

# 制作连续沟形微光学元件的新方法\*

唐继跃

(浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004)

陈波 徐平 郭履容

(四川大学信息光学研究所, 成都 610064)

**摘 要** 提出一种制作连续沟形微光学元件的新方法。用移动物面上二元图案的方法来获得连续灰度的记录, 再用卤化银明胶处理技术, 把灰度银像转化成明胶硬度潜像, 最后采用酶蚀显影工艺把潜像显现为连续沟形的浮雕结构。文中给出了原理分析和实验验证, 初步结果令人满意。

**关键词** 微光学元件, 光刻术, 卤化银明胶, 蛋白酶。

## 1 引 言

微光学元件有二元沟型与连续沟型之分。前者一般在单波长下使用, 不适宜于宽频带系统, 而且若要获得高的衍射效率还需要采用多掩模多次套刻技术, 其工艺和精度要求苛刻<sup>[1, 2]</sup>, 同时相位分等量化也会引入一定程度的噪声。而后者虽然可以克服上述缺点。但就目前已有的制作技术来说, 还存在以下的不足: 一是需要复杂而极为昂贵的设备(如激光直写系统、电子束曝光系统等)<sup>[3, 4]</sup>, 且其单片曝光时间极长(一般为数十小时); 二是还没有适宜的记录材料及与之配套的显影工艺, 银盐漂白片的噪声较大、保存期短(光黑化)且衍射效率不高, 光致抗蚀剂的线性动态范围小且灵敏度低, 因此, 有关技术的发展受到极大的限制。本文把制作微光学元件的三个因素——曝光系统、记录材料和材料的处理手段作为一个整体来考虑, 提出一种设备简单、成本低廉的制作方法。设计一台能产生连续曝光量分布的平移物面曝光系统, 直接在卤化银干版上记录连续灰度的信息。然后采用卤化银(敏化)明胶的处理技术<sup>[5-7]</sup>, 在干版上产生连续变化的明胶硬度潜像。最后采用酶蚀显影方法将明胶上的硬度潜像显现为浮雕像。本方法以卤化银明胶处理技术为桥梁, 巧妙地把预硬化明胶酶蚀成像的沟形保真能力与平动物面拍摄系统相结合。用普通的白炽灯作为记录光源, 所需的曝光时间极短。本文将在分析原理的基础上, 给出用这种方法制作的微光学元件的实验结果。

## 2 曝光系统及其工作原理

为了避免连续灰度掩膜片的制作, 设计了如图 1 所示的平动物面照相缩微拍摄系统。其

\* 本文是作者在四川大学博士生期间完成的, 曾得到国家自然科学基金和浙江省教委科研基金的资助。

收稿日期: 1996 年 3 月 19 日

中 O 是物面, I 是像面, L 是缩微组合透镜, LP 是照明光源。物面 O 可以在步进马达的驱动下沿 y 轴平动, 其速度按要求由电脑控制。这种系统可以通过曝光期间移动物面的方法, 把物面上的二元图案转化成像面上曝光量连续变化分布的图像, 从而为连续沟形浮雕像的记录提供必要的信息。二元图案可以根据所制作元件的需要, 由计算机来设计和打印输出。假设在物面上放置如图 2 所示的二元图案, 并使其在曝光期间沿 y 轴平动, 则像面上各点在 t 时间内的曝光量将与二元图案及其移动的速度有关。如果二元图案在 y 轴方向的重复周期为 b, 每个单元分别由函数曲线 y = f(x) 将其分割成黑与白两部分, 则像面上 t = 0 时刻对应的光强分布为:

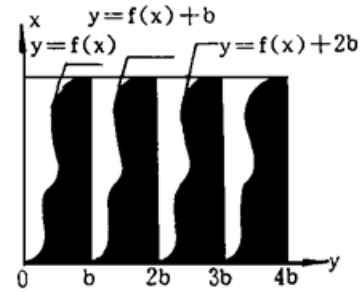
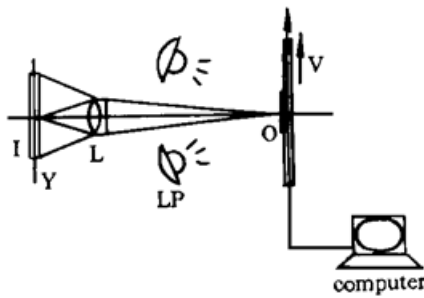


