

用二元光学技术制作反射式相息图

沐仁旺* 周 进 刘建宏 黄信凡 高文琦
(南京大学物理系, 南京 210093)

摘 要 采用 Gerchberg-Saxton(G-S) 的迭代算法, 在物域和频域之间进行多次迭代, 使频谱的振幅大致为常数, 并对频谱的位相进行量化, 用二元光学技术制成了 8 台阶反射式相息图(kinoform), 再现时获得了清晰的像, 衍射效率较高。

关键词 相息图, 二元光学技术, 计算全息。

1 引 言

相息图^[1]的最大优点是同轴、衍射效率高。照明相息图在零级方向得到单一的图像, 没有其它杂散图像叠加其上, 既不象光学全息中由于零级和实、虚像的存在而减弱再现像的光强, 也不象计算全息中有零级和多余的正负衍射级存在而分散入射光强。在理想情况下, 相息图可把全部入射光用来重建这单个像, 故理想情况下衍射效率可达到 100%。这种位相元件具有体积小、同轴再现、对光源强度要求低等特点, 在只读存贮、干涉测试、三维图像显示等方面有着广泛的应用前景^[2]。

本文用二元光学技术制作了反射式相息图, 制作成的相息图是由 64×64 个等面积小方形孔组成的, 小方孔的振幅透过率为 1, 但位相有变化, 变化的位相值被量化成 8 个台阶, 再现时获得了较清晰的图像。

2 原 理

由于相息图只记录波前的位相: $g(x, y) = A \exp [i\theta(x, y)]$, 其中 A 为常数。对于傅里叶型的相息图, 被记录的波前为物波的傅里叶谱, 除特殊情况下, 一般物波傅里叶谱的振幅不可能为一常数。以往制作相息图时, 大都在物波上加随机位相, 然后对其傅里叶谱的振幅强制性地认为是常数 1, 这样就扭曲了频谱的信息, 增加了再现像的噪声。本文采用了 G-S 迭代算法^[3], 经过在物域和频域之间进行多次迭代, 在物上加上一一定的位相, 使频谱的振幅大致为常数, 而再现时像的强度与原物相同。

图 1 为相息图的一个编码单元, 编码单元的振幅透过率为 1, 但位相有变化, 相当于位相板, 其透过率函数为复数。设每个编码单元的中心位于 (ma, na) , 则该单元的复数透过率

* 访问学者(南通师范专科学校)。

收稿日期: 1998-05-04; 收到修改稿日期: 1998-09-03

可写为:

$$H_{mn} = \text{rect} \left(\frac{\mu - ma}{a} \right) \text{rect} \left(\frac{\nu - na}{a} \right) \exp(i\phi_{mn}) \quad (1)$$

式中 ϕ_{mn} 为被记录波前在 (ma, na) 处抽样点的位相值, 它决定于物函数 $g(x, y)$ 经 G-S 算法迭代后满足要求的傅里叶谱 $G(\mu, \nu) = A \exp[i\phi(\mu, \nu)]$, 经过 K 次迭代后, 用 $g'_k(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 的振幅分布的均方差来估计所能再现物波的精确度:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_x \sum_y [|g'_k(x, y)| - |g(x, y)|]^2}{\sum_x \sum_y |g(x, y)|^2} \quad (2)$$

当相邻两次迭代的 σ^2 之差 10^{-4} 时, 结束迭代, 然后对迭代后的复数数值对其位相进行 L 级量化, 得到被编码波前的抽样值, 图 2 为整个计算流程图。

