

# 具有任意图形编码的二值位相光栅的制作

桑 涛

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

廖江红 卢振武 赵晶丽 翁志成

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

**摘要** 基于大规模集成电路加工技术介绍具有任意图形编码的二值位相光栅的制作过程。其中包括振幅掩模母版的制作和掩模图形的转移两部分。针对制作的  $25 \times 25$  扇出的 Dammann 光栅, 给出了实测结果, 即: 扇出点光强的均匀性偏差(以最大相对偏差来衡量)为 9.7%, 光栅的二维衍射效率为 80.65%(除去光栅基板对光的两次反射作用), 最后分析了制作误差的影响。

**关键词:** 光栅; 衍射; VLSI; 光计算; 光学信息处理

## 1 引 言

位相光栅(phase-only grating, POG)因其是一种周期性的位相结构而具有衍射分束的功能。它在光计算, 复成像, 光学信息处理, 光学检测等领域中有广泛应用, 可充分发挥光学处理的高速性和并行性的特点, 因而成为近年来二元光学研究的热点之一。

POG 根据位相形式可分为连续型, 多台阶型和二值型。从理论上讲前两类具有较高的衍射效率, 但目前因其制作困难, 工艺误差较大, 实测值往往同理论值相差较大, 并且加工费用昂贵, 因此从国内制作条件和经济条件而言, 我们一般都选择结构简单, 成本低廉的二值型位相光栅(binary phase grating, BPG)。BPG 又可分为  $(0, \text{non-}\pi)$  型和  $(0, \pi)$  型两类, 前者对膜厚误差较为敏感, 而后者的设计思路又可为前者的设计提供很好的借鉴, 所以我们以  $(0, \pi)$  型 BPG 为研究对象。经研究表明, 采用我们提出的设计方法,  $(0, \pi)$  型 BPG 也可获得较高的衍射效率<sup>[1]</sup>。

二维 BPG 的二值位相编码可分为可分离变量型和不可分离变量型:前者因直接利用一维的结果而设计最为简单,但就衍射效率而言,它明显劣于后一类型;对于不可分离变量型,过去人们已提出正方形、条形和梯形三种编码方案<sup>[2]</sup>,由于它们依次呈包含关系故衍射效率依次提高。然而作为最普遍的形式——任意图形的编码则应该获得最高的衍射效率。我们首次采用“虚拟场调制法”设计了具有任意图形编码的 $(0, \pi)$ 型 BPG (arbitrary-geometry BPG, ABPG)<sup>[1]</sup>。设计结果证实了这种编码可获得比前述几种编码更高的衍射效率。

本文的主要部分将基于大规模集成电路加工技术介绍这种复杂的具有任意图形编码的二值位相光栅的制作过程。该制作过程先后包括了振幅掩模母版的制作和掩模图形的转移。我们将首先在第 2 部分介绍振幅掩模母版的制作,随后于第 2 部分介绍掩模图形的转移。接着在第 4 部分,针对制作的  $25 \times 25$  扇出的 Dammann 光栅,介绍了实测结果,并分析了制作误差的影响。最后给出了小结。

## 2 振幅掩模母版的制作

此步工作的工艺流程图如图 1 所示,主要包括以下三个步骤:

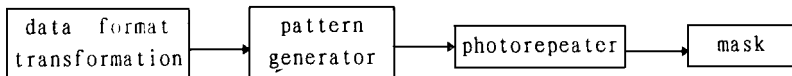


Fig. 1 The procedure of the mask fabrication

### 2.1 掩模图形的数据格式及其转换

我们在文献 1 中介绍了 ABPG 的设计,设计出的部分光栅的编码图案如图 2 所示。从宏观上看这些图案包括了众多具有任意形状的子图形,在微观结构上我们采用了大量的简单矩形来构造这种复杂图案,如图 3 所示,每个光栅周期在纵向( $y$  轴方向)被均分为 256 行,其中的每一行在横向则以几个黑色的矩形(即须制作的图形)来代表位相  $\pi$  的区域。在设计时我们采用了三个变量来表征每个矩形的特征:即用  $y_j$  表示第  $j$  行的矩形中心的纵向坐标( $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$ );用  $X_{2i,j}$  代表该行的第  $i$  个矩形的横向起始坐标,用  $X_{2i+1,j}$  代表该矩形的横向终止坐标( $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ )。尽管这种数据表示方式给我们的设计带来了极大的方便,但它并不能直接用于制版。

