

二元光学元件制作误差分析与模拟*

徐 平 张晓春 郭履容 郭永康 周 祥

(四川大学信息光学研究所, 成都 610064)

杜春雷 周明宝

(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)

摘 要 从标量衍射理论出发, 首先从理论上计算出多台阶二元光学元件发生深度误差时衍射效率的解析式; 然后以 4 台阶和 8 台阶闪耀光栅为例, 对二元光学元件套刻制作中的主要误差及其这些误差之间的相互影响进行了系统的分析和计算机模拟研究, 模拟结果给实际制作提供了重要理论指导和实验参数。

关键词 二元光学元件, 误差分析, 计算机模拟, 深度误差, 对位误差, 闪耀光栅。

1 引 言

本文以 $N = 4$ 和 $N = 8$ 的闪耀光栅为例, 在作者过去制作光学元件的基础上^[1~4], 针对套刻过程中影响元件质量的主要误差, 用解析计算和数值算法进行了深入、系统的研究与模拟。并采用离散傅里叶变换数值算法, 针对各种情形的深度误差与对位误差, 编制了套刻误差模拟软件。作者利用该软件, 将深度误差与对位误差分别计算, 模拟了各次套刻时产生的不同的深度误差(或对位误差), 分步显示每次套刻过程中的元件浮雕形状, 得到深度误差与对位误差单独存在时对衍射效率影响的规律; 同时将各个台阶产生的不同的深度误差和各个掩膜产生的不同的对位误差进行综合计算、模拟, 并显示出蚀刻元件的浮雕图形和参数, 得出这些误差之间相互影响的规律。通过这些分析研究, 得出了套刻误差的系统规律, 这对于实际制作二元光学元件, 具有重要指导意义。

2 二元光学元件制作误差解析分析

严格说来, 二元光学问题尤其是当二元台阶的几何尺度与光波长相当时, 应该用矢量衍射理论求解, 本文为简单起见, 只对低频情形用标量理论进行了讨论。

为讨论方便, 本文用标量衍射理论导出一个周期物衍射效率的表达式: 当一列平面波垂直入射到一个复振幅透过率为 $f(x)$ ($|f(x)| \leq 1$)、周期为 T 的光栅上时, 第 k 级的衍射效率为

* 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、国家自然科学基金和国家教委博士点基金资助项目。

收稿日期: 1994 年 12 月 27 日; 收到修改稿日期: 1995 年 5 月 25 日

$$\eta_k = \frac{1}{T^2} \left| \int_0^T f(x) \exp(-2\pi j k x / T) dx \right|^2 \quad (1)$$

在一个周期内, 纯位相 N 阶二元闪耀光栅的透过率为:

$$f(x) = \sum_{m=1}^N \text{rect} \left(\frac{x - (T + 2mT)/2N}{T/N} \right) \exp(jm\phi) \quad (2)$$

式中 rect 为矩形函数, ϕ 为每相邻两个台阶产生的对光波位相的延迟差, T 为该光栅的周期大小。将(2)式代入(1)式, 并利用 $\sin c(x) = \sin(\pi x)/\pi x$, 则可得到

$$\eta_k = \frac{\sin^2 c^2(k/N) \sin^2 c^2(N\phi/2\pi - k)}{\sin^2 c^2(\phi/2\pi - k/N)} \quad (3)$$

用该式, 可讨论得下列结果:

2.1 理想情形

在理想情形(无制作误差)下, $\phi = 2\pi/N$, 取 $k = 1$, 得 N 阶二元光学元件一级衍射效率为

$$\eta = \sin^2 c^2(1/N) \quad (4)$$

2.2 误差情形

当 $\phi = (2\pi/N) + [(N-1)2\pi\delta d/N]$, $k = 1$ 时, 得到每个台阶深度都产生 δd 的相对误差时, N 阶闪耀光栅的一级衍射效率为

$$\eta(\delta d) = \sin^2 c^2(1/N) \sin^2 c^2[(N-1)\delta d] / \sin^2 c^2[(N-1)/N \delta d] \quad (5)$$