Fig. 1 Recording system with moveable object plane Fig. 2 Skemetic of binary pattern on object

$$I(x, y) = \begin{cases} 1 & Mjb < y < M[jb + f(x)] \\ 0 & M[jb + f(x)] < y < M[(j + 1)b] \end{cases} \quad (1)$$

$j = 0, 1, 2, \dots, n - 1$

式中 M 为系统的缩小倍数, n 为物面图案的单元数。若把此时像面上对应的亮区定义为 I 区, 而暗区定义为 II 区。则当物面以 v 速度沿 y 轴正向移动时, 在移动过程中的某一 t 时刻, 像面上 I 区内任意点(x, y) 的光强分布为:

$$I_1(x, y, t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < M(y - jb)/v \\ 0 & M(y - jb)/v < t < M\{y - [f(x) + (j - 1)b]\}/v \\ 1 & M\{y - [f(x) - (j - 1)b]\}/v < t < Mb/v \end{cases} \quad (2)$$

同一时刻 II 区内任意点的光强分布为:

$$I_2(x, y, t) = \begin{cases} 0 & 0 < t < M\{y - [f(x) + jb]\}/v \\ 1 & M\{y - [f(x) + jb]\}/v < t < M(y - jb)/v \\ 0 & M(y - jb)/v < t < Mb/v \end{cases} \quad (3)$$

在 [0, b/v] 时间段内, I 区内点的曝光量为

$$E_1(x, y) = \int_0^{b/v} I_1(x, y, t) dt = \int_0^{M(y-jb)/v} dt + \int_{M(y-jb)/v}^{M\{y-[f(x)+(j-1)b]\}/v} O dt + \int_{M\{y-[f(x)+(j-1)b]\}/v}^{Mb/v} dt$$

$$= Mf(x)/v \quad (4)$$

II 区内点的曝光量为

$$E_2(x, y) = \int_0^{b/v} I_2(x, y, t) dt = \int_0^{M\{y-[f(x)+jb]\}/v} O dt + \int_{M\{y-[f(x)+jb]\}/v}^{M(y-jb)/v} dt + \int_{M(y-jb)/v}^{Mb/v} O dt$$

$$= Mf(x)/v \quad (5)$$

由(4)式、(5)式得:

$$E_1(x, y) = E_2(x, y) = Mf(x)/v \quad (6)$$

(6) 式说明: 像面上的任意点(不管是 I 区还是 II 区的点)在二元图案移动一周的时间( $t = b/v$ )内, 其曝光量只与系统的缩小倍数  $M$ , 物面移动速度  $v$  及二元图案的黑白分界函数  $f(x)$  有关, 且与  $f(x)$  成正比。因此, 可以通过二元图案的设计来方便地获得所需的具有一维连续分布的曝光量记录。如果把二元图案在  $x$  方向也设计成具有单元重复的结构(参见图 3), 即分割函数  $y = f(x)$  是关于  $x$  的周期函数, 则在像面得到的将是一沿  $x$  方向周期性变化的连续灰度图案——平行于  $y$  轴的连续灰度光栅图案。如果采用两次曝光的方法, 使二元图案在第一次曝光期间沿  $x$  方向平动, 而第二次曝光期间沿  $y$  方向平动。那么就可以在像面上获得具有二维周期性重复的连续灰度分布的列阵式图案。其在  $x$  和  $y$  方向的周期分别等于二元图案在对应方向的单元宽度  $a$  和  $b$ 。

