

# 深蚀刻二元光学元件制作误差模拟\*

徐 平 唐继跃 庞 霖 郭履容 郭永康

(四川大学信息光学研究所 成都 610064)

**提要** 用计算机研究并给出了深蚀刻二元光学元件制作误差对衍射效率影响的规律;将深刻蚀二元光学元件与一般二元光学元件制作误差规律的不同之处进行了分析说明;提出了深刻蚀二元光学元件制作误差规律的经验公式。

**关键词** 制作误差, 计算机模拟, 深刻蚀, 二元光学元件, 经验公式

## 1 引 言

近年来,随着超大规模集成电路(VLSI)、激光技术、全息技术、计算全息(CGH)及新材料的发展,二元光学技术得到很大发展。

二元光学<sup>[1]</sup>技术是利用计算全息方法与大规模集成电路技术相结合,从而在任意片基材料上制作出位相深度为 $2\pi$ 的、多台阶微浮雕结构的衍射微光学元件。二元光学元件以光的衍射为基本原理,具有微型化、轻型化、可复制、价格低、可设计产生任意形状的波前、可把多种功能集中于一个器件上等其它器件不可比拟的特点。

随着微光学技术的不断发展,在某些应用中,比如制作 FAST 宽带微透列阵<sup>[1]</sup>(fast broadband microlens array)、分色光学<sup>[2,3]</sup>(color discrimination optics)、焦平面微透镜列阵<sup>[1]</sup>(focal-plane microlens arrays)等,需要突破传统的二元光学技术,发展一种新颖的、蚀刻位相深度超过 $2\pi$ 的、具有高 aspect-ratio 的深蚀刻二元光学技术<sup>[4]</sup>。

系统地研究深蚀刻二元光学技术,是一个全新的课题。本文在我们研究深蚀刻二元光学元件特性<sup>[4-5]</sup>和传统二元光学元件工作<sup>[6,7]</sup>的基础上,用计算机模拟并给出了深刻蚀二元光学元件制作误差对衍射效率影响的规律;对深刻蚀二元光学元件与一般二元光学元件制作误差规律的不同之处进行了分析说明;通过对大量模拟数据的分析,提出了深蚀刻二元光学元件制作误差规律的经验公式。这些初步研究结果对于下一步制作深蚀刻二元光学元件具有重要的指导意义。

二元光学元件表面的台阶数(即相位等级)为 $N = 2^n$ , $n$ 是套刻掩膜的个数。其制作过程一般分为三步:(1)  $n$ 个掩膜的设计与制作;(2) 图形转印(光刻胶上曝光)与片基刻蚀;(3) 大量复制。其中第二步对 $n$ 个掩膜需在实际制作二元光学元件时,由于套刻而带来的各种误差对元件质量影响情况比较复杂。各次套刻时会产生不同的蚀刻深度误差与对位误差。我们根据二元

\* 湖北省教委青年基金、国家自然科学基金资助项目。

套刻的特点, 仍然采用离散傅里叶变换数值算法, 通过对传统二元光学元件制作误差分析软件<sup>[6]</sup>的修改与调整, 编制出“深蚀刻二元光学元件制作误差模拟软件”。该软件使用 32768 个样点数, 输入不同的深蚀刻因子<sup>[4]</sup>, 即可对深蚀刻和传统蚀刻二元光学元件制作误差都可进行分析。输入一组套刻误差, 可模拟出相应情形的元件表面浮雕槽形和相应的衍射效率以及这组误差的均方根。输入多组套刻误差, 可绘出衍射效率曲线及相应的一组浮雕槽形图。

下面使用该软件先分别讨论深度误差与对位误差单独对衍射效率的影响; 然后再讨论它们同时对衍射效率影响的规律。综合这些考虑, 最后得出深蚀刻二元光学元件制作误差的系统规律。

## 2 深度误差对衍射效率的影响

为简单起见, 我们以 8 阶闪耀光栅、蚀刻  $4\pi$  深为例进行讨论。形成 8 个台阶需要 3 个掩膜套刻, 因此会产生三次深度误差, 以  $\delta d_1, \delta d_2$  和  $\delta d_3$  分别表示三次套刻时产生的相对深度误差, 即  $\delta d_i = \Delta d_i / D_0, i = 1, 2, 3$ , 这里  $\Delta d_i$  即各次套刻时产生的绝对深度误差;  $D_0$  为该元件浮雕总深度的设计值。 $\delta d_i$  为 “+”, 表示刻深了, 反之,  $\delta d_i$  为 “-” 则表示刻浅了。

