

文章编号: 1005-0086(2001)07-0728-04

大角度照明全息图有害干涉条纹产生机理及消除方法*

郭怀梅, 张向苏, 刘 守

(厦门大学物理系, 福建 厦门 361005)

摘要: 实验数据和理论分析证实, 大角度照明全息图上的破坏性干涉条纹是扩束参考光在全息干版表面产生的等倾干涉条纹。实验结果表明, 将参考光设置成平行光或曝光前在全息干版的玻璃面贴黑纸, 均能有效消除此类干涉条纹。该技术已应用在全息灯具的制做中。

关键词: 大角度照明; 全息图; 有害干涉条纹; 等倾干涉

中图分类号: TB 877.1 **文献标识码:** A

Generating Mechanism and Eliminating Methods of Harmful Interference Fringes in the Hologram with Large Illumination Angles

GUO Huai-mei ZHANG Xiang-su LU Shou

(Department of Physics Xiamen University Xiamen 361005 China)

Abstract The experimental data and theoretical analysis verify that harmful interference fringes in the hologram with large illumination angles are fringes of equal inclination caused by divergent reference beam. The experimental results show that such harmful interference fringes can be effectively eliminated either by using collimated reference beam in hologram recording or by attaching a piece of black paper on the surface of glass substrate of the recording plate

Key words large illumination angle; hologram; harmful interference fringe; fringes with equal inclination

1 引言

显示全息图的照明光角度通常设置在 45° 左右。照明光角度设置在 60° 以上的全息图, 表面会有明显的干涉条纹, 条纹的宽度及间隔在 mm 数量级, 并随着照明光角度的增大而增大。这种干涉条纹叠加在全息图像上, 严重破坏了图像的观察效果^[1, 2]。

在显示全息图的实际应用中, 为将照明光源与全息图制成一体, 必须将照明光的角度设置在 60° 以上。因此有害干涉条纹就成了制作大角度照明全息图必须解决的关键问题。

早先采取的方法^[2]是在记录大角度全息图时, 将全息版由胶面对着参考光改为玻璃面对着参考光, 可使干涉条纹变细且对比度变差, 这样对图像的影响相对就比较小。此方法虽然对全息图像的观察效果有一

定改善, 但是并不理想。

本文分析了大角度照明全息图有害干涉条纹产生及变化的机理, 提出了相应的解决方法, 有害干涉条纹得到了有效的抑制, 全息图像的质量明显提高。

为避免在大角度照明的情况下产生的像模糊^[3], 我们在实验中采用的是彩虹全息图。

2 有害干涉条纹产生机理分析

2.1 实验

全息图照明光的角度与记录全息图的参考光共轭。在记录白光重现全息图时, 参考光通常用扩束光, 随着参考光角度的增大, 全息干版上的有害干涉条纹越来越明显。为弄清干涉条纹与物光的关系, 我们进行了实验: 将参考光挡住, 只用物光对全息干版进行曝光。物光的设置与通常制做二步法彩虹全息图的第

* 收稿日期: 2001-04-13

* 基金项目: 福建省科技厅国际合作资助项目 (98-Z-1)

2步相同,即将菲涅尔全息图重现的实像从法线方向成像到记录干版上,曝光后记录下的图像表明并没有干涉条纹,说明干涉条纹只与参考光有关

去掉物光,只用扩束参考光照射全息干版并改变入射光角度,可看到的特征有 1)干涉条纹在光入射角为 0° 时为同心圆;随着入射光角度逐渐增大,条纹形状由同心圆变为圆弧且弧的曲率半径越来越大,即条纹越来越直; 2)条纹间隔在形状为同心圆时较大,然后变小,在入射光角度为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 时由于间隔太小几乎看不到条纹,但随着角度的增大,条纹间隔又变得越来越大且条纹也越来越粗; 3)条纹在角度小时对比度很差,当角度增大到 60° 以上时,对比度随角度的增大而越来越强。

测试中光源到平板的距离为 150 cm,平板厚为 2 mm,折射率 1.52 的玻璃板,测得的条纹间隔随扩束 He-Ne 激光的入射角变化所得的数据示于图 1(曲线 a) 在全息银盐干版上记录全息图时,感光胶的折射率为 1.62 玻璃基板的折射率为 1.52 厚度 2 mm,由于感光胶和玻璃折射率相近,所以可大致地将干版当作只有上、下两个界面的平行平板。其扩束参考光造成的干涉条纹也就可以用图 1 曲线 a 近似表示。

