

文章编号: 0253-2239(2001)01-0097-04

# 灰阶编码掩模制作微光学元件\*

栗敬钦 姚 军 杜惊雷 张怡霄 高福华 郭永康  
(四川大学物理系, 成都 610064)

崔 铮  
(英国卢瑟福国家实验室)

**摘要:** 提出一种基于改变灰阶编码掩模的单元形状和位置的掩模设计新方法, 并根据成像过程中的非线性因素, 用这种方法对掩模图形进行了预畸变校正。根据部分相干光成像理论和抗蚀剂曝光显影模型, 模拟计算了这种灰阶编码掩模产生的空间光强分布和光刻胶上的浮雕结构。采用电子束曝光系统制作了这种掩模, 并在光刻胶上获得具有连续面形的微透镜的阵列。

**关键词:** 编码灰阶掩模; 光刻; 微光学元件

中图分类号: TN201 文献标识码: A

## 1 引 言

随着微机械、微光学的不断发展, 各种微系统、光电器件要求微光学元件具有良好面形。一般微光学元件的制作采用二元光学技术<sup>[1]</sup>, 这种技术需要进行多次套刻, 所制作的浮雕结构由多台阶组成, 这不仅增加制作的难度, 而且不可避免地引入对位误差, 从而影响元件的最终质量, 这将限制元件的应用范围。

近年来采用灰阶掩模制作微光学元件已见报道<sup>[2,3]</sup>。灰阶掩模是通过改变掩模的透过率来实现对入射光强的调制从而在抗蚀剂上得到连续分布的浮雕轮廓。采用灰阶掩模只需一次光刻即可制作具有连续浮雕结构的微光学元件。然而灰阶掩模的制作随着其灰阶的增多将变得十分困难, 制作成本也将大幅度上升。因此, 实际应用中发展了通过用编码方法获得的透过率仅为 0 和 1 的二元掩模替代真灰阶掩模<sup>[4]</sup>。

本文在已有的编码方法的基础上, 对编码方法进行改进, 即在编码过程中增加单元开孔位置和形状这两个新的自由度。通过改变开孔位置和形状, 不仅可以提高编码的精度和线性度, 而且便于对曝光、显影和刻蚀过程中的非线性因素通过掩模的预

畸变进行精细校正, 从而提高光刻图形的质量, 这是一般灰阶掩模方法无法实现的。

根据部分相干光成像理论和抗蚀剂曝光显影模型, 我们模拟计算了这种编码灰阶掩模产生的空间光强分布和光刻胶上的浮雕结构。并根据成像过程非线性因素的影响对掩模图形进行了校正。采用电子束曝光制作了用于制作微透镜阵列的编码灰阶掩模, 使用 g 线投影曝光系统在光刻胶上获得具有连续面形的微透镜的阵列。

## 2 编码原理

目前将三维面形编码得到二元掩模的方法主要有两种: 1) 脉冲宽度调制 (PWM), 2) 脉冲频率调制 (PDM), 如图 1 所示。其中脉冲宽度调制是保持开孔单元间距不变, 通过调整开孔单元的大小来控制掩模的透过率; 而脉冲频率调制反之, 即在保持开孔单元的大小不变的条件下, 通过调整开孔单元的间距控制掩模的透过率。此外另一种方法是 1) 和 2) 两种方法的结合。

用编码得到的掩模对抗蚀剂进行曝光。抗蚀剂一般由光敏混合物、树脂和有机溶剂三种成分组成。对抗蚀剂进行曝光后, 不同光强处抗蚀剂中光敏混合物及其分解产物的浓度各不相同, 显影时各处的显影速率也各不一样。在线性曝光条件下, 对正性胶而言, 其溶解后得到的浮雕深度与光强成线性关系, 故显影后即可在抗蚀剂表面得到所需的三维面

\* 中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室资助项目。

收稿日期: 1999-08-12; 收到修改稿日期: 1999-10-14

形。

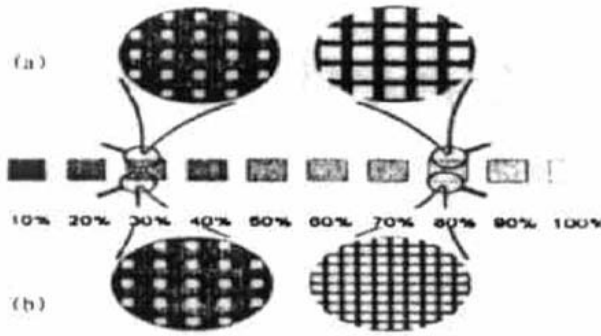


Fig. 1 Illustration of gray-mask coding methods.

