

文章编号: 0258-702X(2001)07-0633-04

# 编码灰阶掩模酶蚀明胶法制作 折射微透镜阵列\*

姚 军<sup>1</sup> 栗敬钦<sup>1</sup> 高福华<sup>1</sup> 高 峰<sup>1</sup> 郭永康<sup>1</sup> 杜春雷<sup>2</sup> 曾红军<sup>2</sup> 丘传凯<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学物理系 成都 610064; <sup>2</sup> 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 成都 610209)

**提要** 提出一种以重铬酸铵明胶作为记录材料,用编码灰阶掩模曝光,蛋白酶溶液作为显影剂制作折射型微透镜阵列的新方法。给出了具体实验结果。

**关键词** 微光学元件,折射微透镜,编码灰阶掩模,重铬酸盐明胶,蛋白酶溶液

**中图分类号** O 438 **文献标识码** A

## Refraction Microlens Array Made of Bichromate Gelatine by Enzyme Solution with Coding Gray-tone Mask

YAO Jun SU Jing-qin GAO Fu-hua GAO Feng GUO Yong-kang

(*Physics Department of Sichuan University, Chengdu 610064*)

DU Chun-lei ZENG Hong-jun QIU Chuan-kai

(*Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*)

**Abstract** A novel method to fabricate microlens array was proposed. The microlens array was made of bichromate gelatine, exposed by coding gray-tone mask and developed by protein enzyme solution. The experiment results were presented.

**Key words** micro-optics element, refractive microlens, coding gray-tone mask, bichromate gelatine, protein enzyme solution

### 1 引 言

近年来微光学领域的研究一直非常活跃<sup>[1]</sup>,微透镜及其阵列作为一种非常典型和常用的微光学器件引起了人们广泛的兴趣,它是光学系统微小化和集成化的基础,在光计算、光信息处理和光通讯等方面有许多重要应用<sup>[2~4]</sup>。

根据微透镜所产生的光学效应的不同,可将其分为衍射型和折射型两类。因为折射微透镜可用于宽波段,且对于制作大相对口径和短波长的短焦距微透镜,由于衍射微透镜加工误差的影响,使折射微透镜具有更大的优越性。

近年来已发展了多种制作折射微透镜方法。用光致抗蚀剂作为记录材料,通过热熔法可产生微透

镜,但采用碱液显影工艺存在着线性动态范围小、浮雕形状易畸变等问题,而且光致抗蚀剂本身的光学性能较差,透明度不好,用热熔法获得所需的浮雕后,尚需通过蚀刻向石英、氮化硅等材料传递。

折射型微透镜具有光滑的连续表面,用灰阶掩模可产生微光学元件所需的连续浮雕结构,但灰阶掩模的制作随着其灰阶数的增多将变得十分困难,制作成本也将大幅度上升。

明胶是一种具有优良性能的光学材料,但通常只用于制作折射率调制型元件。1971年,D. Meyerhofer利用明胶的水解机制来形成浮雕,但是获得的浮雕很浅(0.04~0.1 μm)<sup>[5,6]</sup>,而折射微透镜的厚度可达数十个波长,因此这种方法的实用价值不大。1993年,在SUN/FIN'93国际会议上,Ahlhorn<sup>[7]</sup>等提出用酶处理来加深卤化银明胶全息图浮雕深度,使其具有较好的抗潮能力。这种用生物化学的方法来处理光学材料制作浮雕调制的图像,开创了明胶刻蚀工艺的新方向。

\* 中国科学院光电所微细加工光学技术重点实验室资助项目。

1994年,W. Henke等提出一种用编码灰阶掩模进行一步光刻的新方法<sup>[8]</sup>。编码灰阶掩模不仅在设计上体现了灰阶掩模的特点和优势,而且可以采用电子束直写一次完成掩模制作,无需使用镀膜或高能电子束敏化玻璃(HEBS)等其他技术,因此具有良好的应用前景。

本文提出用明胶作为材料,并用编码灰阶掩模曝光、酶蚀显影的方法制作微透镜阵列,具有工艺步骤相对简单、成本低、制作过程中的畸变可预校正等优点,是大批量制作高质量微透镜阵列的一种实用方法。

## 2 重铬酸盐明胶(DCG)的特性

明胶分子具有蛋白质多肽链的分子结构:

