

用相位光栅实现多重成象

王玉堂 樊晓泉

(中国科学院物理所) (安徽大学)

提要: 提出一种用扫描曝光来制备相位光栅的方法,过程简单,易于控制。文中给出了原理及利用制备的三角相位光栅所获得的实验结果。

Multiple imaging by phase grating

Wang Yutang

(Institute of Physics, Academia Sinica)

Fan Xiaoquan

(Anhui University)

Abstract: Multiple imaging by phase grating has the advantages of better image quality and higher efficiency compared with other methods. A method of scanning-exposure was suggested, triangular phase grating was made up by this method. Its principle and experimental results are presented in this paper.

一、引言

L. P. Boivin 所提出的用相位光栅实现多重成象的方法与用小孔或蝇眼列阵^[1]、空间取样滤波器^[2]以及傅里叶变换全息图^[3]的成象方法相比,具有成象质量好、光能利用率高和多重象光强易于控制等优点^[4]。L. P. Boivin 采用光学刻蚀法制备了矩形相位光栅,然而用这种方法制备正弦或三角形相位光栅是相当困难,甚至是不可能的。我们采用扫描曝光的方法制备了三角相位光栅,过程简单,易于控制,利用这种光栅获得了较好的多重象。

二、原理

对于一个二维相位光栅,其相位变化可以表示为:

$$\Phi(x, y) = \phi(x) + \phi(y) \quad (1)$$

这样 x, y 方向可以分别进行讨论。

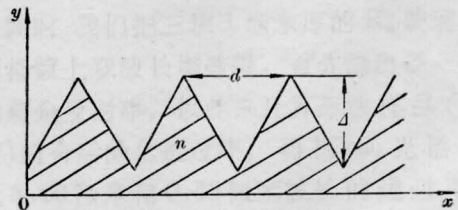


图1 三角相位光栅示意图

收稿日期: 1983年2月1日。

如果三角形相位光栅的光栅常数为 d , 介质的最大起伏量为 Δ , 介质的折射率为 n , 见图 1。则光栅的相位变化可表示为:

$$\begin{aligned} \phi(x) &= 4\pi(n-1)\Delta x/\lambda d \\ 0 < x < d/2 \\ \phi(x) &= 4\pi(n-1)\Delta(d-x)/\lambda d \\ d/2 < x < d \end{aligned} \quad (2)$$

若入射光经过光栅后的衍射角为 θ 并设 $P = \sin \theta$, 则光栅单个相位周期所衍射的光振幅为:

$$\begin{aligned} A(p) &= \int \exp[-i\phi(x)] \\ &\quad \times \exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda} px\right] dx \end{aligned} \quad (3)$$

被有 N 个相位周期的光栅衍射的花样强度为:

$$I(u) = E(u) \sin^2 2Nu / \sin^2 2u \quad (4)$$

其中 $u = \frac{\pi d}{2\lambda} \sin \theta$

$$\begin{aligned} E(u) &= \left| \int_0^d \exp[-i\phi(x)] \right. \\ &\quad \left. \times \exp[-iux/d] dx \right|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$E(u)$ 是由相位光栅所产生的衍射包络, 直接由光栅的相位变化决定。

令 $\alpha = \pi(n-1) \cdot \Delta/\lambda$ 并将 (2) 代入 (5) 得

$$\begin{aligned} E(u, \alpha) &= [\sin^2(u+\alpha)/(u+\alpha)^2] \\ &\quad + [\sin^2(u-\alpha)/(u-\alpha)^2] \\ &\quad - [\sin^2(u-\alpha)/(u^2-\alpha^2)] \\ &\quad - [\sin^2(u+\alpha)/(u^2-\alpha^2)] \\ &\quad + [\sin^2 2u/(u^2-\alpha^2)] \end{aligned} \quad (6)$$

从 (4) 和 (6) 可以看出, 光栅第 m 级衍射主极大强度正比于 $E\left(m \frac{\pi}{2}, \alpha\right)$:

$$E\left(m \frac{\pi}{2}, \alpha\right) = \begin{cases} \sin^2 \alpha / \alpha^2 & (m=0) \\ \alpha^2 \cos^2 \alpha / \left[\frac{m^2 \pi^2}{4} - \alpha^2 \right]^2 & (m=\text{奇数}) \\ \alpha^2 \sin^2 \alpha / \left[\frac{m^2 \pi^2}{4} - \alpha^2 \right]^2 & (m=\text{偶数}) \\ \text{各项之和} \end{cases} \quad (7)$$