表 1 均匀深度误差数据

Table 1 Data on even depth error

No.	$\delta d_1$	$\delta d_2$	$\delta d_3$	D. E(%) simulation	D. E(%) experince
1	$\pm 0.01$	$\pm 0.01$	$\pm 0.01$	80.33	80.37
2	$\pm 0.02$	$\pm 0.02$	$\pm 0.02$	78.17	78.29
3	$\pm 0.03$	$\pm 0.03$	$\pm 0.03$	74.68	74.83
4	$\pm 0.04$	$\pm 0.04$	$\pm 0.04$	70.03	69.99
5	$\pm 0.05$	$\pm 0.05$	$\pm 0.05$	64.43	63.76
6	$\pm 0.06$	$\pm 0.06$	$\pm 0.06$	58.13	56.14
7	$\pm 0.07$	$\pm 0.07$	$\pm 0.07$	51.39	47.15
8	$\pm 0.08$	$\pm 0.08$	$\pm 0.08$	44.48	36.77
9	$\pm 0.09$	$\pm 0.09$	$\pm 0.09$	37.66	25.00
10	$\pm 0.10$	$\pm 0.10$	$\pm 0.10$	31.15	11.85

表 2 8 阶闪耀光栅的深度误差数据

Table 2 Data on depth error of 8-level blazed graings

No.	$\delta d_1$	$\delta d_2$	$\delta d_3$	$\sigma$	$\sigma^2$	D. E(%) simulation	R. D(%)	D. E(%) experince
1	$\pm 0.05$	$\pm 0.05$	$\pm 0.05$	0	0	64.43	20.51	64.43
2	$\pm 0.02$	$\pm 0.07$	$\pm 0.06$	0.0216	0.0005	61.58	24.03	61.63
3	$\pm 0.08$	$\pm 0.05$	$\pm 0.02$	0.0245	0.0006	60.74	25.07	60.82
4	$\pm 0.02$	$\pm 0.05$	$\pm 0.08$	0.0245	0.0006	60.74	25.07	60.82
5	$\pm 0.08$	0	$\pm 0.07$	0.0356	0.0013	57.01	29.67	56.61
6	$\pm 0.1$	$\pm 0.04$	0.01	0.0374	0.0014	55.96	30.97	56.01
7	$\pm 0.12$	0	$\pm 0.03$	0.051	0.0026	49.96	39.25	48.62
8	$\pm 0.15$	0	0	0.0707	0.005	37.35	53.92	34.37
9	0	$\pm 0.15$	0	0.0707	0.005	37.35	53.92	34.37
10	0	0	$\pm 0.15$	0.0707	0.005	37.35	53.92	34.37

D. E: represents diffractive efficiency; R. D: represents relative decline.

表 1 是产生均匀深度误差与衍射效率关系的数据。表中分别取各次误差绝对值之和为  $\sum_{i=1}^n |\delta d_i| = 0.03, 0.06, 0.09, \dots, 0.3$ 。表 2 为发生随机深度误差与衍射效率关系的数据。为使数据便于比较且有说服力,在表 2 中固定  $\sum_{i=1}^n |\delta d_i| = 0.15$  不变,而只是改变  $\delta d_1, \delta d_2, \dots, \delta d_n$  的取值大小和排列次序。 $\sigma$  表示均方根差,即各个误差平方和的平均值的平方根。

对上述两表所列数据仔细分析,可得深度误差与衍射效率之间的关系:

(1) 由表 1 可知,衍射效率随深度误差绝对值的增加而降低,与深度误差的正、负(刻深或刻浅)无关。即只与  $\sum_{i=1}^n |\delta d_i|$  有关。

(2)  $n$  个掩膜套刻  $n$  次,产生  $n$  次随机的相对深度误差  $\delta d_1, \delta d_2, \dots, \delta d_n$ ,则总的(相对)深度误差为  $\delta D = \delta d_1 + \delta d_2 + \dots + \delta d_n$ ;对于一个确定的深度误差  $\delta D$ ,可以有无穷多组  $\{\delta d_1, \delta d_2, \dots, \delta d_n\}$ ,由表 2 模拟实验的数据表明:衍射效率随着组合的改变而改变,但与各组合内各分量的排列次序无关,仅与各组合内各个分量大小的绝对值有关;对于某一组  $\{\delta d_1, \delta d_2, \dots, \delta d_n\}$ ,该组内各分量间均方根差(RMS) 越小,这组深度误差对衍射效率的影响越小,当  $\delta d_1 = \delta d_2 = \dots = \delta d_n$  时,均方根差为零,衍射效率相对最大。

