

用旋转照相法制造相息图

陈岩松 姜长山 明海
(中国科学院物理研究所) (中国科学技术大学)

提 要

本文提出了用旋转照相法设计制作旋转轴对称相息图的方案,并给出了球面相息图的实验结果。此方法减小了相位离散值引起的量子化噪音,它适用于制作一切球面和非球面的具有旋转轴对称的相息图。

一、引 言

1969年 L. B. Lesem 等提出用计算机制造一种新的光学元件的方法,此种光学元件称为 Kinoform^[1],我们称为相息图。它是一种不引入参考束,假设光波振幅是常数,直接记录光波相位的元件。当这种相位型的元件再现时,除了反射和吸收损耗外,所有的光波极其理想地衍射到象上去。所以,它是一种同轴再现、具有极高衍射效率的光学元件。

历史上的实验表明,随着对光学衍射元件相位分布要求的复杂化,在技术上要实现这一点就愈来愈困难。近年来,由于计算机技术以及由它控制的绘图仪和新型记录材料的发展,使得这些问题逐步得到解决。但是,相位值的离散化必将给再现象带来附加的量子化噪音。1975年 V. P. Koronkevich 等^[2]设计了一种特殊的反射式法布里干涉仪,他们用这种装置使每个波带获得锯齿状的光强分布,从而用纯光学的方法制成了 Kinoform 球面相息图。用这种方法制得的透镜的最大波带数只能达到30个左右,因而没有太大的实用价值。

用旋转照相法设计制作旋转轴对称的相息图,具有下列优点:(1)用此方法可以设计制造任何具有旋转轴对称的非球面光学元件,例如椭球曲面、旋转双曲面等;(2)相息图的波带数上限取决于照相系统的分辨本领,故可以制造更多波带数的相息图;(3)在每个波带中相位值是连续的,原则上不存在量子化噪音;(4)制作时不用计算机控制的绘图仪等精密设备,所以方法简便通用。作为例子,我们设计制造了作用相当于球面透镜的二维相息图,它包含30个波带。文章第二部分叙述此方法的基本原理,第三部分以球面相息图为例叙述了具体制作方法。

二、原 理

相息图的基本原理与特性已有不少文章^[1~6]作了详细论述。本文仅对一类具有旋转轴对称的相息图进行讨论。

具有旋转轴对称的透明体,在极坐标中,振幅透过率 t 仅是半径 r 的函数,并且假定振

幅模数是常数,所以只是相位与 r 有关。因此

$$t(r) = A \exp [i\varphi(r)]. \quad (1)$$

可见这是以相位值 2π 为周期的周期函数,每个 2π 周期的间隔为一个波带。因此一个

旋转轴对称体的相息图是由许多同心的波带组成的。每个波带中的相位分布必须满足下列关系式:

$$\varphi_n(r) = \varphi(r) - 2\pi n \quad (n=0, 1, \dots). \quad (2)$$

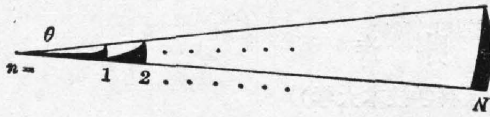


图1 小角度扇形图的绘制示意

如果用感光材料的折射率变化或厚度起伏

表示相位,那么通过控制曝光量可以控制所要求的相位值。为此,首先设计制作一个用感光乳胶做的、振幅型的波带负片,它的光密度分布按照一定的对应关系与 $\varphi_n(r)$ 相对应。考虑到此负片的尺寸甚小,以及具有轴对称性质,首先绘制一个放大的小角度扇形图(图1)。波带区的黑白区边界线按照 $\varphi_n(r)$ 的函数形状和一定的对应关系绘制。然后使扇形图围绕中心轴旋转并用相机缩小照相,制得振幅型负片。最后采用适当的记录材料,通过负片进行压印曝光处理,制造所需要的相息图。

三、球面相息图的设计与制造

在傍轴近似下,球面透镜的振幅透过率为

$$t(r) = \exp [i\varphi(r)] = \exp \left[\frac{i\pi}{\lambda f} r^2 \right], \quad (3)$$