这样就可以通过控制 α 来达到控制衍射光的强度。令

$$E\left(0, \alpha\right) = E\left(\frac{\pi}{2}, \alpha\right) = E\left(-\frac{\pi}{2}, \alpha\right)$$

则有

$$\tan \alpha = \alpha^2 / \left[\frac{\pi^2}{4} - \alpha^2 \right] \quad (8)$$

满足 (8) 式的条件是 $\alpha = 1.822$ 。因为 $\alpha = \pi(n-1)\Delta/\lambda$, 只要确定制备光栅的介质及所用光源, 则 n 和 λ 就确定, 这样就可以通过控制 Δ 来使得零级与 ± 1 级的衍射光强相等, 一个一维相位光栅就可以获得三个等强度的衍射像。一个二维光栅可以得到 3×3 个等强度的像。通常所采用的实际光路是多级成像, 得到的像可以足够多。

三、三角相位光栅的设计与制备

利用一般的镀膜、涂层或光学刻蚀法制备复杂的相位光栅, 如正弦、三角形的相位光栅是相当困难, 甚至是不可能的。我们根据全息干板漂白乳胶厚度起伏的特性, 采用扫描曝光法解决了这一问题, 成功地制备了三角相位光栅。

图 2 给出了扫描曝光装置的光路图。光源 V 发出的光由 L_1 会聚, 经小孔 PI 滤波、 L_2 准直后以强度 I_0 均匀地照明光阑 A_2 整个孔径。扫描 MASK 沿 x 方向以速度 v_0 匀速扫描。 L_3 把 MASK 成像在 P 平面上。

如果 A_2 的孔径为 $h \times h$, MASK 上有一个 $l \times w$ 形状的开孔, 扫描曝光后在置于 P 平面的记录干板上, 就会得到一个 $(S'/S) \cdot h$

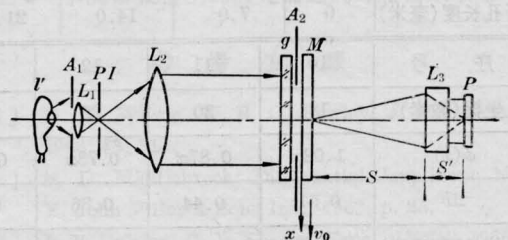


图 2 扫描曝光装置的俯视图

$\times (S'/S) \times w$ 形状的曝光带, 这里 S' 和 S 分别是 L_3 成像的像距和物距。我们取 $S' < S$ 即记录缩小的像。根据曝光密度 D 与曝光量 E 之间的关系: $D = r \log E - D_0$ ^[5]。扫描曝光中 $E = I_0 \cdot t = I_0 \cdot \frac{l}{v_0}$, 则曝光带的密度为:

$$D = r \log l - D'_0 \quad (9)$$

其中 $D' = r \log \frac{I_0}{v_0} - D_0$, I_0 , v_0 确定后为常数。因此适当选择 l 即可达到控制 D 的目的。

全息干板漂白乳胶厚度起伏量 ΔB 主要由曝光密度 D 的变化决定^[6]。若介质的折射率为 n , 则由 ΔB 所产生的光波相位调制为:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n-1) \Delta B \quad (10)$$

这样控制 D 的变化即可达到控制相位的目的, 而 D 的变化又是由 MASK 的开孔长度 l 决定的。因而相位光栅的设计又归结到扫描 MASK 的设计。当取样点较小时通常不进行密度 D 的测量, 并且相位变化由于干涉条纹弯曲量 ΔF 给出^[6]。扫描 MASK 的设计可以由下列步骤完成:

1. 确定曝光装置中扫描系统电机的工作电压, 也就是确定 MASK 的扫描速度及干板处理条件, 具体处理过程参阅[6]中的附录。测出开孔长度 l 与干涉条纹弯曲量