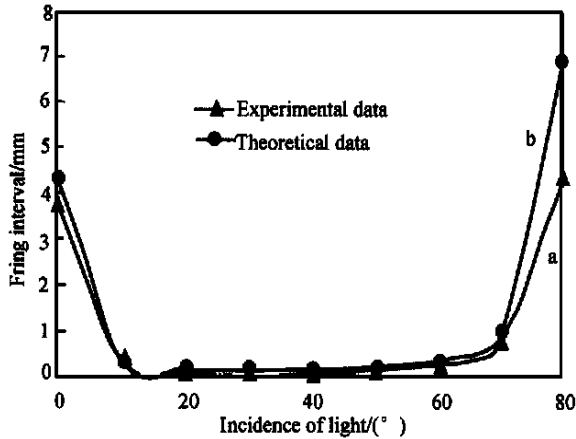


图 1 条纹间隔相对入射光角度的变化曲线

Fig 1 Variation of fringe interval with incident angle of light (a) Experimental data (b) Theoretical data

2.2 理论分析

从光学干涉理论^[4]可知,点光源照射在平行平板上时,由于光入射在平板表面各点的角度不同,从板的上、下 2 个表面产生的反射光相互干涉,相干空间各点的合成光亮度与入射光角度有关,形成的条纹为等倾干涉条纹。平行平板上、下两面反射光的光程差为

$$\Delta L = 2n'd \cos \theta' + \lambda/2 \quad (1)$$

其中, n' 为平板的折射率; d 为平板的厚度; θ' 为光在上表面的折射角; λ 为光波长。由于全息干版的感光胶粘附在玻璃基板的表面,所以胶面上记录的是在玻璃板表面上形成的干涉条纹,光路如图 2 所示。(1)式中当 $\Delta L = k\lambda$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) 时干涉条纹为亮条纹,所以在平板表面上的 2 条相邻亮条纹可以分别写为

$$2n'd \cos \theta'_1 + \lambda/2 = k\lambda \quad (2)$$

$$2n'd \cos \theta'_2 + \lambda/2 = (k+1)\lambda \quad (3)$$

其中 θ_1 和 θ_2 分别是入射角为 θ_1 和 θ_2 光的折射角。

(2)式和(3)式相减得

$$2n'd(\cos \theta'_2 - \cos \theta'_1) = \lambda \quad (4)$$

(4)式表明了两相邻条纹对应的 2 个角度关系。根据折射定律可从 θ_1 和 θ_2 得出光在平板表面的入射角 θ_1 和 θ_2 , 然后应用简单的三角关系可从图 2 得出

$$\begin{aligned} \text{条纹间隔} &= \overline{OP_2} - \overline{OP_1} = h(\tan \theta_2 - \tan \theta_1) + \\ &2d(\tan \theta'_2 - \tan \theta'_1) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 h 为光源到平板表面的距离。从(5)式可看出,条纹间隔随 h 和 d 的增大而增大,但随着光源相对平板的入射角有从大到小又从小到大的变化。由于(5)式中第 2 项约比第 1 项小 2 个数量级,所以在计算中可将第 2 项忽略。可见当 d 比 h 小很多时, d 对条纹间隔的大小不起什么影响。

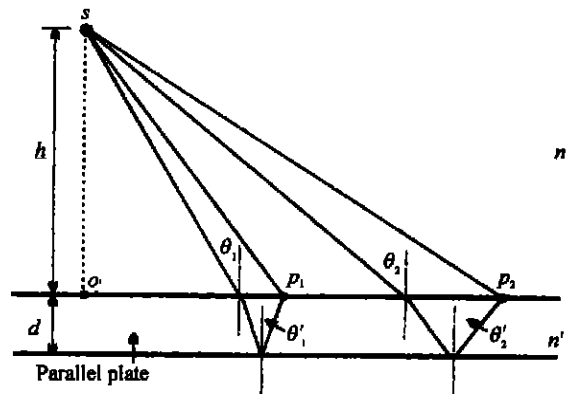


图 2 点光源在平行平板上产生的等倾双光束干涉示意图

Fig 2 Interference of equal inclination generated on a parallel plate by point light source (P_1, P_2 are the locations of two adjacent bright lines)

