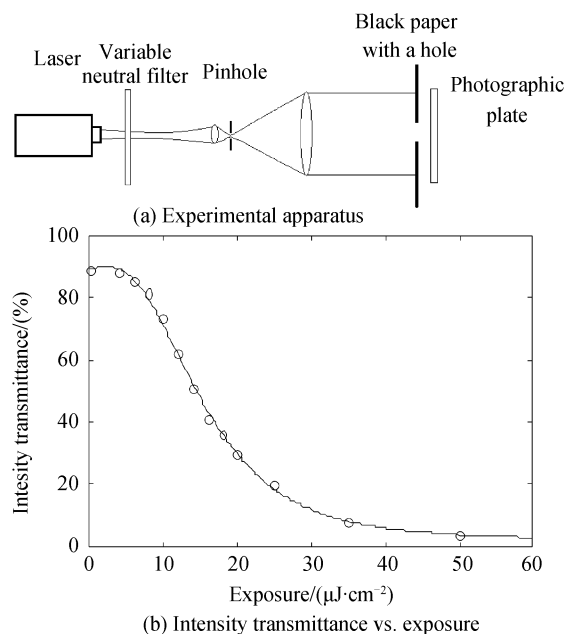


图 2 测量 T-E 曲线的实验

Fig. 2 Experiment for measuring the T-E curve

图 2(b)是实测的数据及拟合曲线, 其中横坐标是曝光量  $E$ , 纵坐标是透过率  $T$ , 线性区左右端点的坐标  $(E_l, T_l)$ ,  $(E_r, T_r)$  分别是  $(7, 0.8)$ ,  $(20, 0.3)$ .

### 2.2 均匀非相干光最小曝光量的预置

激光具有很好的相干性和非均匀的光强分布, 不适合用来产生用于曝光的均匀光场. 本文采用白光光源, 具有较好的效果. 光路如图 3(a), 图 3(b)是

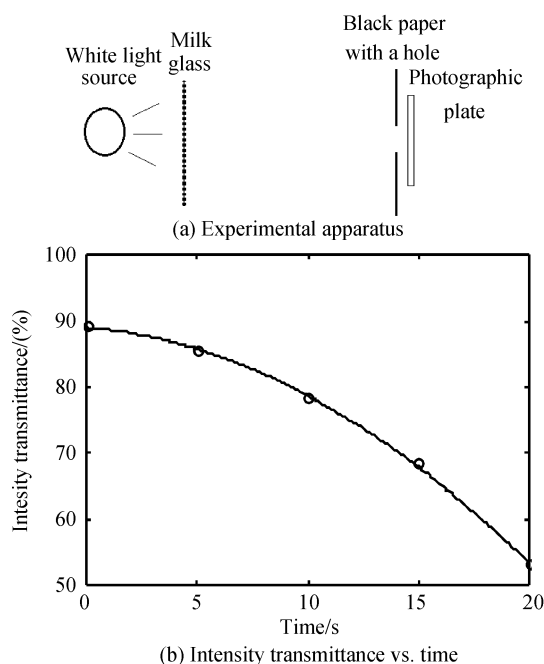


图 3 均匀光场曝光实验

Fig. 3 Experiment of exposing in uniform light field

通过改变曝光时间获得的数据,可以看出,当曝光时间约为 10 s 时,透过率为 0.8,该值对应线性区左端点( $E_l$ ,  $T_l$ )的  $T_l$ ,所以该时间下的曝光量可以作为线性记录的偏置点。

### 2.3 正弦干涉条纹曝光

在消激光散斑的阿贝滤波成像光路中,用黑白光栅作为物,在频谱面上放置滤波器,只让正负一级频谱通过,像面上得到光强呈正弦分布的条纹,条纹反衬度为一。图 4 是 CCD 在像面上采集的图像。将第一步在白光下曝光 10 s 的干板放在像面上进行第二次曝光,控制第二次的平均曝光量为  $(E_r - E_l) / 2$ ,即  $(20 - 7) / 2 = 6.5$ ,可实现  $T-E$  曲线上维持线性的最大曝光量动态范围记录,经过后续显影,定影等处理即可得到满足应用要求的投影正弦光栅。像面光场的平均光强要选择适当,若光强过大或过小导致曝光时间过短或过长都可能引起互易律失效<sup>[7-8]</sup>,从而得不到预期的透过率。

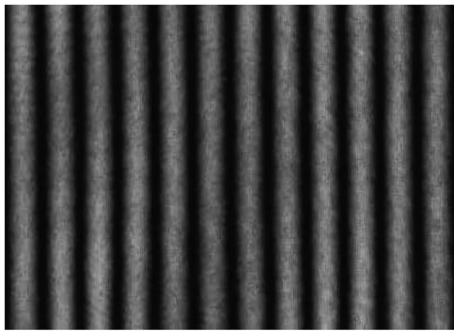


图 4 像面上的条纹  
Fig. 4 Fringes on the image plane

### 2.4 实验结果

图 5(a)是按照提出的方法制出的光栅的衍射谱点,几乎没有二级和更高级次的谱点,说明正弦性较好。图 5(b)是干板直接在对比度为一的正弦光场下曝光制出的光栅的谱点,可以观察到二级和三级谱点,说明不是标准的正弦光栅。但测量表明图 5