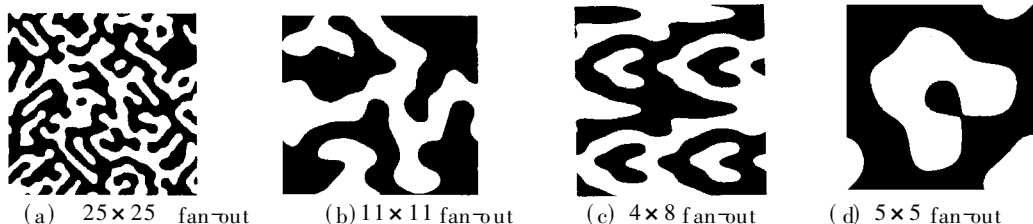


Fig. 2 The binary phase coding geometries of some ABPGs in a period, where the black represent the phase  $\pi$  and the white represent the phase 0

目前国际上正通用一种标准的集成电路版图描述语言—CIF 格式,它不受任何 CAD 系统和制版设备的约束,任何版图设计都首先以 CIF 格式作为中间格式输出,其坐标系统是以

$0.01 \mu\text{m}$  为最小单位的整数绝对坐标。任何的图形都可分割成矩形, 多边形, 圆和线段等四种基元, 并规定相应的书写格式。利用这种格式就可以把复杂图形用一条条语句形式书写出来。

可以看出, CIF 格式与我们的前述数据表示形式在思想上是一致的, 因此只须稍作改变就能将我们设计的数据转换成标准的 CIF 格式。对于第  $j$  行的第  $i$  个矩形而言, 这种的转换关系如下所示:

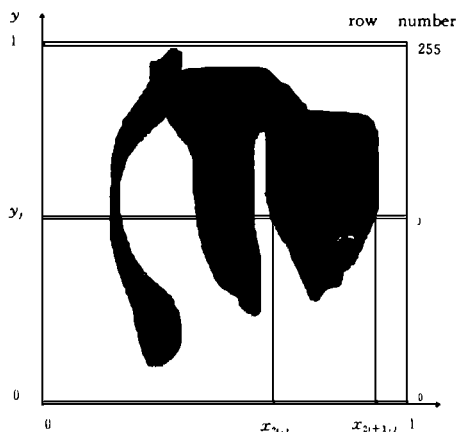


Fig. 3 The description of the binary phase geometry

```

.
.
.
B 4486 400 51068, 7800;
B 5084 400 60084, 7800;
B 4556 400 68500, 7800;
B 4294 400 77158, 7800;
B 4698 400 85802, 7800;
.
.

```

Fig. 4 The format of CIF file

CIF 格式:    图形类型    长度    宽度    图形中心的  $x$  坐标    图形中心的  $y$  坐标  
                   B             $a_{i,j}$          $b_{i,j}$              $x_{i,j}$              $y_{i,j}$