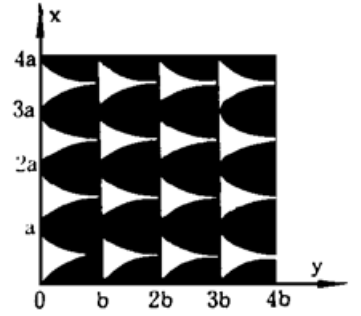


Fig. 3 Schematic of binary pattern with parabola fuction

对于图 3 所示的二元图案, 其黑白分界函数由抛物线界定的单元沿  $x$  方向周期重复而成, 它可以用卷积表示成<sup>[9]</sup>:

$$y = f(x) = kx^2 \text{rect}(x/a) \odot \sum \delta(x - ia) \quad (7)$$

式中  $\odot$  为卷积符号,  $k$  为常数, 它决定抛物线的开口成度;  $\text{rect}(x/a)$  表示宽度为  $a$  的门函数:

$$\text{rect}(x/a) = \begin{cases} 1 & x < a/2 \\ 0 & x > a/2 \end{cases} \quad (8)$$

如果假设单元宽度为  $a \times b$ , 单元数为  $m \times n$ , 则像面上任意点对应于  $y$  和  $x$  方向平动期间的曝光量分别为:

$$\begin{aligned} E_y(x, y) &= Mf(x)/V \\ &= (Mk/V) \text{rect}(x/ma) \text{rect}(y/nb) [x^2 \text{rect}(x/a)] \odot \sum \delta(x - ia) \end{aligned} \quad (9)$$

和

$$\begin{aligned} E_x(x, y) &= Mf(y)/V \\ &= (Mk/V) \text{rect}(x/ma) \text{rect}(y/nb) [y^2 \text{rect}(y/b)] \odot \sum \delta(y - jb) \end{aligned} \quad (10)$$

总曝光量为

$$\begin{aligned} E(x, y) &= E_x(x, y) + E_y(x, y) \\ &= (Mk/V) \text{rect}(x/ma) \text{rect}(y/nb) \\ &\quad \times \{ [x^2 \text{rect}(x/a)] \odot \sum \delta(x - ia) + [y^2 \text{rect}(y/b)] \odot \sum \delta(y - jb) \} \end{aligned} \quad (11)$$

由于

$$\text{rect}(x/a) \odot \sum \delta(x - ia) = 1 \quad (12)$$

故(11)式可化为

$$\begin{aligned} E(x, y) &= (Mk/V) \text{rect}(x/ma) \text{rect}(y/nb) \\ &\quad \times \{ [(x^2 + y^2) \text{rect}(x/a) \text{rect}(y/b)] \odot \sum \sum \delta(x - ia) \delta(y - jb) \} \end{aligned} \quad (13)$$

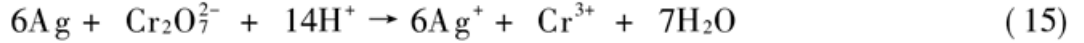
该式描述的是一种列阵式分布函数, 它可以看成是由单元函数

$$e(x, y) = (Mk/V)(x^2 + y^2) \text{rect}(x/a) \text{rect}(y/b) \quad (14)$$

经  $x, y$  方向按周期  $a$  和  $b$  重复来得到的。显然(14)式表示的是一旋转抛物面函数。因此, 可以用图 3 所示的二元图案通过两次曝光的方法来获得单元灰度呈抛物面形的列阵图像。

### 3 卤化银明胶酶蚀成像原理

卤化银敏化明胶(简称卤化银明胶)技术实际上是一种对卤化银材料的特殊处理技术。在这种技术中,尽管所使用的记录材料是卤化银干版,但是被记录信息的最终载体既不是银也不是卤化银,而是明胶。胶层中的卤化银只是作明胶的敏化剂来使用,它在后处理过程中将从明胶层中驱除。典型的卤化银明胶处理工艺由显影、停影、漂白、定影、水洗和脱水六步组成<sup>[7]</sup>。曝光后的卤化银胶层经显影和停影处理后,形成了由不同银密度构成的灰度银像。再经漂白处理,胶层中的银将发生如下的氧化还原反应<sup>[5]</sup>:



即银像中的银原子被氧化成银离子,同时六价铬离子  $\text{Cr}^{6+}$  被还原成三价铬离子  $\text{Cr}^{3+}$ 。由于  $\text{Cr}^{3+}$  与明胶分子中的极性侧基具有良好的配位能力,所以它将与被氧化银附近的明胶发生交联反应(或称硬化反应)。这样就在明胶中产生了与原来银像对应的硬度潜像。再经过定影处理,驱除卤化银后,就可以获得含有硬度潜像的纯明胶板。它与用普通预硬化重铬酸盐明胶所获得的含潜像的明胶板是一样的。因此,同样可以利用不同硬度明胶对蛋白酶具有不同抗水解能力这一特性,采用酶蚀显影工艺来把硬度潜像显现为浮雕像。并且在一定曝光量范围内,浮雕深度  $\Delta d$  与曝光量的变化量  $\Delta E$  之间应有如下的线性关系<sup>[9]</sup>:

$$\Delta d = kt\Delta E \quad (16)$$

式中  $k$  为与胶板本身条件及处理条件有关的常数,  $t$  为酶液显影时间。正是这种线性响应保证了酶蚀显影的沟形保真度。

### 4 实验和结果

为了验证本方法的可行性,本文按图 1 所示的系统以及附录所示的处理工艺进行了实验。记录介质采用天津型——I 型全息干版。考虑到它的背景硬度比在文献[8]中所用的自制明胶板要大这一实际情况,表 1 中采用了不含硬化剂的 F-24 来定影。实验中采用的二元图案如图 3 所示,它的实际单元数是  $160 \times 160$  个,单元尺度为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。本文用一维平动的方法制作了抛物线沟形的光栅。其沟形的干涉显微镜观察结果和轮廓仪(美国 Tencor 公司生产的 Alpha-Step 500 型 Surface-Profiler)测量结果分别示于图 4 和图 5 之中。从图 4 可以看出,光栅的半周期为  $16.37 \mu\text{m}$ ,浮雕深度为  $3.56 \mu\text{m}$ ,沟形保真度良好。另外作者还用两次曝光方法制作了具有抛物面面形的微透镜列阵(单元个数为  $160 \times 160$  个)<sup>[10]</sup>。其面形的干

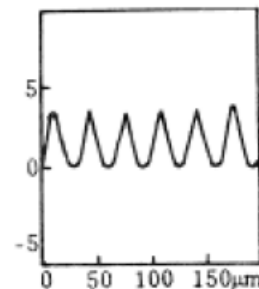
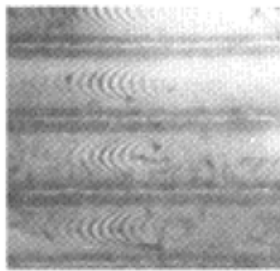


Fig. 4 Photograph of groove profile of parabola-grating with interfere-microscope

Fig. 5 Result of the groove profile of parabola-grating with surface profiler

涉显微镜观察结果示于图 6(a) 中, 对应像质的显微镜观察结果示于图 6(b) 之中。由图可见, 微透镜的面形保真度良好, 所成的灯丝像像质清晰。

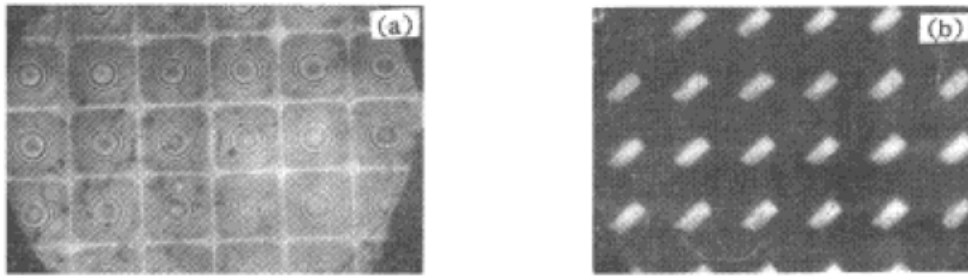


Fig. 6 (a) Photograph of groove profile of microlens array with intere-microscope, (b) Photograph of the filaments-image by microlens array with microscope