其中 $\delta d = \Delta d/D$, Δd 为绝对深度误差, D 为总的蚀刻浮雕深度。

以上为了数学上的简单起见, 只用解析方法分析了每个台阶深度都产生 δd 的相对误差这种简化情形; 这只是一种简化的模型, 它相当于把各次套刻产生的总的深度刻蚀误差用均匀分布到各个台阶上这样一个简化模型来等效。显然, 它与二元技术套刻产生的槽形有误差。实际制作时, 各个台阶的深度一般是不会相同的。对于各台阶产生不相等的深度误差和对位误差情形, 一般文献认为难以给出其解析式(该问题推导较复杂, 作者将在另文详细讨论)。

3 二元光学元件制作误差的计算机模拟研究

通过分析可知, 在实际套刻制作光学元件工艺中, 由于套板而带来的误差主要有深度误差和对位误差。针对这两种误差, 作者编制了误差分析模拟软件。该软件界面友好, 只需输入样点数(本文使用 8192 个样点数)、各次套刻时产生的相对深度误差和对位误差, 即可模拟出相应情形的元件表面浮雕槽型; 若输入一组套刻刻蚀误差, 就可自动绘出衍射效率曲线及相应的一组浮雕槽形图, 并可自动给出由不同的套刻深度误差和对位误差而带来的各个台阶的误差数据。利用该软件, 首先分别讨论深度误差和对位误差对衍射效率影响的规律; 其次研究它们之间的相互影响; 最后将数值解法与解析解法计算的相应结果进行对比, 得出二元光学元件制作误差的系统规律。

3.1 深度误差对衍射效率的影响

在研究深度误差规律时, 设对位误差为零。分别对 4 阶和 8 阶闪耀光栅进行模拟计算。图 1 和表 1 分别是 4 阶和 8 阶闪耀光栅深度误差进行模拟计算的结果。

从表 1 和图 1 的结果进行仔细分析, 可以看出深度误差对衍射效率影响具有如下规律:

1) 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。由图 1 的左右对称性很容易说明这一点。

Table 1. Date on depth error of 8-step blazed grating

No.	δd_1	δd_2	δd_3	D. E (%)	relative decreas
1	0.3	0	0	43.76	53.92
2	0	0.3	0	43.76	53.92
3	0	0	0.3	43.76	53.92
4	0.1	0.1	0.1	75.48	20.51
5	-0.1	0.1	-0.1	75.48	20.51
6	0.15	0.1	0.05	72.45	23.70
7	0.05	0.1	0.15	72.45	23.70
8	-0.15	0	0.15	66.91	29.54
9	0.2	0.075	0.025	65.83	30.67

Relative decrease means the diffraction efficiency ratio (%) in case of with and without errors

$\dots, \delta d_n$ }, 模拟实验表明: 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, 仅与各组合内各分量的大小有关; 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。例如, 取 $\delta D = 0.1$, 则有无穷多组 δd_1 和 δd_2 , 这里取 $\delta d_1 = 0, \delta d_2 = 0.1$ 和 $\delta d_1 = 0.05, \delta d_2 = 0.05$ 两种情形, 由图 1 显然可知, 这两组取值所对应的衍射效率, 后者在曲线 B 上为 78.8%, 比前者的衍射效率(在曲线 A 上为 76.6%)要大。

3) 很显然, 深度误差的改变对衍射效率的影响并非是线性关系。在图 1 中 δd_2 的取值是等间隔的(为 0.05), 但 A、B、C 三条曲线之间对应点的衍射效率却明显的等间距。

对位误差对衍射效率的影响复杂, 作者对 4 阶和 8 阶情形分别讨论。

3.2 N=4 时对位误差对衍射效率的影响

这时只有 2 个掩膜, 仅可能发生一次对位误差, 它对衍射效率影响如图 2 所示, 具有如下规律:

1) 衍射效率随对位误差值的增加而降低, 与对位误差的偏向(左偏或右偏)无关;

2) 衍射效率随对位误差绝对值的增加基本上呈线性减少趋势。

3.3 N=8 时对位误差对衍射效率的影响

当 $N=8$ 时, 有 3 个掩膜, 就有可能发生两次对位误差, 即掩膜 2 与掩膜 1 之间的对位误差 δA_1 和掩膜 3 与掩膜 2 之间的对位误差 δA_2 。它们对衍射效率的影响与 δA_1 和 δA_2 的大小及偏向都有关, 情况比较复杂。作者通过大量的模拟计算, 得出其中有代表性的数据绘制成图 3。图 3 中没有标明 δA_1 的偏向, 这是因为实际上取 δA_1 的左偏和右偏时, 计算结果非常接近。

由图 3 可分析得到如下 8 阶情形的对位误差规律:

1) δA_1 的大小比 δA_2 对衍射效率的影响更大, δA_1 愈大衍射效率愈小; 但 δA_1 的偏向基本不影响衍射效率。

如图 3(a), 取 $\delta A_1 = 0.01, \delta A_2 = 0.02 (R)$, 相应的衍射效率(在曲线 C) 为 80%; 反之,

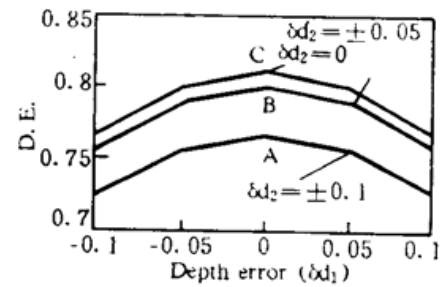


Fig. 1 4-step depth error

2) n 个掩膜套刻 n 次, 产生 n 次(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 δD , 可以有无穷多组 $(\delta d_1, \delta d_2,$

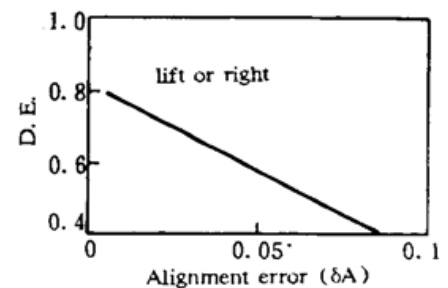


Fig. 2 4-step alignment error

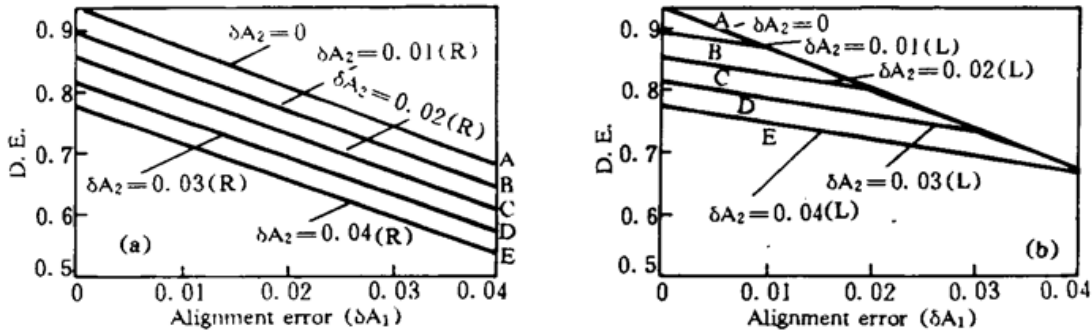


Fig. 3 8-step alignment error

(a) Mask 3 misalign toward right, (b) Mask 3 misalign toward left

若取 $\delta A_1 = 0.02$, $\delta A_2 = 0.01 (R)$, 相应的衍射效率(在曲线 B) 则为 77%, 因此说 δA_1 的大小比 δA_2 对衍射效率的影响更大。图 3(b)的情况也一样。