(a) PWM, (b) PDM

将三维面形编码为二元掩模的过程是一线性传递过程,而实际元件的制作过程包括了掩模到像面光强分布、像面光强到抗蚀剂轮廓以及由抗蚀剂轮廓到基片三个复杂的非线性传递过程。最终在基片上得到的浮雕轮廓将发生严重畸变。为了克服这种畸变,可以对掩模进行预校正。

在采用脉冲宽度调制方法对掩模的编码过程中,通常只利用单元开孔面积这一自由度。这样编码得到的掩模仅包含浮雕轮廓的高度信息,对掩模的校正有很大的局限性。本文提出采用计算全息中的迂回相位编码<sup>[5]</sup>,将掩模的每个开孔单元划分为多个子单元,如图 2(a)的开孔可看成是许多个子单元的总和,如图 2(b)所示。通过调整这些子单元的开孔位置和形状,实现对掩模的精确校正。

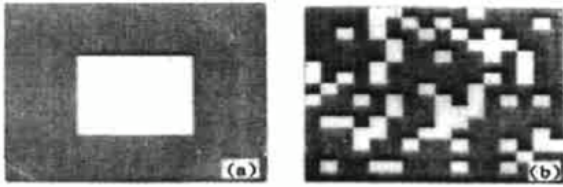


Fig. 2 Pixels (bright dots) distributed across a cell in a coding gray-tone mask. (a) before improvement, (b) after improvement

假定像面光强到抗蚀剂表面图形的传递过程为线性过程,基于理想光强分布,我们从改变掩模曝光后的光场的强度分布着手,对掩模进行预畸变校正。方法如下:

- 1) 对光强过大或过小的地方,通过减小或增大掩模对应单元的开孔大小实现光强的校正;
- 2) 对光强偏差较小的地方,在通过改变掩模对应单元的开孔大小无效时,可通过调节单元的开孔位置和形状实现对光强偏差的补偿。

此外,在编码灰阶掩模制作过程中需要注意以

下 2 点:

1) 为保证掩模经曝光后在抗蚀剂上得到的不是掩模的图形而是所需的三维轮廓,掩模的最小特征尺寸  $R$  必须小于曝光系统的最小分辨率  $R_c$ 。 $R_c$  由(1) 式表示

$$R_c = \lambda / (1 + \sigma) NA, \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为系统的照明光源波长,  $\sigma$  为部分相干因子,  $NA$  为系统的数值孔径。

同时为保证掩模的加工,掩模的最小特征尺寸  $R$  必须大于掩模制作系统(如电子束曝光机)的分辨率。

2) 灰阶对面形的光滑程度有很大影响,如图 3 所示,因此掩模必须保证有足够的灰阶。

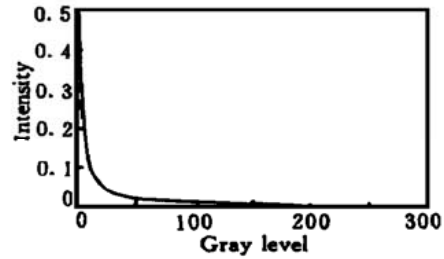


Fig. 3 Light intensity variation vs. gray levels in coding gray-tone mask

### 3 模拟结果

根据霍普金斯部分相干成像理论<sup>[6]</sup>和曝光显影过程<sup>[7]</sup>,编写了相应的光刻模拟软件,对掩模经过曝光系统后的空间光强分布和显影曝光后光刻胶的浮雕轮廓进行了模拟计算。

假设要制作如图 4 所示的一半球形浮雕结构,按上节所述编码方法得到的掩模形状如图 5(a)。半球的半径为  $5 \mu\text{m}$ ,掩模大小为  $14 \mu\text{m}$ 。