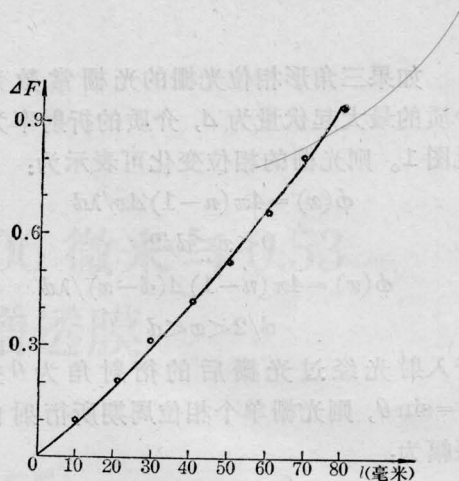


图3 $l \sim \Delta F$ 曲线

ΔF 之间的关系曲线。我们采用 Agfa 10 E75 全息干板及 1:5 硫酸铜漂液, 测得的 $l \sim \Delta F$ 曲线见图 3。

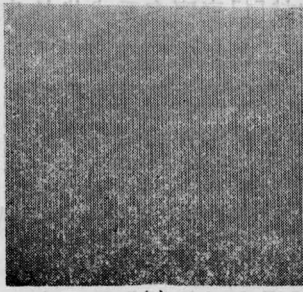
2. 确定光栅常数 d 及每个相位周期中取样点的个数, 将 $\alpha = 1.822$ 代入(2)算出各取样点对应的 $\phi(x)$ 值。然后根据 $l \sim \Delta F$ 曲线查出对应的开孔长度。

我们取 $d = 32$ 微米, 每个周期 16 个取样点。具体数据列于表 1 中。我们采用先将设计数据放大, 刻红膜然后再缩小的方法制备的 MASK 如图 4 所示。

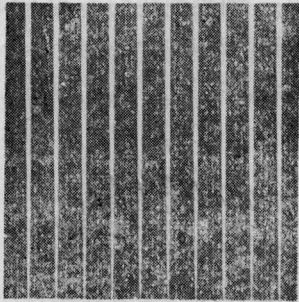
3. 将制备好的 MASK 放在曝光装置中进行调试并扫描曝光, 按确定的实验条件进行处理。所得到的三角相位光栅在带有成像系统的马赫-陈德干涉仪中检测其相位变化

表 1

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
坐标(微米)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$\phi(x)$	0	0.15π	0.29π	0.44π	0.58π	0.73π	0.87π	1.02π	1.16π
ΔF	0	0.07	0.15	0.22	0.29	0.36	0.44	0.51	0.58
开孔长度(毫米)	0	7.0	14.0	21.0	28.0	35.0	41.0	48.0	54.0
序号	10	11	12	13	14	15	16	17	
坐标(微米)	18	20	22	24	26	28	30	32	
$\phi(x)$	1.02π	0.87π	0.73π	0.58π	0.44π	0.29π	0.15π	0	
ΔF	0.51	0.44	0.36	0.29	0.22	0.15	0.07	0	
开孔长度(毫米)	48.0	41.0	35.0	28.0	21.0	14.0	7.0	0	



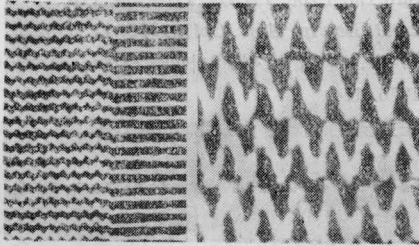
(a)



(b)

图4 扫描MASK(正片)

(a) 缩小底图; (b) 局部放大图



(a)

(b)

图5 $\alpha=1.822$ 三角相位光栅的相位分布

(a) 光栅的相位调制

(b) 放大的相位分布

如图5所示。

将二个一维光栅垂直放置粘接可以得到一个二维三角相位光栅。用硅光电池测出九个衍射光点的强度及拿掉光栅测出入射光强。光栅的衍射效率为:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^9 I_i}{I_{\text{入射}}} \approx \frac{556}{1020} = 54\% \quad (11)$$

四、实验结果

我们所采用的多重成像系统的光路如图

6所示。光源是 He-Ne 激光器。输入信号放在透镜 L_2 的焦点 O 附近的 P_1 平面上。光栅 G_1 和 G_2 分别放在由 L_3 和 L_5 准直的光束之中。光阑 A_1 和 A_2 滤掉不必要的高级衍射光。在 P_2 和 P_3 平面上获得一、二级输出。图7是输入图象的负片。图8和图9分别给出了多重像。

图6中的 g 是旋转的毛玻璃,对消除相干光散斑噪声提高输出像的质量起着关键的作用。由于 g 必须置于输入信号前方并且与光的接触面积越大效果越好,为此我们在扩束物镜 L_1 之后又增加了 L_2 。 g 本身的质量

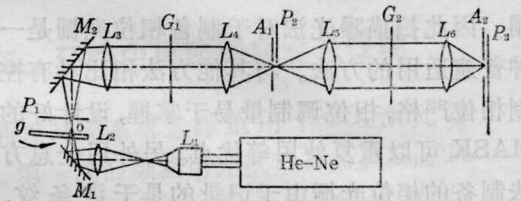


图6 多重成像系统光路图



图7 输入信号的负片

(实际尺寸为 0.4 毫米)