其中 λ 为光波长, f 为透镜焦距, r 是极坐标的径向坐标。

考虑到每个波带的边界处, $\varphi_n(r) = 0$ 。这样从(2)式和(3)式立即得到 n 个波带的半径

$$r_n = (2n\lambda f)^{\frac{1}{2}} \quad (n=0, 1, \dots, N). \quad (4)$$

设 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$, $f = 5.7 \times 10^5 \mu\text{m}$, 则

$$r_n = 8.47 \times 10^2 (n)^{\frac{1}{2}} \mu\text{m}. \quad (5)$$

我们取 30 个波带,即 $N = 30$ 。在 10° 的扇形区,按照(5)式的尺寸放大 100 倍划分 30 个波带区。

为了绘制各扇形波带区中的边界曲线,首先必须确定 m 个取样点,然后把它们光滑地连接成曲线以及把曲线范围内的区域涂黑。 m 个边界点的确定是这样进行的: 设 K 为取样点序数,即 $K = 1, 2, \dots, m$, 则各波带内取样点的径向坐标为

$$r_{nK} = [2(n + K/m)\lambda f]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

扇形角度也要分成 m 个部分,它们之间的比例根据文献[3]提供的曝光量、光密度、相位值之间的对应关系确定。这些分角线与以 r_{nK} 为半径的弧线的交点,就是所要求的取样点。取样点数愈多,曲线愈精确。

通过照相缩微方式把放大 100 倍的扇形底图缩小 10 倍,摄制在全息干板上,制成基片(图2)。

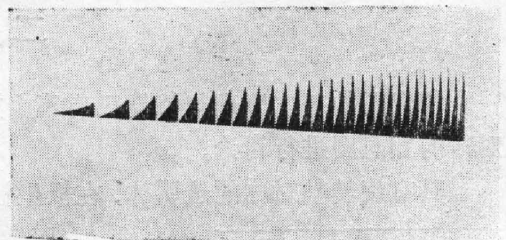


图2 扇形基片比底图缩小 10 倍

再把基片按装于旋转盘上,并精密地调节同心度(误差小于 10 微米)。然后在其转动的情况下,用相机再缩小 10 倍拍摄。控制曝光量与处理条件,最后制得各波带内的密度分布为锯齿形的负片。

图 3 是用 3CS 型显微密度计扫描仪对负片测试的结果,可见各波带中的密度分布为锯齿状。它正是制造球面相息图所要的那种分布。

用接触压印的方式,通过负片获得的正片见图 4。正片经过漂白处理,干燥后就是一幅球面相息图,直径为 9.3 mm。

图 5 是用干涉显微镜(氦氖激光作光源)对相息图的第 29 个波带进行测试所拍摄的干涉图。条纹的弯曲程度定量地反映乳胶起伏量的大小。因为这是被测物的反射干涉图,所以一个条纹周期的弯曲量等于 $\frac{\lambda}{2}$ 的乳胶起伏量。从图中可见,最大的起伏量达四个周期,即 2λ 。设明胶的折射率为

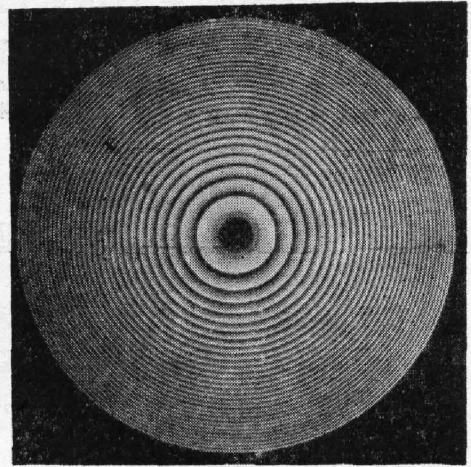
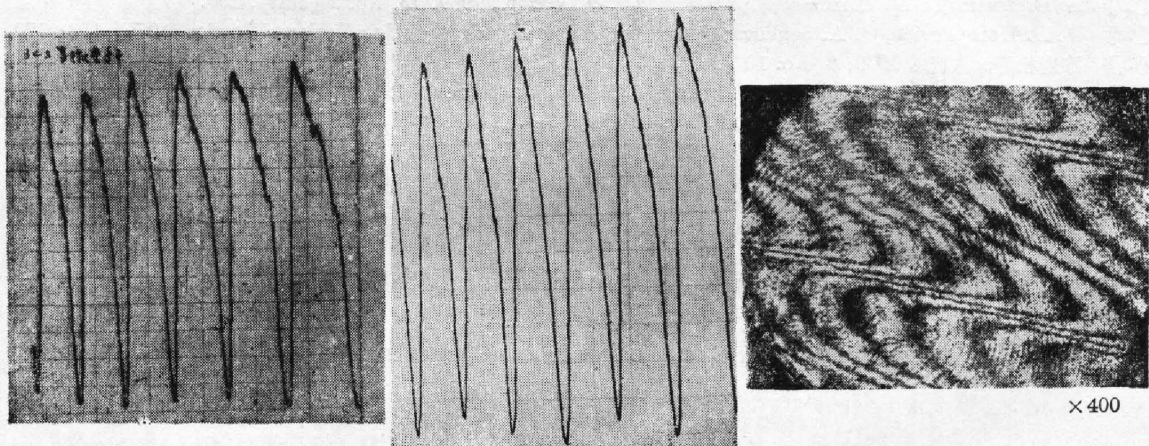