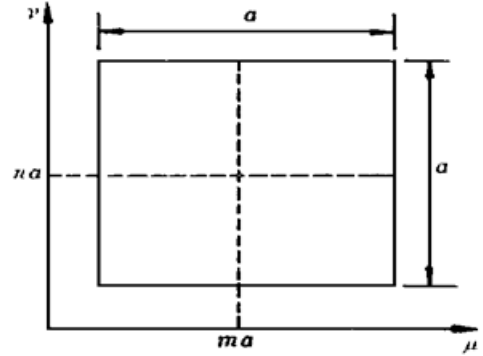


Fig. 1 The coded unit

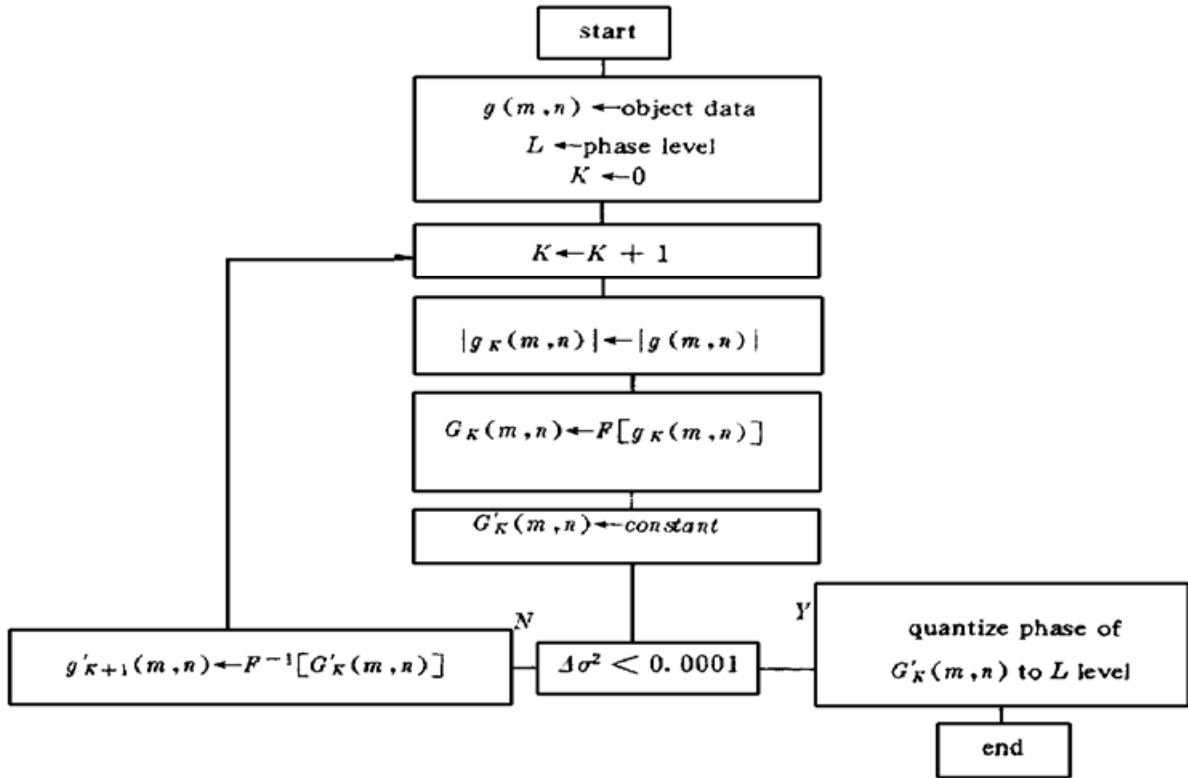


Fig. 2 Computational flow chart

整张全息图由 $M \times N$ 个编码单元组成, 其透过率函数为:

$$H(\mu, \nu) = \sum_m \sum_n \text{rect} \left(\frac{\mu - ma}{a} \right) \text{rect} \left(\frac{\nu - na}{a} \right) \exp(i\phi_{mn}) \quad (3)$$

在输出面 (x, y) 上的光强分布为:

$$h(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_m \sum_n \text{rect} \left(\frac{\mu - ma}{a} \right) \text{rect} \left(\frac{\nu - na}{a} \right) \exp(i\phi_{mn}) \exp[i2\pi(x\mu + y\nu)] dx dy \quad (4)$$

经过化简、近似并忽略常数因子后可得相息图的零级光强分布为:

$$h(x, y) = \sum_m \sum_n \exp(i\phi_{mn}) \exp[j2\pi(xma + yna)] = |g(x, y)| \exp[i\theta(x, y)] = g(x, y) \quad (5)$$

即在相息图的零级得到原物的像。

式中 ϕ_{mn} 的取值范围在 $(0, 2\pi)$ 内, 在制作相息图时可对 ϕ_{mn} 按二进制进行 L 级位相量化, 即 $L = 2^n$, 量化后 ϕ_{mn} 的取值为其与 $(0, 2\pi \frac{1}{L}, 2\pi \frac{2}{L}, \dots, 2\pi \frac{L-2}{L}, 2\pi \frac{L-1}{L})$ 中最接近的一个。本文量化为 8 个台阶时, 再现像与原物的差别已不大, 再多的量化等级在制作工艺上有困难。