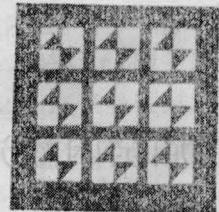


图8 在 P_2 平面上形成的 3×3 个像

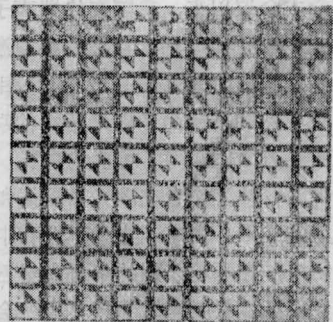


图9 在 P_3 平面上形成的 9×9 个像

要求较高, 实验中我们采用乳白有机玻璃及二面打毛的玻璃都有较好的效果。

五、讨 论

① 如果根据:

$$\phi(x) = [\pi(n-1)\Delta/\lambda] \times [1 + \cos(2\pi x/d)] \quad (12)$$

或

$$\begin{cases} \phi(x) = 2\pi(n-1)\Delta/\lambda & 0 < x < d/2 \\ \phi(x) = 0 & d/2 < x < d \end{cases} \quad (13)$$

来设计 MASK 可以制备正弦或矩形相位光栅。因此扫描曝光法对于制备相位光栅是一种普遍适用的方法。与其他方法相比具有控制相位严格, 相位调制量易于掌握, 设计好的 MASK 可以重复使用等优点。另外用全息方法制备的相位光栅由于记录的是干涉条纹, 而 $\Delta F \sim D$ 曲线不是线性关系^[5], 因此光栅的相位变化不可能是精确的正弦形状。在 α 的大小需要严格控制的条件将严重影响输出像强度的均匀性^[1]。

② 文献[1]表明多重成像的分辨率及畸变受到光栅孔径及成像透镜的质量限制。适当选择刻红膜的放大倍数可以刻制更多的相位周期以制备足够大的相位光栅。可以使其对成像质量的影响小于成像透镜的限制。

③ 从图 9 可以明显看出多重成像的强度还不十分均匀。其影响因素有相位调制的控制, 扫描曝光时的调焦及二个一维光栅的垂直程度等。如果把我们所用的 DF135 相机改用微调装置精确调焦可以进一步提高输出像的均匀性。衍射光强相应的也会提高。在(13)式的例子中如果每个衍射光点的强度都达到 68, 则 η 可达 60%。

参 考 文 献

- [1] P. A. Newman, V. E. Rible; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, 1225.
- [2] A. Kalestynski, B. Smolinska; *Appl. Opt.*, 1977 **16**, 2261.
- [3] Sun Lu; *Proc. IEEE*, 1968, **56**, 116.
- [4] L. P. Boivin; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, 1782.
- [5] J. W. 顾德门; 《傅里叶光学导论》, 科学出版社, 1976, 174.
- [6] 王玉堂, 陈岩松等; 《激光》, 1981, **8**, No. 1., 30.

简讯

第二届全国激光新晶体材料学术会议在泉州召开

近年来, 特别是 1980 年 11 月第一届全国激光新晶体材料学术会议以来, 我国在终端声子可调谐激光晶体、色心激光晶体、稀土自激活小型激光晶体和非线性光学晶体的研究工作中取得了相当的进展, 在利用较成熟的基质晶体以开拓新的功能效应和新的激光波长方面也取得了可喜的进展。

为交流我国科技工作者在激光新晶体和非线性晶体方面取得的成果, 由中国光学学会和中国硅酸盐学会共同组织, 在福建泉州的华侨大学召开了第二届全国激光新晶体材料学术会议。出席会议的有来自全国 36 个单位的代表 56 人和列席代表 25 人。

会议共收到 46 篇论文报告, 其中大会报告 11 篇, 其他的 35 篇在“稀土和终端声子激光晶体”、“色心激光晶体”和“非线性光学晶体”三个分组会上进行了交流和讨论。

会议针对目前尚存在的一些问题, 如晶体生长与分析测试、器件应用之间衔接和有机结合较差, 新材料长期不能发挥作用等进行了讨论并提出了一些建设性的意见。会议建议第三届全国激光新晶体材料会议由安徽光机所举办, 将于 1986 年在安徽省召开。

(吉禾)