2) δA_2 的偏向会影响衍射效率; 无论 δA_1 偏左或偏右, δA_2 偏左比偏右对衍射效率影响小一些。作者认为, 这是因为闪耀光栅浮雕槽型不对称的原因。

在图 3(b)中取 $\delta A_1 = 0.01$, $\delta A_2 = 0.02(L)$, 相应的衍射效率(在曲线 C) 为 84%, 比取 $\delta A_1 = 0.01$, $\delta A_2 = 0.02(R)$ 的衍射效率 80% 要大。

3) 对于一个取定的总的(相对)对位误差 $\delta A = \delta A_1 + \delta A_2$, 当 δA_2 右偏时, 无论 δA_1 偏左或偏右, 总是 δA_1 愈大(δA_2 愈小), 则衍射效率愈小(如图 3(a) 所示); 而当 δA_2 左偏时, δA_1 和 δA_2 对衍射效率的影响如图 3(b) 所示, 也可进一步将图 3(b) 的规律总结如表 2:

Table 2. Mask 3 misalign toward left

D. E.	δA_1		δA_2	
	numerical value	deviation direction	numerical value	deviation direction
large	$\delta A_1 = \delta A_2$	L or R	$\delta A_2 = \delta A_1$	L
middle	$\delta A_1 < \delta A_2$	L or R	$\delta A_2 > \delta A_1$	L
litter	$\delta A_1 > \delta A_2$	L or R	$\delta A_2 < \delta A_1$	L

例如, 取总的对位误差 $\delta A = 0.04$, 任取几组 $\delta A_1, \delta A_2$:

$\delta A_1 = 0.02, \delta A_2 = 0.02 (L)$, 相应的衍射效率为 81%;

$\delta A_1 = 0.01, \delta A_2 = 0.03(L)$, 相应的衍射效率为 80%;

$\delta A_1 = 0.03, \delta A_2 = 0.01 (L)$, 相应的衍射效率为 75%;

显然与表 2 的规律一致。

4) 当 δA_1 或 δA_2 两者中有一个为 0 时, 此时衍射效率仅由另一个的大小决定而与其偏向无关。如图 3(a)、图 3(b) 中的曲线 A, 此时与 4 阶情形(如图 2 所示)一致。

3.4 深度误差与对应误差之间的相互影响

为了绘制曲线简单、清楚和便于比较起见, 这里绘制了 4 阶闪耀光栅同时产生深度误差与对位误差时对衍射效率影响的关系曲线, 如图 4 所示。大量模拟计算得到:

1) 深度误差与对位误差对衍射效率影响基本上是相互独立的;

2) 对位误差对衍射效率的影响比深度误差要严重的多, 起主要作用。

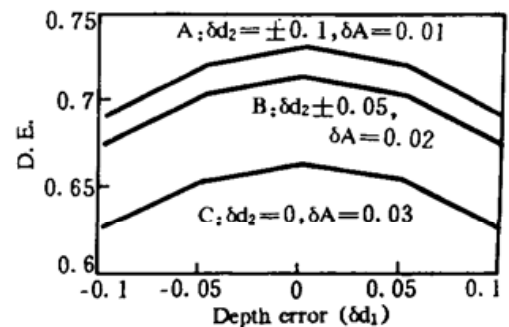


Fig. 4 Interaction of depth and alignment error

图 4 是在图 1 的基础上再分别加上对位误差 $\delta A = 0.01$ 、 0.02 和 0.03 ，从图 4 和图 1 的几何图形不变，说明对位误差的加入不影响深度误差的规律；图 4 和图 1 中 A、B、C 三条曲线的位置变换，表明对位误差比深度误差对衍射效率的影响要严重的多。