(3) 深度误差的改变对衍射效率的影响并非线性关系,而是一条抛物线。

根据上面的计算数据和总结出的规律,现在来寻找衍射效率与深度误差的经验公式。

当  $|\delta d_1| = |\delta d_2| = \dots = |\delta d_n| = \delta d$  时,这组均匀深度误差的均方根差为零,衍射效率仅由  $(\sum_{i=1}^n |\delta d_i|)^2$  决定。这时  $\sum_{i=1}^n |\delta d_i| = |\delta d_1| + |\delta d_2| + \dots + |\delta d_n| = n \cdot |\delta d|$ 。均匀深度误差的数据见表 1。为直观起见,将表 1 的数据用“+”号绘制成图 1。

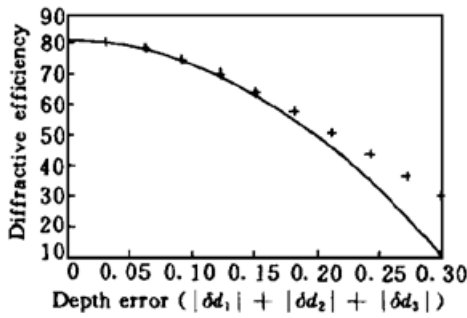


图 1 衍射效率与均匀深度的误差关系曲线  
+ : 模拟值; 实线表示经验公式曲线

Fig. 1 Relationship of diffractive efficiency with even depth error  
+ : represents simulation value;  
Real line represents experience formula curve

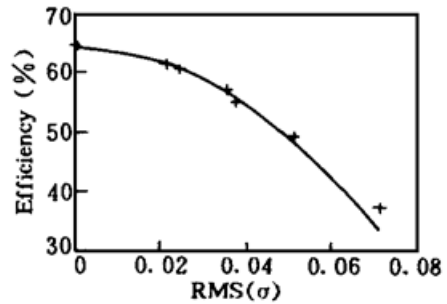


图 2 衍射效率与随机深度的误差关系曲线  
+ : 模拟值; 实线为经验公式曲线;

RMS 表示均方根误差  
Fig. 2 Relationship between diffractive efficiency and random depth error  
+ : represents simulation value; Real line represents experience formula curve; RMS represents root of mean square of errors

对于随机深度误差情形,各个  $\delta d_i$  都不相等,衍射效率不仅与  $(\sum_{i=1}^n |\delta d_i|)^2$  有关,而且还与这组误差的均方根差 RMS 有关。这时的数据见表 2。并将表 2 的数据用“+”号绘制成图 2 所示的曲线。图 2 中横坐标 RMS 表示均方根误差,即表 2 中的  $\sigma$ 。

根据对表 1,表 2,图 1 和图 2 的分析以及上面的讨论,可以得出深度误差与衍射效率关系

的经验公式

$$\eta_D = \eta_0 - C_1 \cdot \left( \sum_{i=1}^n |\delta d_i| \right)^2 - C_2 \cdot \sigma^2 \quad (1)$$

其中  $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (|\delta d_i| - \overline{\delta d})^2 / n}$ ,  $\overline{\delta d} = \sum_{i=1}^n |\delta d_i| / n$ ,  $\overline{\delta d}$  表示平均误差的绝对值;  $\eta_0, C_1, C_2$  为常数, 其值分别为  $\eta_0 = 81.06\%$ ,  $C_1 = 769$ ,  $C_2 = 6012$ 。

由上述经验公式所计算出的曲线与模拟数据符合情况见图 1 和图 2。在这两图中, 实线表示经验公式计算出的曲线, “#”号表示模拟程序给出的数据点。由图 1 可见, 相对深度误差太大(大于 0.25) 时, 经验公式与模拟程序不符合。