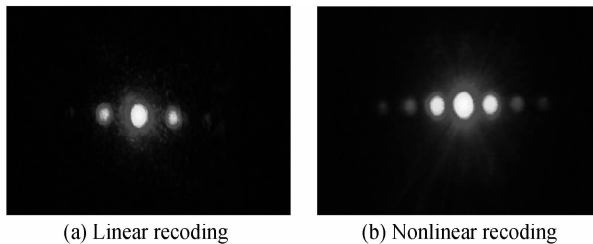


图 5 光栅衍射谱点对比  
Fig. 5 The contrast of diffraction pattern of gratings

(a)对比度并不理想,没有达到最大的对比度,这可能与曝光过程中曝光量控制不够精确有关,还有待进一步的细致研究,但可以肯定新方法能明显提高光栅的正弦性。

## 3 结论

本文从分析银盐记录介质  $T-E$  特性曲线出发,给出了线性记录的原理,投影正弦光栅理论上的最大反衬度,阐述了制作投影正弦光栅时线性记录的必要性,并针对在制作低频投影光栅时不能一次性提供偏置的情况,提出了一种新的方法,设计了实现该方法的实验过程,并做了验证实验,实验结果证实了方法的可行性及有效性,这些工作可为制作高质量的投影光栅提供理论和实验上的指导。

### 参考文献

- [1] LIU Jun-yi, JIANG Kai-yong, GU Yong-hua, *et al.* Accuracy analysis and application of the profilometry with projecting grating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5): 80-84.  
林俊义,江开勇,顾勇华,等. 光栅投影轮廓术的准确度分析及应用[J]. *光电工程*, 2008, **35**(5): 80-84.
- [2] 陈家璧,苏显渝. 光学信息技术原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 339-350
- [3] GOODMAN J W. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚,刘培森,陈家璧,等,译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2006: 157-158.
- [4] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 310-314
- [5] CHENG Ping, ZHU Hai-jin, ZHANG Chao, *et al.* Research of laser speckle reduction for imaging of holographic sinusoidal grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 317-321.  
程萍,朱海金,张超,等. 消激光散斑的全息正弦光栅制作技术研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 317-321.
- [6] ZHANG Chun-ping, ZHANG Guang-yin, LI Zeng-fa, *et al.* Study of spectrum characteristic for the silver halide holographic plates by dilution developing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, **28**(9): 523-526.  
张春平,张光寅,李增发,等. 稀释显影卤化银全息干板的光谱特性的研究[J]. *科学通报*, 1983, **28**(9): 523-526.
- [7] ZHENG Xian-xu, LI Ze-ren, TIAN Jian-hua, *et al.* Time response character of holographic plate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(10): 1413-1416.  
郑贤旭,李泽仁,田建华,等. 全息干板的时间响应特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1413-1416.
- [8] ZHENG Xian-xu, LI Ze-ren, LI Zuo-you, *et al.* A probabilistic model and numerical simulations for reciprocity law failure of holographic plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 610-612.  
郑贤旭,李泽仁,李作友,等. 全息干板互易律失效规律的理论研究与数值模拟[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 610-612.

## A Novel Method for Projection Gray Sinusoidal Grating Fabrication

CHENG Ping, ZHANG Chao, ABLIZ Abdugheni, CHEN Xiang-dong, WU Ben-ke

(School of Electronic Science and Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Traditional methods are difficult to fabricate the gray sinusoidal grating in structured-light three-dimension projection measuring system, and if replaced by Ronchi grating will affect the measurement accuracy. A novel method for gray sinusoidal grating plate fabrication is presented. Through the analysis of transmittance curve of holographic silver halide plate, the reason that sinusoidal interference pattern of contrast degree for 1 can not be linearly recorded and transformed is pointed out. A new method of linear recording is proposed, which provides a pre-exposure uniformly incoherent light bias point. The experimental results show that the sinusoidal interference fringes record of symmetrical two-beam can be obtained by the spatial filtering method, and the linear and high contrast record of sinusoidal interference fringe can be achieved by exposure controlled accurately in the linear region of the holographic silver halide plate.

**Key words:** Holography; Grey sinusoidal grating; Linear recording; Holographic silver halide plate



**CHENG Ping** was born in 1957. She received the M. S. degree from University of Science and Technology of China, in 1987. Now she is an associate professor at Hefei University of Technology, and her research interests focus on optical information processing and holographic optical elements.