3.5 数值解法与解析解法结果对比

图 5 是解析法与数值法计算结果的对比。由“-”和“+”号绘制的曲线分别表示解析结果和模拟结果。上面一组(A)和下面一组(B)分别对应 8 阶和 4 阶情形。由此可算出用数值解法与解析解法所得出的深度误差对衍射影响两条曲线之间的均方差(RMS)为：

A. 对 $N = 8$, $RMS = 1.9\%$; B. 对 $N = 4$, $RMS = 6.3\%$

因此，模拟结果与解析计算很接近，说明模拟程度精度高，所得出的上述结论是可靠的。最后给出如图 6、图 7 和图 8 所示的几种情形所刻蚀元件表面的浮雕图形。

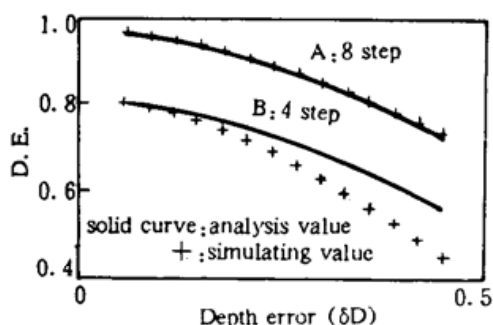


Fig. 5 Comparison between analytic and numerical method

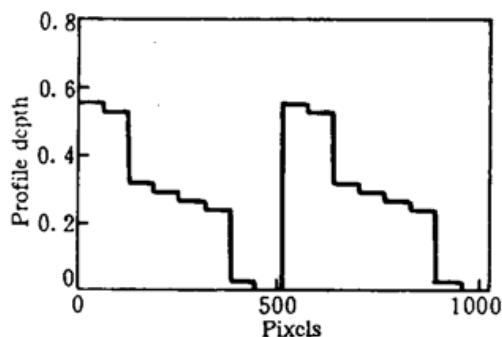


Fig. 6 Profiles on occurrence of depth error

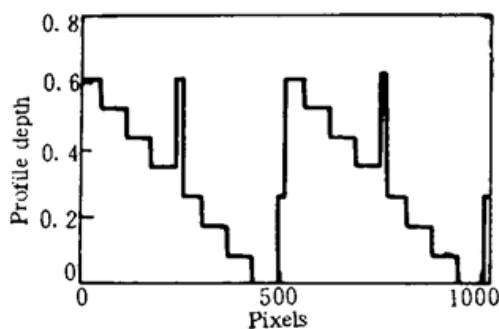


Fig. 7 Profile on occurrence of alignment error

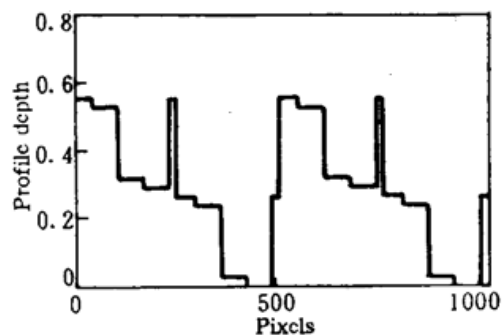


Fig. 8 Profile on occurrence of depth and alignment error

这三幅图纵坐标的单位是 μm 。图 6 中只有深度误差，其大小为 $\delta d_1 = -0.1$ ， $\delta d_2 = 0.1$ ， $\delta d_3 = -0.1$ ，衍射效率为 75.48%，相对减少了 20.5%；图 7 中只有对位误差，其大小为 $\delta A_1 = 0.03(L \text{ 或 } R)$ ， $\delta A_2 = 0.03(L)$ ，衍射效率为 74.18%，相对减少了 22%；图 8 是上述深度误差和对位误差同时发生的情形，此时衍射效率为 57.7%，相对减少了 39.3%。