### 3 对位误差对衍射效率的影响

8 台阶元件三次套刻时要产生两次对位误差, 即掩膜 2 相对于片基上对位标记(由掩膜 1 刻蚀的) 的相对对位误差  $\delta A_1$  和掩膜 3 与同一对位标记的相对对位误差  $\delta A_2$ 。这里  $\delta A_i = \Delta A_i / P$ ,  $i = 1, 2$ 。  $\Delta A_i$  是各次对位误差的绝对大小,  $P$  是该闪耀光栅的设计周期。

从大量模拟数据中, 选出其中有代表性的数据列于表 3。

表 3 8 阶闪耀光栅的对位误差数据

Table 3 Alignment error data of 8-levels blazed gratings

$\delta A_1 \backslash \delta A_2$	D, E	0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04
			L	R	L	R	L	R	L	R
0		81.06	71.14	71.28	61.36	61.63	51.89	52.26	42.85	43.30
0.01	L	71.14	81.06	61.50	71.14	52.14	63.36	43.19	51.89	34.79
0.01	R	71.28	61.51	81.05	52.03	71.27	42.98	61.61	34.51	52.23
0.02	L	61.36	71.14	52.01	81.06	43.07	71.14	34.69	61.36	26.98
0.02	R	61.64	52.15	71.27	43.10	81.02	34.62	71.23	26.84	61.57
0.03	L	51.89	61.36	42.96	71.14	34.58	81.06	26.89	71.14	27.91
0.03	R	52.26	43.21	61.61	34.72	71.23	26.94	80.98	27.91	71.18
0.04	L	42.85	51.89	34.48	61.36	26.80	71.14	27.91	81.06	35.82
0.04	R	43.30	34.60	52.23	27.02	61.57	27.61	71.17	35.47	80.91

$\delta A_1, \delta A_2$  represents alignment error with Mask 2 to 1 and Mask 3 to 1 respectively. L and R represents that the Masks shift left or right respectively.

为直观起见, 将表 3 的数据绘制成图 3 所示的对位误差与衍射效率关系的三维图。图 3(c) 是所选取坐标系的示意图, 在水平面内的两个方向分别代表  $\delta A_1$  和  $\delta A_2$  的大小和方向, 垂直方向则表示衍射效率的大小。图 3(b) 是在所选定坐标系下时的对位误差三维图, 显然, 它是沿一、三象限对称, 且在对角线上有最大值。图 3(a) 是从另一个角度观察该图的结果。

由表 3 和图 3 的系统分析, 可以得到制作深蚀刻二元光学元件时, 对位误差对衍射效率影响的规律。

当蚀刻深度因子<sup>[4]</sup>  $t = 2$  (即表示总的蚀刻位相深度为  $4\pi$ ) 时, 衍射效率由掩膜 3 与掩膜 2 之间的相对位移  $\delta A_1 - \delta A_2$  的大小决定, 且随着这个相对位移的大小  $|\delta A_1 - \delta A_2|$  的增加而线性减少, 而与这个相对位移  $\delta A_1 - \delta A_2$  的方向无关。

在一般二元光学刻蚀深度时 ( $t = 1$ , 对应位相深度为  $2\pi$ ), 衍射效率与对位误差的关系较

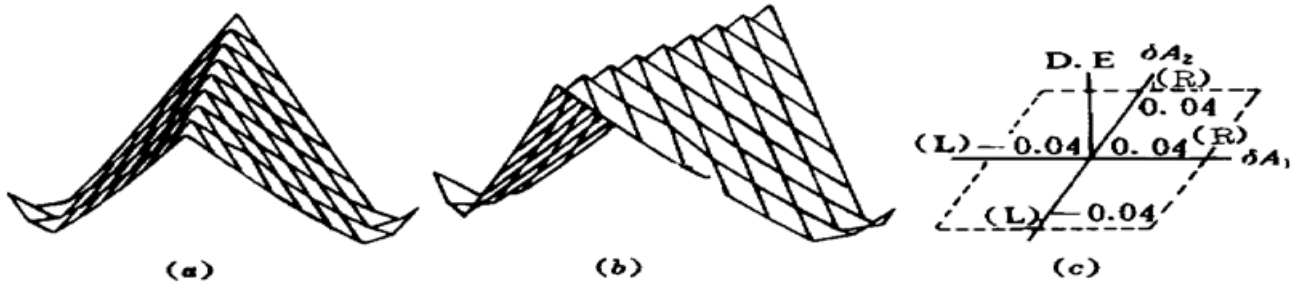


图3 8阶闪耀光栅的对位误差

(a), (b) 误差三维分布图(沿不同观察方向); (c) 坐标系

Fig. 3 Alignment error of an 8-level blazed grating

(a), (b) 3-D distributions of the error with different view directions; (c) Coordinate system