**结束语** 本文提出了一种连续沟形微光学元件制作的新方法。这种方法的技术关键和创新包括两个方面: 一是设计了一种能产生连续曝光量分布的记录系统; 二是为这种系统选择了卤化银材料作为记录介质并采用了卤化银明胶处理技术, 这样一方面既可满足平移物面曝光系统对记录材料高感光速度的要求, 另一方面又可为酶蚀显影技术提供含有硬度潜像的纯明胶透明介质。正是由于曝光系统、记录介质和后处理手段的巧妙结合, 使得本方法可以用简单的设备来快速、高效地制作连续沟形的微光学元件。尽管这一技术的实际应用还需要做大量的工作, 但是从初步情况来看, 前景是令人鼓舞的。

四川大学生物系郑常文教授曾对本文的实验提出有益的建议, 中国科学院成都光电所微细加工国家重点实验室的周明宝博士为实验结果的测量提供了帮助, 在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] W. Goltsov, M. Holz, Agile beam steering using binary optics micro-lens arrays. *Opt. Eng.*, 1990, **29** (11): 1392~ 1397
- [2] G. Jin, High efficiency multiple-phase-level lenslet array. *Proc. SPIE*, 1992, **1751**: 165~ 172
- [3] P. Langlais, Diffraction optical elements fabricated by laser direct writing and other technique. *Proc. SPIE*, 1992, **1751**: 2~ 12
- [4] M. T. Gale, M. Rossi, Continuous-relief diffractive optical elements for two dimensional array generation. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2526~ 2533
- [5] W. R. Graver, Phase holograms formed by silver halide (sensitized) gelatin processing. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(9): 1529~ 1536
- [6] E. S. Simova, Silve halide sensitized gelatin derived from Agfa-Geravert holoraphic plates. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(10): 1875~ 1879
- [7] 朗恒元, 马春荣, 卤化银明胶全息图成像机理的探讨. *光学技术*, 1988, (4): 26~ 30
- [8] M. Francon 著, 北京工学院光学室翻译, *光学: 像的形成和处理*. 北京, 科学出版社, 1979 第一版, 171~ 173
- [9] 唐继跃, 陈波, 徐平等, 预硬化明胶酶蚀成像特性的研究. *光学学报*, 1997, **17**(2): 216~ 221
- [10] Chen Bo, Guo Lurong, Tang Jiyue, Novel method for making parabolic grating. *Proc. SPIE*, 1996, **2687**: 142~ 148

## 附录 卤化银明胶酶蚀处理工艺

1. 用稀释 D-76(1:10 稀释) 显影 10 min, 20°C
2. 停影液中 4 min, 20°C
3. 动水冲洗后再用去离子水冲干净, 20°C
4. 漂白: 用稀释改进 R-10 液\*, 20°C, 10 min
5. 动水冲洗 3 min 后, 再用去离子水冲洗干净, 20°C
6. 用 F-24 定影液定影, 5 min, 20°C
7. 动水冲洗 5 min 后, 再用去离子水冲洗干净, 20°C
8. 用 0.1% 的胰酶水溶液\* (PH= 7) 处理 5~ 15 min, 30°C
9. 动水冲洗 3 min 后, 再用去离子水冲洗干净, 20°C
10. 在 90°C 的烘箱中烘 2 h

\* 将标准的改进 R-10 的 A 稀释 10 倍后再加入 B 液中。

\* 所用的胰酶活性为 601 U/mg。

## A New Method for Fabricating Continuous-Relief MOEs

Tang Jiyue

(Information Optics Institute, Zhejiang Normal University, Jin Hua 321004)

Chen Bo Guo lurong Xu Ping

(Information Optics Institute, Sichu University, Chengdu 610064)

(Received 19 March 1996)

**Abstract** A new technique for fabricating continuous-relief micro-optics elements (MOEs) has been developed. At first, the binary pattern on the object plane is transformed into continuous-grey-image on the recording plate by using the exposure system with movable object-plane. And then the silve image is in term transformed into harden-laten-image by using silve halide gelatin processing procedure. Finally, this laten image is developed by enzyme treating. The principle analysis and experimental demonstration are described as well in this paper.

**Key words** MOE, photolithography, silve halide sesitived gelatin, protein-digesting enzyme.