3 制作工艺

本文制作的反射式相息图, 是将位相量化为 8 个台阶, 要制得 8 个台阶的相息图, 需要三张原图, 这可以通过计算机把计算得到的数值驱动绘图仪来制作三张掩模原图:

- 1) 对 ϕ_{mn} 值大于 π 的单元绘图并涂黑色, 得到第一张原图;
- 2) 对 ϕ_{mn} 取值为 $2\pi \frac{2}{8}, 2\pi \frac{3}{8}, 2\pi \frac{6}{8}, 2\pi \frac{7}{8}$ 的单元绘图并着色, 得到第二张原图;
- 3) 对 ϕ_{mn} 取值为 $2\pi \frac{1}{8}, 2\pi \frac{3}{8}, 2\pi \frac{5}{8}, 2\pi \frac{7}{8}$ 的单元绘图并着色, 得到第三张原图。

将这三张原图经过微缩获得三张掩模, 然后用半导体的微电子技术, 在 Si 的表面氧化生长所需厚度的 SiO_2 , 用掩模 1 光刻, 用氟氟酸腐蚀掉氧化硅, 再分别在其表面氧化生长所需厚度的 SiO_2 , 用掩模 2、3 光刻, 控制氟氟酸腐蚀时间, 这样经三张掩模套刻腐蚀后即获得所需图形的台阶, 其位相为 $0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3}{4}\pi, \pi, \frac{5}{4}\pi, \frac{3}{2}\pi, \frac{7}{4}\pi$ 。具体工艺流程如图 3 所示。

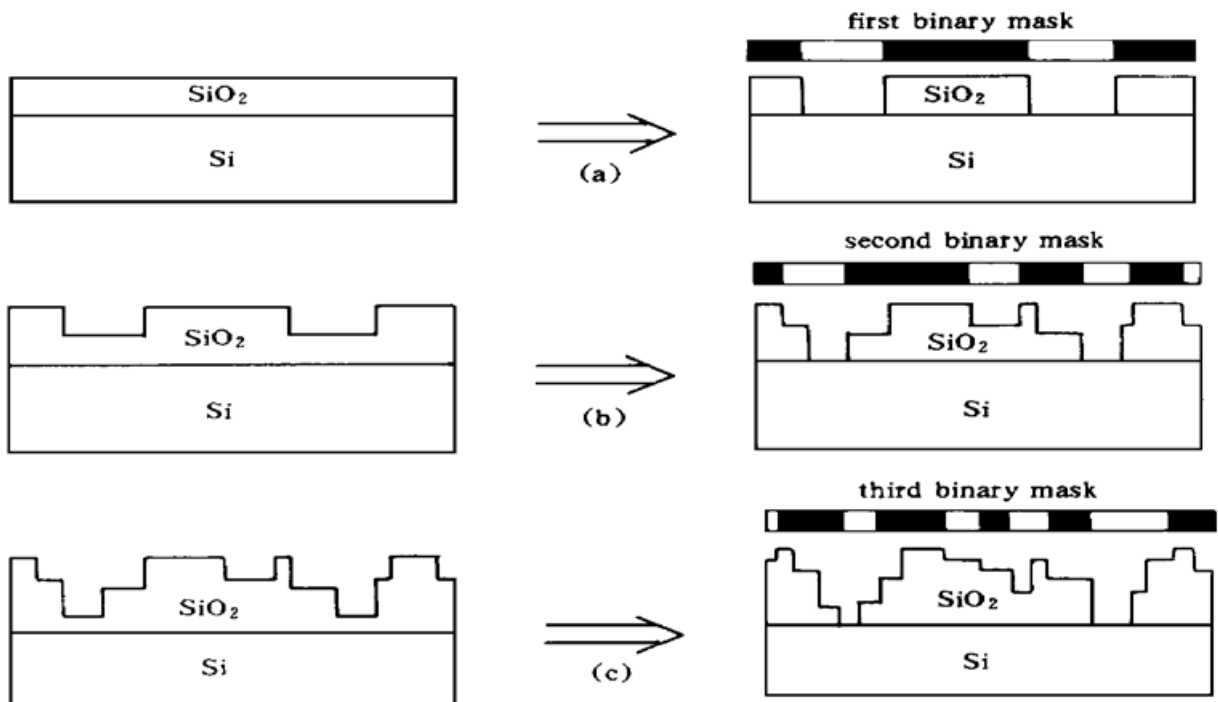


Fig. 3 Technological process chart. (a) First oxidation and lithography, (b) Second oxidation and lithography, (c) Third oxidation and lithography