复杂,其详细情况参见文献[5]。在深蚀刻时,对位误差规律却很简单,分析可知这主要是加深蚀刻后在深度方向位相大于  $2\pi$ ,而位相合成是以  $2\pi$  为周期的,这些位相的叠加合成就有可能带来新的特性。下面通过对对角线上出现最大值这一现象进行具体分析来说明深刻蚀与一般蚀刻制作误差规律之间的差异。

深刻蚀时,当掩膜 2、掩膜 3 同时都向左(或右)产生相同数量的对位误差时,尽管槽形已偏离了设计的标准形,但对衍射效率没有影响。

产生这种现象的原因分析如下:如图 4 所示,当掩膜 2 向左(相对于掩膜 1 在片基上曝光留下的对位标记)发生 0.1 的相对对位误差时,便形成了图 4(b),且图 4(c) 中的凸出部分 a 和凹下部分 b 就是掩膜 2 的对位误差造成的。由于掩膜 3 相对于同一不动的标记继续向左发生相同的对位误差时,则掩膜 3 相对于掩膜 2 没有对位误差,因此用掩膜 3 在图 4(b) 的基础上继续刻蚀时不产生新的槽形变形,从而得到图 4(c)。

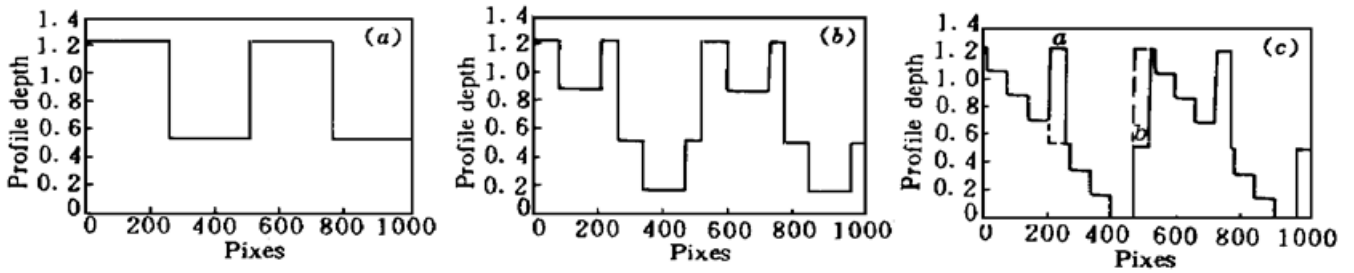


图4 掩膜 2 和 3(向左偏)的对位误差

(a) 掩膜 1 刻蚀; (b) 掩膜 1, 2 刻蚀; (c) 掩膜 1, 2, 3 刻蚀

Fig. 4 Masks 2 and 3 align toward the left

$\delta A_1 = 0.1(L)$ ,  $\delta A_2 = 0.1(L)$ , D.E = 81%,  $\delta d_1 = \delta d_2 = \delta d_3 = 0$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , and  $t = 2$

(a) Etched with Mask 1; (b) Etched with Mask 1 and 2; (c) Etched with Mask 1, 2 and 3

虽然图 4(c) 所示的槽形已偏离设计槽形很大,通过分析可知,它可与标准槽形等效。当深刻蚀因子  $t = 2$  时,图中所示的最大刻蚀深度相应的位相为  $4\pi - \pi/2 = 7\pi/2$ 。在图 4(c) 中,突出部分 a 处相应的位相应是  $3\pi/2$ (如图中虚线所示) 发生对位误差后却变成了  $7\pi/2$ 。由于  $e^{i7\pi/2} = e^{i3\pi/2}$ ,所以 a 处的突出没有影响。凹下部分 b 处相应的位相应是  $7\pi/2$ ,发生对位误差后变成了  $3\pi/2$ ,同样的原因, b 处的凹下变化也没有影响。同理,我们可分析图 5 向右发生对位误差的情形。