图 4 负片第 3~8 个波带的密度分布

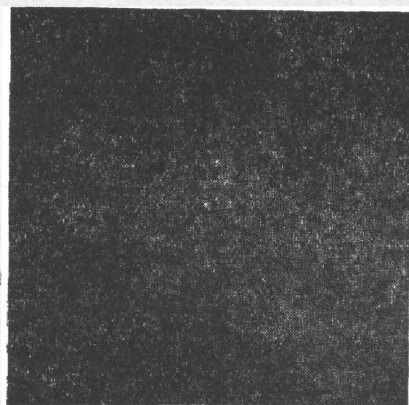


(a)

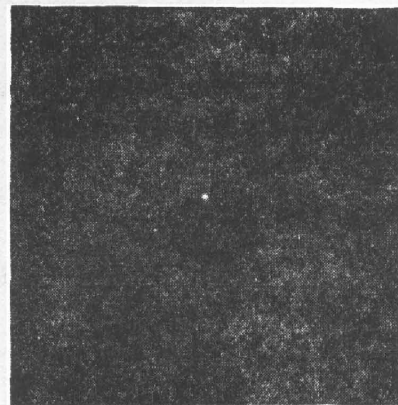
(b)

图 5 相息图第 29 个波带的乳胶层表面起伏的干涉图

图 3 球面相息图未漂白的正片



(a) 控制曝光量压制噪声



(b) 控制曝光量显现噪声

图 6 球面相息图聚焦象

1.5, 则透过光波恰好延迟 2π 。用 $\lambda=6328 \text{ \AA}$ 的平面光波照明相息图, 可以观察到透射光波有明显的聚焦现象, 并测得焦距 $f=620 \text{ mm}$ 。图 6 是它的聚焦象, 其中一幅在焦点附近出现微弱的噪音, 这是由于相位匹配不够精确, 漂白乳胶层起伏的空间分辨率不够高等因素造成的。如果采用空间分辨率更高的记录材料制作相息图, 例如硫砷玻璃, 并实现更精确的相位匹配, 那么噪音必然大下降。

四、结 论

在光学设计与光学加工中, 制造非球面的光学元件是十分困难的。本文叙述的旋转照相法适用于制造任何具有旋转轴对称的非球面的光学元件——相息图, 从而为这类光学元件的设计制造提供了一条切实可行的途径。尤其对于长波区域的相息图, 例如红外和微波领域, 它更具有诱人的前景。

作者对王玉堂、郑师海、董碧珍同志在工作中进行的讨论和帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] L. B. Lesem, D. M. Hirsch *et al.*; *IBM J. Res. & Develop.*, 1969, **13**, No. 2 (Mar), 150.
- [2] V. P. Koronkevich, G. A. Senkova; *Optical Information Processing* (New York and London, 1975), 153~170.
- [3] 陈岩松等;《激光》, 1979, **6**, No. 10 (Oct), 28.
- [4] J. C. Patan *et al.*; *IBM J. Res. & Develop.*, 1970, **14**, No. 5 (Sep), 485.
- [5] W. J. Pallas; *Opt. Commun.*, 1973, **8**, No. 4 (Aug), 340.
- [6] J. P. Riley, F. N. Birkett; *Opt. Acta*, 1977, **24**, No. 10 (Oct), 999.

Make up Kinoform by the method of rotation-photograph

CHEN YANSONG AND JIANG CHANGSHAN
(*Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing*)

MING HAI
(*Chinese University of Science and Technology, Hefei*)

(Received 15 May 1980)

Abstract

A method of rotation-photograph was suggested by which the Kinoform with axial rotating symmetry was made up, and experimental results of the spherical Kinoform was presented. The method reduces the noise caused by discrete phase on reconstructing image. This method can apply to either spherical or aspherical kind of Kinoform with axial rotating symmetry.