$R$ 表示多种不同的氨基酸残基之一, $n$ 代表500到1000个氨基酸单位。

DCG胶层是由明胶分子三维网络构成的,这种网络结构是由明胶分子多肽链上的亚胺基与羰基之间的氢键来维系的,六价铬离子就包含在这些网络的一个个网眼之中。曝光使 $\text{Cr}^{6+}$ 还原为 $\text{Cr}^{3+}$ ,同时 $\text{Cr}^{3+}$ 与多肽链主链上的亚胺基与羰基形成配位键,建立起一个更为牢固的三维网络结构,即在明胶分子之间形成了交联。经光照的重铬酸盐明胶部分不溶于水,而未经光照的部分溶于水,因此,重铬酸盐明胶可当作“负性光致抗蚀剂”来制作浮雕调制的图像。

明胶具有一般蛋白质的通性结构,明胶酶蚀就是酶处理液对蛋白质的作用。蛋白酶可以通过催化反应来使明胶的某些肽链水解,一定蛋白酶使蛋白质水解的部位具有一定的空间构像选择性<sup>[9]</sup>。而曝光使明胶分子链上各原子的排列方式经受不同程度的构造,使得明胶中原来适于与蛋白酶结合的位点变得不适宜,这样曝光量大处的明胶就比曝光量小处的明胶有更大的抗水解能力,因此酶处理的方法可以显影明胶浮雕像。我们用这种方法在实验中获得了 $5 \sim 25 \mu\text{m}$ 深的明胶浮雕,可满足制作折射型微透镜的要求。

## 3 编码灰阶掩模的原理及其预校正

制作可获得连续浮雕结构的编码灰阶掩模,其基本原理是通过调制掩模的透射率以调制入射光强,掩模的透射率是由掩模板上透光面积的大小来进行调制的。

将三维面形编码成二维灰阶掩模数据的方法通常有三种<sup>[10]</sup>(1)脉冲宽度调制(PWM)(2)脉冲密度调制(PDM)(3)脉冲宽度调制和脉冲密度调制同时使用。图1说明了PWM与PDM之间的区别,从图中可以看出,PWM方法灰阶由30%变为80%时透光单元面积变大,而PDM方法灰阶由30%变为80%时透光单元面积不变,但是其密集程度增大。我们采用的是脉冲宽度调制方法设计掩模。编码掩模如何控制光强传递见图2所示。

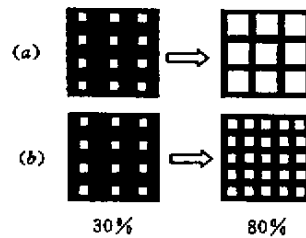


图1 灰阶掩模编码方法

(a)脉冲宽度调制(PWM);(b)脉冲密度调制(PDM)

Fig.1 Strategy of coding gray-tone mask

(a)pulse width modulation(PWM);

(b)pulse density modulation(PDM)

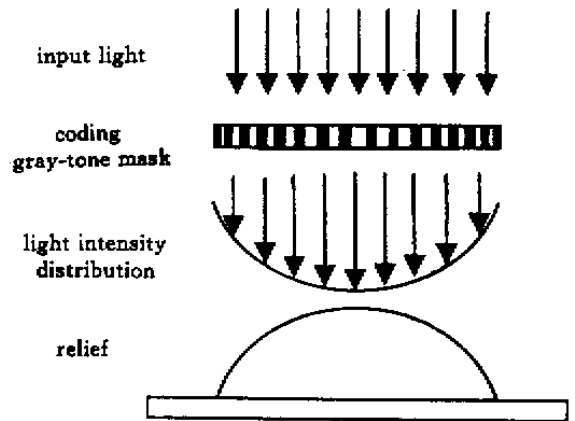


图2 编码掩模制作折射微透镜示意图

Fig.2 Sketch map of the fabrication of refractive microlens with coding gray-tone mask

为了保证曝光显影后在抗蚀剂上得到所期望的三维轮廓,灰阶编码时,应使掩模上的线条 $r$ 小于曝光系统(例如电子束光刻系统)所能分辨的最小尺寸 $r_c$ ,即

$$r < r_c \quad (1)$$

其中  $r_c$  为

$$r_c = \frac{\lambda}{(1 + \sigma)NA} \quad (2)$$

上式中  $\lambda$  为照射光波长,  $NA$  为数值孔径,  $\sigma$  为部分相干因子。为保证通过灰阶掩模光强分布的平滑性, 编码时必须量化足够多的灰阶等级。