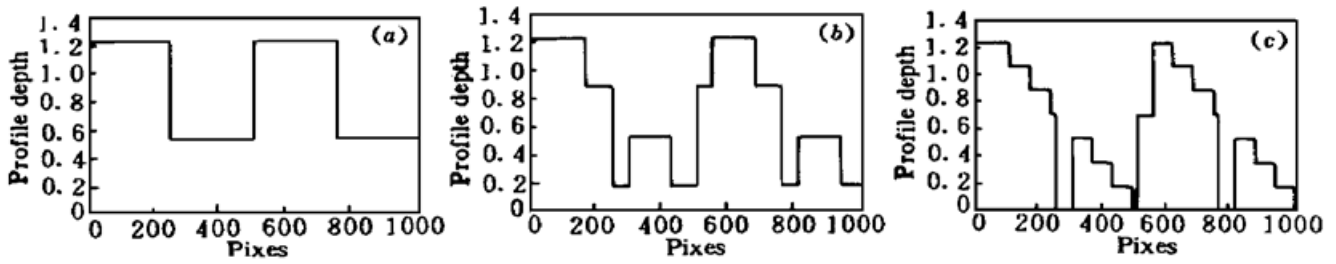


图 5 掩膜 2 和 3(向右偏)的对位误差

(a) 掩膜 1 刻蚀; (b) 掩膜 1, 2 刻蚀; (c) 掩膜 1, 2, 3 刻蚀

Fig. 5 Masks 2 and 3 align toward the right

 $\delta A_1 = 0.1(R)$ ,  $\delta A_2 = 0.1(R)$ , D. E = 81%,  $\delta d_1 = \delta d_2 = \delta d_3 = 0$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , and  $t = 2$ 

(a) Etched with Mask 1; (b) Etched with Mask 1 and 2; (c) Etched with Mask 1, 2 and 3

但是,在一般二元光学刻蚀中不存在这个规律。这可说明如下:在相同的条件下进行一般二元光学刻蚀,也会产生形状类似于图 4(c) 的槽形。但这时突出部分  $a$  处相应的位相应是  $3\pi/4$  而不是  $3\pi/2$ ; 发生对位误差后的深度对应的位相则为  $7\pi/4$ 。因为  $7\pi/4$  与  $3\pi/4$  相差  $\pi$  而不象深刻蚀时是相差  $2\pi$ , 即  $e^{i\pi/4} \neq e^{i7\pi/4}$ , 因此没有深刻蚀的那种等效性。

通过以上对位误差的分析,则可从大量的模拟数据中总结出深刻蚀对位误差经验公式

$$\eta_A = \eta_0 - C_3 \cdot |\delta A_1 - \delta A_2| \quad (2)$$

式中  $\eta_0$  和  $C_3$  是常系数。在本模拟程序中其值分别为  $\eta_0 = 81.06\%$ ,  $C_3 = 956$ 。该经验公式中  $\delta A_1, \delta A_2$  的符号法则如下:掩膜向左偏移时,  $\delta A_1, \delta A_2$  取 “-” 号; 反之,掩膜向右偏移时,  $\delta A_1, \delta A_2$  取 “+”; 对位误差经验公式与模拟计算值进行对比计算的数据和绘制的曲线分别见表 4 和图 6。在图 6 中, “+” 号表示模拟值, 实线表示经验公式(2)式计算值。显然, 对位误差经验公式与模拟计算值符合得很好。

表 4 模拟计算与经验公式的结果对比(只考虑对位误差)

Table 4 Comparison between results of simulation calculation and the experience formula

$ \delta A_1 - \delta A_2 $	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
Simulation ( $\eta$ )	81.06	71.14	61.36	51.89	42.85	34.69	26.84
Experience ( $\eta$ )	81.06	71.50	61.95	52.39	42.83	33.28	23.72

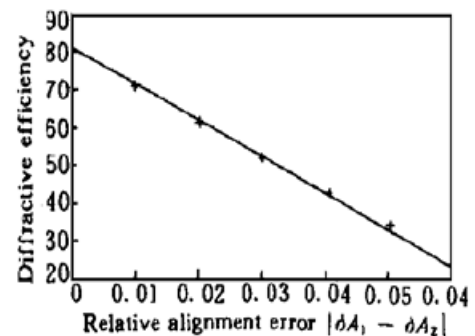
图 6 衍射效率与对位误差的关系曲线

+ : 模拟值; 实线表示经验公式计算曲线

Fig. 6 Curve of diffractive efficiency versus alignment error

+ : represents simulation value;