在完成上述过程之后, 为了增加反射效果, 可在其表面蒸上一层 15 nm 左右的金。

在以上的制作过程中, 每一次的氧化时间很重要, 它直接影响相息图的衍射效率。首先需通过实验, 作出氧化炉在一定条件下的氧化时间与氧化层厚度曲线, 如图 4 为本文制作相息图时的实测曲线。然后根据理论计算, 若入射光波长为 633 nm (He-Ne 激光), 反射式相息图的台阶高度分别约为 160 nm、80 nm、40 nm。最后确定三次氧化的时间分别为 120 min、

30 min、8 min。各次氧化后的厚度,用椭圆偏振仪实测为 238.6 nm、108.0 nm、48.3 nm。制得的 8 台阶相息图各 SiO₂ 层的厚度分别为 290.9 nm、121.9 nm、48.3 nm;各台阶的实际高度分别为 169.0 nm、73.6 nm、48.3 nm。与理论值虽有一定的误差,但基本达到了设计的要求。

4 实验与结果

取英文字母“C”作为物将其抽样成 64×64 个点,用 G-S 算法进行迭代,当 $\sigma^2 = 0.051$ 时结束迭

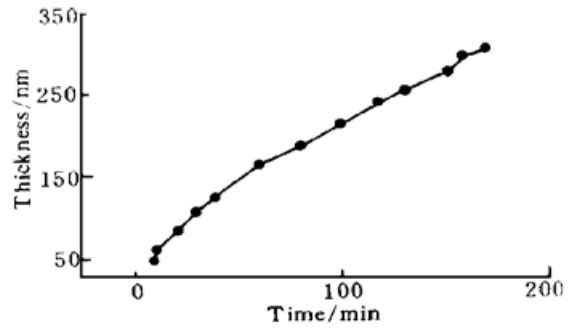


Fig. 4 Oxidation time and curves profile of oxidation layer thickness (dry O₂, 1100°C)

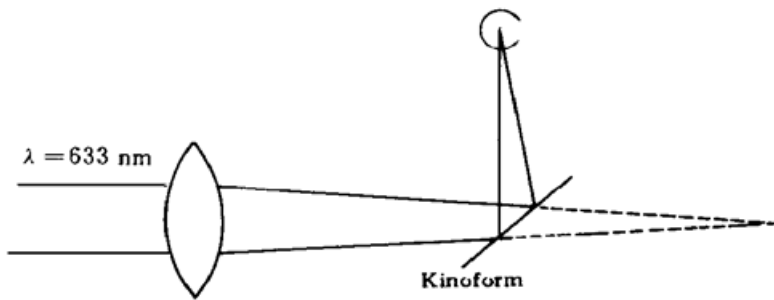


Fig. 5 The optical setup for reconstruction

代,然后对迭代后的复数数值对其位相进行 L 级量化。在制作过程中分别获得了 2 个台阶、4 个台阶和 8 个台阶的相息图,用 XJL-02 型立式金相显微镜分别拍摄出了它们的结构照片(放大 30 倍)。将上述各个台阶的相息图分别放在图 5 的光路中再现,获得了它们的再现像,如图 6 所示。