其中: 图形类型 B 代表我们采用矩形基元, 当然多边形, 圆和线段三种基元也有对应的符号。

长度

$$a_{i,j} = \text{取整}[(x_{2i+1,j} - x_{2i,j}) \times T \times 100] \quad (1)$$

由于设计时光栅周期约定为 1, 给定的坐标是相对值, 所以这里须乘以实际的光栅周期  $T$  ( $\mu\text{m}$ ), 又因为 CIF 格式的坐标系是以  $0.01 \mu\text{m}$  为最小单位的整数绝对坐标, 故还须乘以倍数因子 100, 以下也同。

$$\text{宽度 } b_{i,j} = \text{取整}\left[\frac{T}{256} \times 100\right] \quad (2)$$

$$\text{图形中心的 } x \text{ 坐标 } x_{i,j} = \text{取整}\left[\frac{x_{2i+1,j} + x_{2i,j}}{2} \times T \times 100\right] \quad (3)$$

$$\text{图形中心的 } y \text{ 坐标 } y_{i,j} = \text{取整}[y_j \times T \times 100] \quad (4)$$

我们设计的数据经上述格式转换后便生成如图 4 所示的 CIF 文体。这种文本还须进一步转换成制版设备专用数据格式, 以 GCA 3600F 图形发生器为例, 首先把 CIF 文本中的基元图形分割成 3600F 所能接受的曝光矩形(尺寸限制在  $2 \sim 1500 \mu\text{m}$  范围内), 并以 3600 数据格式

输出图形发生器数据带,此时就可以制中间掩模版了。

## 2.2 图形发生制中间掩模版

所用的图形发生器是美国 GCA 公司生产的 3600F 可变光阑式光学图形发生器。在汞灯  $g$  线(436 nm)的照明下可变光阑成像后矩形尺寸为  $2 \sim 1500 \mu\text{m}$ , 增量  $0.5 \mu\text{m}$ , 工作台最大行程  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , 定位精度  $0.25 \mu\text{m}$ , 全行程总精度为  $0.6 \mu\text{m}/150 \text{ mm}$ , 可制作特征线宽  $2 \mu\text{m}$  以上供精缩机使用的中间掩模版(注:由于精缩机采用了 10 倍的缩小倍数,所以中间掩模版的图形尺寸应是所需尺寸的 10 倍,这种尺寸变换是在由 CIF 格式转换到 GCA 3600F 图形发生器的专用数据格式的过程中完成)。曝光时机器内部温度应控制在  $21 \pm 0.1$ , 实验室温度一般应保持在  $21 \pm 1$ 。

采用国产匀胶铬版,等级为  $S_m$ , 尺寸为 4 英寸, 铬型 LRC, 铬层厚度  $5 \text{ nm}$ , 胶类  $A_z-1350$  (正性光刻胶), 胶厚  $600 \text{ nm}$ 。

经过  $2 \sim 3$  小时曝光, 取出铬版进行显影处理, 用  $\text{NaOH}$  溶液去曝光部分的胶层, 根据曝光量决定溶解胶的时间, 此时可看见胶层颜色发生了三次变化(因厚度变化导致光干涉图的变化)。显影完毕后用去离子水冲洗干净。

接着腐蚀铬版, 腐蚀液呈酸性, 待未被光刻胶覆盖的铬层去掉即可。

最后是去光刻胶, 用饱和  $\text{NaOH}$  溶液浸泡, 待铬层上的胶溶解后用去离子水冲净烘干便得到了中间掩模版了。

## 2.3 精缩分步重复制光栅的振幅掩模母版

我们采用美国 GCA 公司生产的 3696 型分步重复精缩机将前面制作的中间掩模再进一步缩小 10 倍到实际尺寸并分步重复排列成阵列制成最终的振幅掩模。工作台最小行程  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , 定位度  $0.25 \mu\text{m}$ , 缩小透镜像场  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  ( $10 \times 1$ ), 成像分辨率优于  $1.25 \mu\text{m}$ , 可制作特征线宽  $2 \mu\text{m}$  的掩模图形, 线宽尺寸精度可控制在  $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 。