Fig. 4 Ideal hemispheric relief structure

假定系统的照明波长  $\lambda = 0.365 \mu\text{m}$ ,数值孔径  $NA = 0.5$ ,部分相干因子为  $0.5$ ,掩模的尺寸为  $16 \mu\text{m}$ 。模拟计算得到光强分布的剖面图如图 6(a) 中的粗线所示。从图 6(a) 可见,由图 5(a) 所示的掩模经曝光后得到的光强与理想光强[图 6(a) 中的细线所示]有较大偏差。

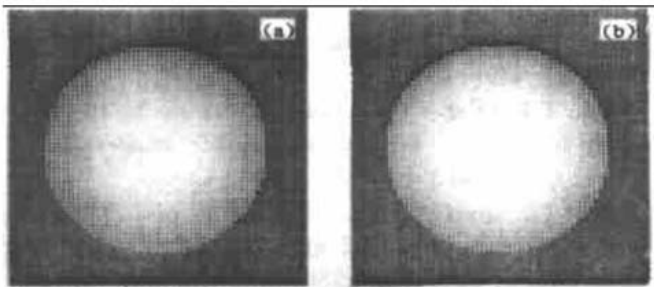


Fig. 5 Coding gray-tone mask. (a) before correction, (b) after correction

采用 2 中所述方法得到的校正后的掩模图形如图 5(b) 所示。校正后模拟计算得到的光强分布如图 6(b), 可见由校正后的掩模曝光得到的空间光强分布得到较大改善, 与理想的光强分布基本吻合。

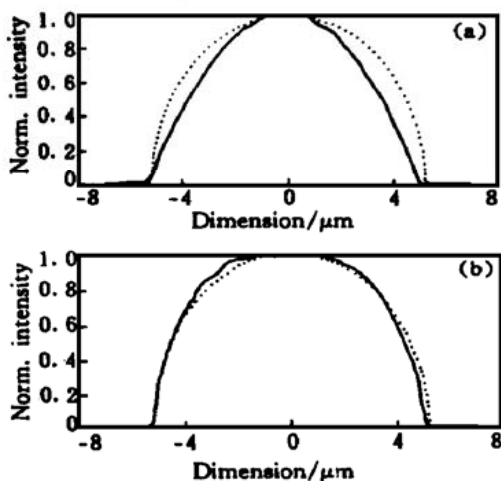


Fig. 6 Light intensity distribution (cross section). (a) before correction, (b) after correction

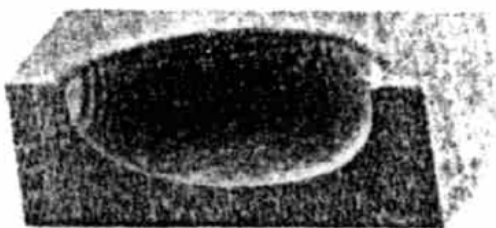


Fig. 7 Simulated 3D resist image (cut through profile) for the hemispheric concave shape

根据校正后的掩模产生的光强分布, 模拟计算了抗蚀剂的浮雕轮廓。模拟计算参数如下: 光刻胶 JSR-IX500, 其曝光显影模型 (Dill Model) 参数为  $A = 0.4896 \text{ l}/\mu\text{m}$ ;  $B = 0.0859 \text{ l}/\mu\text{m}$ ;  $C = 0.0156 \text{ cm}^2/\text{mJ}$ ;  $E_1 = 6.47$ ;  $E_2 = -2.46$ ;  $E_3 = -1.86$ ; 光刻胶厚度  $8 \mu\text{m}$ ; 曝光剂量  $220 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ; 显影时间  $90 \text{ s}$ ; 数值孔径  $\text{NA} = 0.5$ ; 曝光波长  $0.365 \mu\text{m}$ ; 部分相干因子  $0.5$ 。模拟计算得到的抗蚀剂轮廓剖视图如图 7 所示。

## 4 实 验

采用电子束曝光系统制作了用于产生微透镜阵列的编码灰阶掩模, 并进行了曝光、显影实验。实验中为了增强抗蚀剂与玻璃基底的粘附性, 在  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度下对基片烘烤  $0.5 \text{ h}$ 。实验采用控制涂胶量、涂胶速度等手段获得  $8 \mu\text{m}$  厚的胶层, 以  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度前烘半小时, 让它自然冷却。在缩小 5 倍的  $g$  线光刻系统上用编码灰阶掩模进行曝光。在  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度下对曝光后的基片后烘  $0.5 \text{ h}$ 。