Real line represents experience formula curve



#### 4 深度误差与对位误差同时对衍射效率的影响

最后,使用模拟软件对深度误差与对位误差同时存在时对衍射效率的影响作了初步的探讨,所表现出的规律与一般二元光学刻蚀深度时一样。即深度误差与对位误差对衍射效率的影响基本上是相互独立的;对位误差对衍射效率的影响比深度误差要严重得多,起主要作用。

由于深度误差与对位误差对衍射效率的影响是相互独立的,也就是说总的衍射效率的下降率是深度误差与对位误差单独存在时衍射效率的下降率之和。因此,可由前面的讨论很容易地导出深度误差与对位误差同时存在时衍射效率经验公式,即

$$\eta = \{1 - [(1 - \eta_D/\eta_0) + (1 - \eta_A/\eta_0)]\} \cdot \eta_0 = \eta_D + \eta_A - \eta_0$$

$$\eta = \eta_0 - C_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n |\delta d_i|\right)^2 - C_2 \cdot \sigma^2 - C_3 \cdot |\delta A_1 - \delta A_2| \quad (3)$$

表 5 模拟方法与经验公式的对比(同时考虑深度与对位误差)

Table 5 Comparison of results of the simulation method and the experience formula

No.	$\delta D$					$\delta A$			D. E	
	$\delta d_1$	$\delta d_2$	$\delta d_3$	$\sum_{i=1}^n  \delta d_i $	$\sigma$	$\delta A_1$	$\delta A_2$	$ \delta A_1 - \delta A_2 $	D. E(%) simulation	D. E(%) experience
1	$\pm 0.05$	$\pm 0.05$	$\pm 0.05$	0.15	0	0	0.01(L)	0.01	54.49	54.87
2	$\pm 0.02$	$\pm 0.02$	$\pm 0.04$	0.08	0.0094	0.01(L)	0.02(L)	0.01	64.22	66.04
3	$\pm 0.01$	0	0	0.01	0.0047	0.01(R)	0	0.01	71.06	71.29
4	$\pm 0.1$	$\pm 0.04$	$\pm 0.01$	0.15	0.0374	0.01(R)	0.04(R)	0.03	35.18	26.66
5	$\pm 0.01$	$\pm 0.03$	$\pm 0.02$	0.06	0.0082	0.02(L)	0.04(L)	0.02	57.01	58.77
6	$\pm 0.02$	$\pm 0.04$	$\pm 0.03$	0.09	0.0082	0.02(L)	0.01(R)	0.03	51.35	45.75

该经验公式与模拟软件对比计算的结果见表 5。表中的数据表明,我们提出的经验公式与模拟计算的结果符合得较好,只是在误差较大时这二者之间才有差异。

### 参 考 文 献

- 1 Wilfrid B. Veldkamp. Overview of microoptics: past, present, future. *Proc. SPIE*, 1991, **1544**: 287~299
- 2 Michael W. Farn, Margaret B. Stern, Wilfrid B. Veldkamp *et al.*. Color separation by use of binary optics. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(15): 1214~1216
- 3 Margaret B. Stern, Shirley S. Medeiros. Deep three-dimensional microstructure fabrication for infrared binary optics. *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 1992, **10**(6): 2520~2525
- 4 徐平,郭履容,郭永康等. 深蚀刻二元光学元件. *光学学报*, 1996, **16**(12): 1796~1801
- 5 徐平,张晓春,郭履容等. 深刻蚀连续浮雕微光学元件衍射分析. *中国激光*, 1996, **A23**(9): 819~823
- 6 徐平,张晓春,周祥等. 二元光学元件制作误差分析与模拟. *光学学报*, 1996, **16**(6): 833~838
- 7 Ping Xu, Xiang Zhou, Xiaochun Zhang *et al.*. Optical perfect shuffle interconnection using computer-generated blazed grating array. *Opt. Rev.*, 1995, **2**(5): 362~365

## Fabrication Errors Simulation of Deep Etched Binary Optics Elements

Xu Ping Tang Jiyue Pang Ling Guo Lürong Guo Yongkang  
(Information Optics Institute of Sichuan University, Chengdu 610064)

**Abstract** In this paper, we investigate and present the law of diffractive efficiency versus fabrication error of deep etched binary optics, and compare differences of the law between the deep etched and the ordinary binary optics technologies. The experience formula, which can better describe the fabrication errors of the deep etched binary optics element, is presented.

**Key words** fabrication errors, computer simulation, deep etch, binary optics element, experience formula