将三维面形编码为二元掩模的过程是一个线性传递过程, 而实际元件的制作过程包括了掩模到像面光强分布, 像面光强再到记录材料的复杂的非线性传递过程, 将引起浮雕轮廓发生畸变, 为了克服这种畸变, 我们对掩模进行了预校正。

为了模拟计算和制作掩模方便, 我们针对一个透镜表面轮廓进行编码, 得到的掩模如图 3 所示。用部分相干光理论计算了通过掩模后的光强分布。假设空间像强度到记录材料的传递是线性的, 那么理想的光强分布也该是球冠状的, 然而, 如图 4(a) 所示, 模拟计算的光强分布与所设计的数值有偏差, 这些偏差是由于编码掩模对光强的非线性传递引起的。

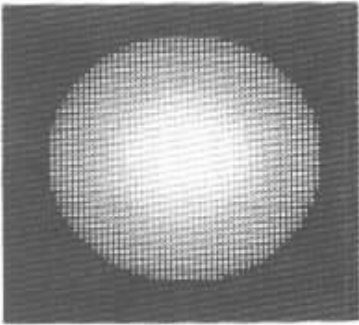


图 3 编码灰阶掩模图案

Fig.3 Design of coding gray-tone mask

参照理想光强分布, 我们采用预补偿的方法修正掩模。将每个单元的透光部分(开孔)划分成若干小的透光部分(子孔), 子孔的面积总和等于开孔的面积。这些子孔从开孔单元的中心开始逐渐向外填充, 从而使该开孔单元具有与所设计灰阶等级相应的透射率。修正方法如下(1)改变掩模上每个单元不透光部分的大小(即增加或减少子孔数), 以改变透射光强(2)当改变不透光部分尺寸大小没有效果时, 则改变它们的位置。这个修正过程需要不断地重复, 直到获得满意的光强分布。修正后的掩模的光强分布如图 4(b) 所示, 可以看出它接近于理想光强分布。

虽然由空间像传递到记录材料上过程是非线性

的, 但是可以寻找最佳的曝光剂量和显影时间, 使这个过程近似于线性过程, 从而获得满意的浮雕轮廓。

## 4 实验步骤及结果

我们在英国卢瑟福实验室微结构中心的电子束直写系统上采用 50 keV 电子束加工了尺寸为 400  $\mu\text{m}$ , 最小单元尺寸为 0.5  $\mu\text{m}$  的编码掩模, 其部分放大的照片如图 5 所示。

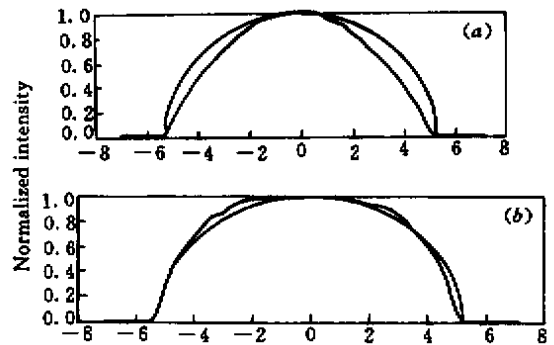


图 4 空间像光强分布(剖面图)

(a)修正前 (b)修正后

Fig.4 Light intensity distribution (cross-section)

(a) before correction (b) after correction

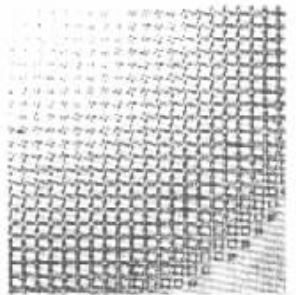


图 5 编码掩模照片

Fig.5 A gray-tone mask after chrome etch by RIE

重铬酸铵明胶溶液是在明胶溶液中加入重铬酸铵配制而成的。实验采用法国 Rousselot 公司生产的不活性明胶, 它的溶胶含量为 12.6 mg/g, 透射率为 98%(620 nm)。整个感光胶的配制过程及随后的涂布过程可在红灯、黄灯或强度较弱的白光下进行。称量 5 g 明胶倒入 180 mL 去离子水中, 静置一天, 使明胶分子充分吸水溶胀。将装有胶凝的明胶溶液的烧杯放入 50°C 水浴中使明胶融化, 然后加入 5 mL 10% 浓度的重铬酸铵溶液, 保持 50°C 水浴搅拌 1 h 左右, 使溶液均匀混合。实验使用静置法制作明胶干板, 取出用浓硫酸浸泡过的玻璃基底, 用去离子水