制作得到的微透镜阵列用电子扫描显微镜 (SEM) 观察, 结果如图 8 所示。

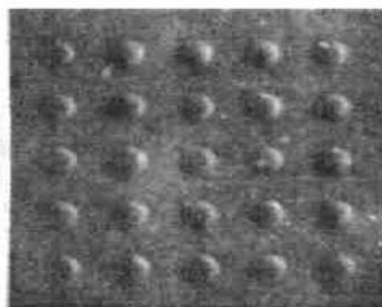


Fig. 8 Stereoscan photograph of microlens array  
图 9 显示的是干涉显微镜的测量结果。



Fig. 9 Photo of interference ring of microlens array

图 10 给出了用 ALPHA STEP-500 型台阶轮廓仪测量得到的表面浮雕轮廓的结果。

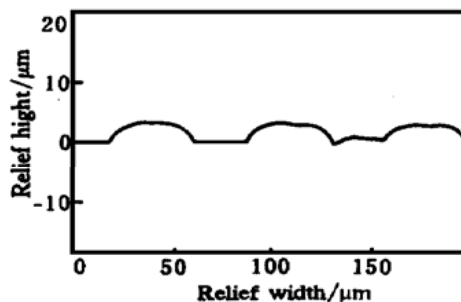


Fig. 10 Measured relief structure of microlens array

**结论** 用编码灰阶掩模成功地制作了具有连续面形的微透镜的阵列。提出在编码灰阶掩模设计过程中

增加新的自由度(开孔位置和形状)实现对掩模的精细校正。编码自由度的增加使得掩模的设计更具有灵活性。这种方法适于制作短焦距的微透镜阵列,可广泛应用于光互连、列阵成像、波面整形等领域。本文用编码灰阶掩模仅对空间光强分布进行预畸变校正,尚未涉及光刻胶曝光显影的非线性过程的校正。进一步的工作有待深入。

### 参 考 文 献

- [1] Veldkamp W B, Leger J R, Swanson G J. Overview of microoptics past, present and future. *Proc. SPIE*, 1991, **1544**: 287~ 299
- [2] Sixt O P, Stauffer J M, Mayer J M *et al.*. One-step 3D shaping using a grey-tone mask for optical and microelectronic applications. *Microelectron. Engng.*, 1994, **23**: 449~ 454
- [3] Suleski T J, O'shea D C. Gray-scale masks for diffractive optics fabrication: 1. Commercial slide imagers. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(32): 7507~ 7517
- [4] Reimer K, Quenzer H J, Hurss M *et al.*. Micro-optic fabrication using one-level gray-tone lithography. *Proc. SPIE*, 1997, **3008**: 279~ 288
- [5] 虞祖良, 金国藩. 计算机全息图. 北京: 清华大学出版社, 1984: 33~ 41
- [6] Hopkins H H. On the diffraction theory of optical images. *Proc. Roc. Soc.*, 1953, **A217**: 408~ 432
- [7] Dill F H. Characterization of positive photoresist. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1975, **ED-22**(7): 445~ 452

## Coding Gray-Tone Mask for Fabrication of Microoptical Elements

Su Jingqin Yao Jun Du Jinglei Zhang Yixiao Gao Fuhua Guo Yongkang  
(*Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064*)

Cui Zheng

(*Rutherford Appleton Laboratory, U. K.*)

(Received 12 August 1999; revised 14 October 1999)

**Abstract:** A new method is proposed to design coding gray-tone masks based on modifying position and shape of cell on mask. Pre-distortion applied to modify mask has been implemented by introducing this method according to the nonlinear effects in aerial image and resist development. Based on the theory of partial coherent light imaging and the resist development model, the intensity distribution through the coding gray-tone mask and exposure of photoresist have been simulated. The coding gray-tone mask was fabricated by  $e$ -beam exposure system and microlens array with continuous relief distribution on photo resist was obtained.

**Key words:** coding gray-tone mask; optical lithography; micro optical elements