若选定入射光角度,如设 $\theta_1 = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots$ 和 80° , 利用折射定理和(4)式可推导出相应的 θ_2, θ'_1 和 θ'_2 。设 $h = 150 \text{ cm}$, $d = 2 \text{ mm}$ 和 $n' = 1.52$ (这些参数与实验参数一致), 分别代入(5)式, 则可得条纹间隔对应不同入射光角度变化的理论值(见图 1 曲线 b)。比较图 1 中的曲线 a 和 b 可以看出, 实验数据和理论

计算得出的结果相当符合。

实验结果还表明, 条纹的对比度随着入射角角度的增大而加强, 这是因为角度越大在平板下表面的反射越大, 使两束相干光的光强越接近。条纹可见度的理论值为^[5]

$$V = \frac{2a_1 a_2 |\cos \theta|}{a_1^2 + a_2^2} \quad (6)$$

其中, a_1 、 a_2 分别为两相干光的振幅; θ 为两相干光偏振方向的夹角。在此, 两相干光来自同一垂直偏振的光源, 即 $\theta = 0$, 所以条纹可见度只取决于两束光的振幅, 即两束光的强度。从(6)式可见, $a_1 = a_2$ 时 $V = 1$ 为最大值, 表明两束相干光的光强越接近, 条纹的可见度就越好。所以入射光角度小时, 条纹间隔再宽也看不清, 而角度大时条纹则看得很清楚。

从垂直于平行平板的方向观察, 点光源在平行平板上产生的等倾干涉条纹是一系列同心圆^[4], 圆心在光入射角为 0° 处, 如图 3所示。实验观察与此相符。离圆心越远处相对光源的角度就越大, 条纹间隔也相应变化。实际上图 1和图 3是一致的, 图 3中的 a、b 和 c 代表 3块全息干版, 相对于光源角度分别为 0° 、 60° 和 80° , 它们分别截取了同心圆的不同部分, 所以落在它们上面的条纹形状和间隔都不一样。此状况与在实验中用参考光以 0° 、 60° 和 80° 的角度入射, 在全息干版表面观察到的条纹情况一致。

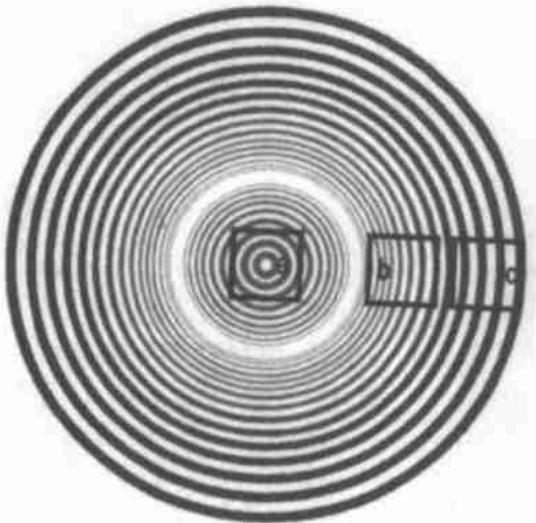


图 3 点光源在平行平板上产生的等倾干涉条纹全景示意图

Fig 3 Whole interference pattern of equal inclination generated on parallel plate by a point light source (a, b and c represent three holographic plates with light incidence of 0° , 60° and 80° respectively, intersecting different parts on the pattern)

以上分析证实, 在大角度照明下, 全息图上的干涉条纹是由扩束参考光在全息干版上产生的等倾干涉条纹。

3 消除有害干涉条纹的方法

3.1 采用平行参考光记录全息图

由于干涉条纹是由参考光照射在全息干版上各点的角度不同而产生的等倾干涉, 所以将参考光改成平行光, 使照射在干版表面各点的光的角度一样, 即可消除等倾干涉。

实验中在拍摄彩虹全息图的第 2步, 将参考光设置成平行光, 角度取 80° , 全息干版为银盐版, 光源为 He-Ne 激光的 633 nm 波长, 分别记录下透射全息图和反射全息图, 重现像的照片分别示于图 4(a)、(b)。它们显示, 采用了平行参考光后, 全息图像中已不存在有害干涉条纹的干扰, 观察效果很好。可见此方法对消除有害干涉条纹十分有效。