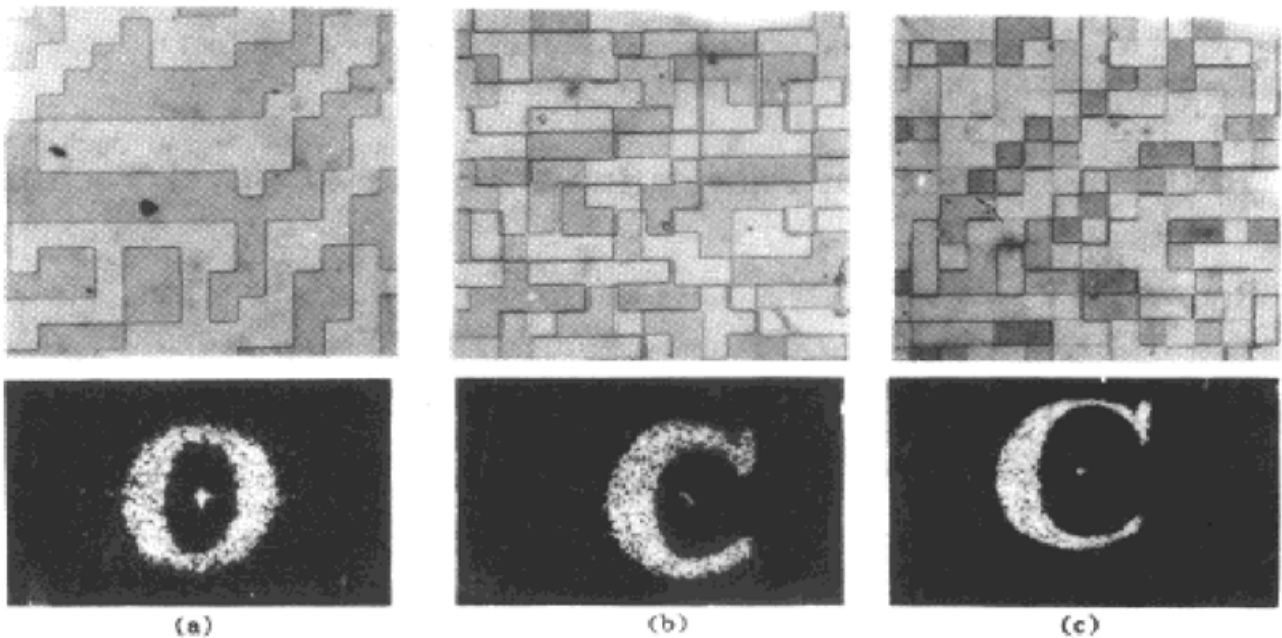


Fig. 6 The structure of Kinoform and reconstruction. (a) Two phase level Kinoform, (b) Four phase level Kinoform, (c) Eight phase level Kinoform

由图中可以看出,2 个台阶相息图的再现像,由模糊的“C”和其模糊的共轭像组成。这可以这样理解,当位相量化为 2 个台阶时,物谱的位相只有 0 和 π ,即物谱全是实数,每个实数可分解成一个复数和复数的共轭,再现时分别再现为“C”的像和“C”的共轭像。4 个台阶的相息图已能再现物体的像;8 个台阶的相息图,再现像就已比较清晰,基本能再现原物的像,而且衍射效率也比较高。

5 存在的误差

实际制作时,可能引起的再现像的误差,主要有以下几个方面:

1) 制作三张掩模原图时引入的误差。

用绘图仪来绘制掩模原图时,绘图仪的笔宽和定位引起的误差,造成掩模本身精度不高,直接影响套刻的精确度,使对准误差增大,降低衍射效率。

2) 套刻时引起的横向误差。

进行 8 级位相量化时,需套刻两次,主要是套刻时引起的对准误差,套刻误差对再现像的影响较大。

3) 氧化条件掌握不准引起的纵向误差。

主要是实际生长的厚度与理论上的台阶高度不一致引起的位相失配,这除了使再现像出现模糊外,还在像的中间出现亮点,如图 6 所示。

任朝红同志在本课题的前期做了大量的工作,特此感谢。

参 考 文 献

- [1] W. H. Lee, *Progress in Optics*, Edited by E. Wolf, North-Holland Inc., New York: 1978(XVI) : 143~ 152
- [2] S. N. Dixit, J. K. Lawson, K. R. Manes *et al.*, Kinoform phase for focal plane irradiance profile control. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6) : 417~ 419
- [3] R. W. Gerchberg, W. O. Saxton, A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictured. *Opt.*, 1972, **35**(3) : 237~ 246

Reflective Kinoform Fabrication by Binary Optical Technique

Mu Renwang Zhou Jin Liu Jianhong Huang Xinfan Gao Weiqi
(*Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093*)

(Received 4 May 1998; revised 3 September 1998)

Abstract We adopt the Gerchberg-Saxton iterative algorithm, while keeping the amplitude of frequency spectrum approximately constant, the phase of the spectrum is quantified into 2^n level. Then by using binary optical technique, 8 phase level Kinoform is fabricated. Clear construction images are obtained high reflection efficiency.

Key words kinoform, binary optical technique, computer generated hologram.