所用的光刻胶与前面一样, 因些经过类似的显影, 腐蚀, 去胶等步骤就能获得所需的振幅掩模母版了。

## 3 利用镀膜法完成掩模图形转移

由于我们采用自制的乳胶版, 所以先有涂胶的步骤: 将长宽各为 4 英寸的洁净浮法玻璃基片固定在甩胶机上, 在离心泵转动匀速时滴上几滴  $A_z-1350$  光刻胶, 随着胶层的变薄, 可以看见因干涉效应导致的胶膜的颜色发生三次变化, 甩胶完毕后的膜层厚度约为  $0.6 \mu\text{m} \sim 0.7 \mu\text{m}$ 。如果在灯光下观察到胶层均匀, 没有气泡等缺陷, 这一步就算完成了。随后进行接触式曝光, 胶层与母版的铬层相对, 光源用高压汞灯, 曝光时间根据图形的线宽大小有所调整。

接着进行显影, 方法与前面的基本一样。显影完成后就可以进行镀膜了, 膜厚  $d$  由下式决定:

$$d = \frac{\lambda_0}{2(n-1)} \quad (5)$$

式中  $\lambda_0$  为真空波长, 我们选用  $\text{He-Ne}$  激光,  $\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$ ;  $n$  为膜层材料的折射率, 我们采用  $\text{SiO}_2$ ,  $n = 1.452$ ; 从而  $d = 0.7 \mu\text{m}$ 。

镀膜完毕后, 取出基片并溶解光刻胶, 该胶层表面所附的  $\text{SiO}_2$  镀层也一同脱落。最后留下

直接附在玻璃基片上的  $\text{SiO}_2$  镀层, 此时我们所需的光栅就制成了。

## 4 实测结果及制作误差分析

根据上述步骤, 我们制作了  $25 \times 25$  扇出的 Dammann 光栅, 其光栅周期为  $T = 512 \mu\text{m}$ , 其衍射谱的扇出点阵如图 5 所示。经测量, 扇出点光强的均匀性偏差(以最大相对偏差来衡量<sup>[1]</sup>)为 9.7%, 劣于设计值的 0.01%; 光栅的二维衍射效率为 80.65%(除去光栅基板对光的两次反射作用), 略高于设计值的 80.5%, 显然该效率的略微提高是以均匀性的变坏为代价的。

二值位相光栅的制作误差主要包括以下几个方面:

1) 膜厚误差: 它是由于镀膜时间控制的不准确引起的膜层厚度偏差。该偏差进一步造成了相对位相的偏差。这种误差有三个特点: (1) 它对  $(0, \pi)$  型位相的影响要小于  $(0, \text{non-}\pi)$  型位相, 这正是我们设计  $(0, \pi)$  型位相光栅的原因之一; (2) 与其它衍射级次相比, 中央  $(0, 0)$  级对这种误差最为敏感; (3) 采用  $(0, \pi)$  型位相时, 膜厚误差引起  $(0, 0)$  级增强, 其他级次以同比例减弱, 而  $(0, 0)$  级增强的能量和其它级次减弱的总能量相等。对于以奇数数扇出的光栅(例如我们制作的  $25 \times 25$  扇出的 Dammann 光栅)而言,  $(0, 0)$  级是所需的级次<sup>[3]</sup>, 则该误差会引起衍射效率的上升, 而于此同时光栅的均匀性会变坏; 对于以偶数数扇出的光栅,  $(0, 0)$  级不是所需的级次<sup>[3]</sup>, 则该误差将引起衍射效率的下降。但均匀性不变。

2) 折射率误差: 在镀膜过程中, 由于材料成分, 真空度, 温度等成膜条件出现了细微的偏差, 导致膜层材料的折射率产生了一定的误差。该误差进一步引起了相对位相的变化, 其影响同膜厚误差基本相同。

3) 横向图形误差: 这种误差来源较为复杂, 如 CIF 格式转换时的量化误差, 掩模制作时机械传动误差, 精缩机精缩时的畸变误差, 掩模转移时曝光显影过度或不足等原因都能导致这种误差。计算表明该误差是造成均匀性变坏的主要原因之一, 不过它对衍射效率的作用较为复杂, 既可能使之上升, 可也能使之下降。