3.2 在全息干版玻璃面贴黑纸

界面反射随入射光的角度增大而增大。若能大大减小平板下表面的反射, 双光束干涉就会因为两束光的光强相差太大而导致条纹可见度很低以致于看不见条纹。采用在全息干版背面贴黑纸的方法可以限制光在干版下表面的反射, 以达到抑制条纹的目的。

实验中在记录彩虹全息图的第 2步, 将一张粗面黑纸在水中浸湿, 然后贴在银盐干版的玻璃面上, 要求附着均匀、无气泡。水的作用一是使黑纸不会从玻璃板上脱落, 二是起折射率匹配的作用。让扩束参考光以 80° 的角度入射, 用 He-Ne 激光的 633 nm 波长拍摄透射全息图, 获得了很好的效果。图 4(c)是白光重现全息图像的黑白照片, 从中根本看不到有害干涉条纹, 说明方法亦十分有效。由于在记录全息图时全息干版的玻璃面被黑纸蒙着, 只能用于拍摄透射全息图。

将图 4与文献 [2]中的图比较可看出, 我们采取的两种方法是有效的。

4 结论及讨论

研究表明, 大角度照明全息图上的有害干涉条纹是由扩束参考光形成的等倾干涉条纹。我们采取的 2个解决方法均获得了很好的效果, 1)是将参考光改变成平行光, 这样在全息图记录光路中必须增加 1个透镜来准直, 所以光路比通常采用的记录光路复杂一些; 2)是不改变记录光路, 仍使用扩束参考光, 但在全息干版的玻璃面贴黑纸来抑制光在界面的反射。这种



图 4 采用了两种方法后,以参考光 80° 记录的全息图像,有效抑制了有害干涉条纹

Fig 4 Harmful interference fringes are effectively eliminated on the holograms with 80° incidence of reference beams by using the two methods (a) Transmission hologram using parallel reference beam (b) Reflection hologram using parallel reference beam (c) Transmission hologram by attaching a piece of black paper on glass side of the plate while recording

方法在实际应用上较简单,但只能制作透射全息图。不过我们较早的研究^[2]表明,在照明光角度很大时(如 80° 以上),透射全息图可以用反射光照明,重现的全息图像仍具有相当好的清晰度和亮度,但是要求全息图有很高的衍射效率。

有条件的话,在全息干版的玻璃面镀增透膜可以减小界面的反射,因此可大大降低条纹的可见度。这样的全息干版不仅能拍摄透射全息图,也可以拍摄反射全息图。

采用以上技术制作的大角度照明彩虹全息图已应用在灯具装饰中,表明此技术有实际应用价值。由于光源入射角可以做得很大,所以可以将照明灯安装在全息图的框架上,使全息图和光源合成一体。这样制成的大面积艺术显示全息图不必另外安装照明光,并可随处放置观赏,可望有很好的市场前景。

参 考 文 献:

- [1] Benton S, Sabrina M, Shirakura A. Edge-lit rainbow holograms [A]. Benton S Proc SPIE [C]. Bellingham: SPIE, 1990 1212: 149-157.
- [2] 张向苏,刘守,郭怀梅.大角度照明彩虹全息图制作技术及特性[J].激光杂志,2000 21(3): 56-57.
- [3] Ueda H, Shimizu E, Kubota T. Image blur of edge-illuminated holograms [J]. Opt Eng, 1998 37(1): 241-246.
- [4] Born M, Wolf E, 杨霞孙.光学原理[M].北京:科学出版社,1978 366-372.
- [5] 刘守,张向苏,陈朋,等.高质量软片反射全息图拍摄技术[J].厦门大学学报(自然科学版),1999 38(2): 216-219.

作者简介:

郭怀梅 (1976-),女,1998年河北师范大学物理系毕业并获学士学位,同年考入厦门大学物理系攻读硕士学位,参加“边缘照明显示全息技术”的课题研究。