洗涤干净后,放入烘箱中以 $90^{\circ}\text{C}$ 的温度烘30 min,然后取出置于水平台上,将DCG溶液均匀涂布在玻璃上,静置一天等它自然干燥。静置法中DCG干板胶层的厚度可以通过改变DCG溶液的浓度和涂胶量的多少来控制。

曝光实验使用中国科学院光电技术研究所研制的G线( $435.8\text{ nm}$ ) $\delta\times$ 投影曝光系统,用编码灰阶掩模对DCG干板曝光,用 $37^{\circ}\text{C}$  0.2%的蛋白酶溶液进行刻蚀。显影过程明胶吸水会发生膨胀,其膨胀的大小与明胶中重铬酸铵的浓度、曝光量的大小、酶溶液的浓度和温度等因素有关,可以通过人为调节将膨胀控制在一定范围内。

实验制得了 $5\times 5$ 的微透镜阵列,单元中心间距为 $100\mu\text{m}$ ,用Alpha-step500型台阶仪测量,其结果

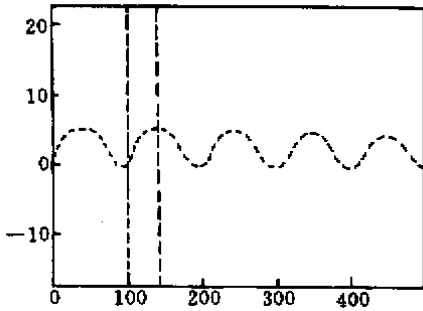


图6 Alpha-step 500 台阶仪测量结果

Fig.6 Profile measurement of the microlens array  
( $h = 5\mu\text{m}$ ,  $D = 80.5\mu\text{m}$ )



图7 微透镜阵列所成的干涉显微镜灯丝像

Fig.7 Image array of filament by microlens array

如图6所示,高度为 $5\mu\text{m}$ ,直径为 $80.5\mu\text{m}$ ,由此计算得焦距为 $270\mu\text{m}$ 。图7为微透镜阵列所成的干涉显微镜灯丝像。图6表明制得的折射微透镜具有很好的面形轮廓。

## 5 结 论

本文利用编码灰阶掩模进行曝光,蛋白酶溶液作为显影剂,在重铬酸铵明胶上成功制作了折射微透镜阵列。讨论了编码方法的原理,将一个三维面形编码成二维灰阶掩模,并对掩模进行优化。实验结果证明了用酶蚀明胶法制作浮雕微光学元件的可行性,也显示了编码灰阶掩模方法在制作连续浮雕结构的微光学元件方面的巨大潜力。

## 参 考 文 献

- 1 W. B. Veldkamp. Overview of microoptics past, present and future. *SPIE*, 1991, **1544** 287 ~ 299
- 2 William Goltsov, Michael Holz. Agile beam steering using binary optics microlens arrays. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(11): 1392 ~ 1397
- 3 Atsushi Akiba, Kenichi Iga. Image multiplexer using aplanar microlens array. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(28) 4092 ~ 4097
- 4 T. Werner, J. A. Cox, S. Swanson *et al.*. Microlens array for staring infrared imager. *SPIE*, 1991, **1544** 46 ~ 57
- 5 T. A. Shankoff. Phase holograms in dichromated gelatin. *Appl. Opt.*, 1968, **7**(10) 2101 ~ 2105
- 6 D. Meyerhofer. Spatial resolution of relief holograms in dichromated gelatin. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(2) 416 ~ 421
- 7 T. Ahlhorn, K. Gnadin, H. Kreye. Relief holograms in silver halide gelatin. Proc. SUN/FIN '93, Anaheim USA., 1993, 623 ~ 630
- 8 W. Henke, W. Hoppe, H. J. Quenzer *et al.*. Simulation and process design of gray-tone lithography for the fabrication of arbitrarily shaped surfaces. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1994, **33**(1) 6809 ~ 6815
- 9 L. Stryer. Biochemistry. Beijing: Publishing House of Peking University, 1990. 78 ~ 79 (in Chinese)
- 10 Oppliger P. Sixt, J. M. Stauffer, J. M. Mayer *et al.*. One-step 3D shaping using a grey-tone mask for optical and microelectronic applications. *Microelectron. Eng.*, 1994, **23** 449 ~ 454