4) 边缘陡度误差: 按设计要求, 位相台阶应该以直角形式变化, 但由于在曝光过程中胶层内部颗粒的散射以及基片反射光与入射光干涉作用造成的驻波现象等复杂原因使台阶边缘产生了非直角变化, 即所谓的陡度误差, 它是产生高频杂散光并使扇出均匀性变坏和衍射效率下降的因素之一。

5) 膜厚均匀性偏差: 对镀膜法而言, 主要是由于镀膜时  $\text{SiO}_2$  分子在较大口径上沉积不均匀造成的, 它不同于膜厚误差, 不再是某个特定的常数, 一般属于非周期的, 缓变的, 以二维坐标为自变量的函数。它的出现通常不会导致均匀性的变坏和衍射效率的下降, 只能引起衍射光斑的形状变大和弥。

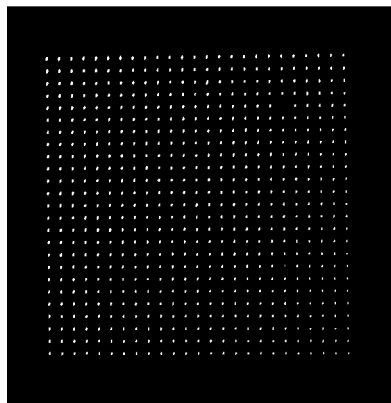


Fig. 5 The diffraction array of  $25 \times 25$  fan-out Dammann grating

6) 折射率均匀性误差: 其产生源于基片的不同区域所处的成膜条件的差异, 它造成的影响同膜厚均匀性误差基本一样。

## 5 小 结

本文主要介绍了具有任意图形编码二值位相光栅的制作过程。针对制作的  $25 \times 25$  扇出的 Dammann 光栅, 给出了实测结果, 最后分析了制作误差的影响。

### 参 考 文 献

- [1] 桑 涛, 廖江红, 卢振武, 赵晶丽, 郑宣明, 翁志成. 一种任意图形编码的  $(0, \pi)$  型二维位相光栅的设计. 中国激光, 1996, **A23**(5): 475
- [2] Vasara A, Taghizadeh M R, Turunen J, Westerholm J, Noponen E, Chikawa H L, Miller J M, Jaakkola T, Kuisma S. Binary Surface-relief Gratings for Array Illumination in Digital Optics. Appl. Opt., 1992, **31** (17): 3320 ~ 3336
- [3] Morrison R L. Symmetries that Simplify the Design of Spot Array Phase Grating. J. Opt. Soc. Am., 1992, **A**: 9494

## Fabrication of Binary Phase Gratings with Arbitrary-geometry Coding-scheme

Sang Tao, Liao Jianghong, Lu Zhengwu, Zhao Jingli and Weng Zhicheng  
(State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

### Abstract

In this paper, the fabrication of binary phase gratings with arbitrary-geometry coding-scheme has been represented based on the VLSI technology, which includes mask making and pattern transferring. For the fabricated  $25 \times 25$  fan-out Dammann grating, the tested results are given as: the fan-out uniformity deviation (the maximum relative deviation) is 9.7%, the 2D diffraction efficiency is 80.65% (without consideration of the reflection loss). At last the effects of fabrication errors are analyzed.

**Key words:** Gratings, Diffraction, VLSI, Optical computing, Optical information processing

桑 涛 男, 1971 年 6 月生。1989 年考入南京理工大学光电学院光电技术系, 1993 年获得光学仪器专业的学士学位, 同年考入中国科学院长春光学精密机械研究所, 在应用光学国家重点实验室从事二元光学元件的优化设计的研究, 1996 年三月获得光学硕士学位。目前正在中国科学院上海技术物理研究所攻读博士学位。