4 讨论和结语

通过以上对套刻误差的讨论分析，给实际制作提供了指导意见：

1) 对位误差是关键，为了要尽可能地减小对位误差。假如在氮化硅薄膜(折射率一般为 1.9)上，对波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 制作一个周期 $P = 50 \mu\text{m}$ (即空间频率为 20 lp/mm)的 4 阶闪耀光栅，欲使衍射效率达到 60% 以上，若允许 10% 的深度误差(相应的深度绝对误差 $\Delta d = D\delta d = 0.07 \mu\text{m}$)，相对对位误差需要保证 3%，或者绝对对位误差 $\Delta A = P\delta A = 1.5 \mu\text{m}$ 。实际制作

时, 因为氮化硅薄膜的反应离子蚀刻速率一般为 $0.03 \mu\text{m}/\text{min}$, 比较容易控制蚀刻深度; 相比之下, $1.5 \mu\text{m}$ 的对位精度则不易达到。因此, 对位技术是关键。

2) 实际制作中, 应当注意套刻时怎样使其达到最小。比如, 要避免偶尔出现一个较大的误差使均方差增大, 从而减小衍射效率; 从 3.3 1) 的结论可知, 在 8 阶(3 个掩膜)元件套刻时, 尤其要注意控制第二个掩膜的对位误差 δA_1 , 使它最小; 又从 3.3 2) 的结论, 对于象闪耀光栅这样不对称槽型元件, 应尽量避免出现第三个掩膜偏右(δA_2 偏右)的情形。

3) 由图 5 上面一组 A 曲线可看出, 在 8 阶情形数值解法与解析解法所得出的深度误差对衍射影响两条曲线非常接近; 而在 4 阶情形下面一组 B 曲线时, 这两条曲线之间的差别则随着总的深度误差 δD 的增加而加大, 该结果表明在台阶数较多时, 本文解析法所用的简化模型是可行的; 而当台阶数较少或总的深度误差 δD 较大的, 这种简化模型就会带来较大的偏差。

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很大, 本文对此进行了较深入的系统的研究。用所编制的模拟软件计算了 4 阶和 8 阶闪耀光栅, 得出了各台阶深度误差及其它们的分布、各掩膜对位误差的大小及其偏向等因素对衍射效率影响的系统规律; 并将模拟结果与用解析法(5)式计算出的相应等效情形进行了比较, 两种解法计算结果之间的均方根差小于 1.9%, 这表明该模拟软件精度较高, 其模拟结论给实际制作提供了参数, 节省大量财力和时间, 具有指导意义。该软件进一步完善和充实之后, 可作为二元光学元件设计软件中的一个误差分析模块。

参 考 文 献

- [1] Ping Xu, Xiang Zhou, Xiaochun Zhang *et al.*, Optical perfect shuffle interconnection using computer-generated blazed grating array. *Optical Review*, 1995, 2(5): 362~365
- [2] Lurong Guo, Xiaoxue Cheng, Yongkang Guo *et al.*, Fabricating blazed grating on NGD by photochemical etching. *Chinese Journal of Lasers*, (English Edition), 1992, 1(4): 361~365
- [3] Lurong Guo, Xiaoxue Cheng, Yongkang Guo *et al.*, A new method of making HOE by copying CGH on NGD. *Proc. SPIE*, 1991, 1555: 300~303
- [4] Ping Xu, Yongkang Guo, Xiang Zhou *et al.*, New diffractive element. 17th Congress of the International Commission for Optics, Taejon, Korea, 1996

Fabrication Errors Analysis and Simulation of Binary Optical Element

Xu Ping Zhang Xiaochun Guo Lurong Guo Yongkang Zhou Xiang

(Information Optics Institute, Sichuan University, Chengdu 610064)

Du Chunlei Zhou Mingbao

(The State Laboratory for Optical Technologies on Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

(Received 27 December 1994; revised 25 May 1995)

Abstract In this paper, the analytic expression of diffraction efficiency corresponding to the mask etch-depth errors is deduced from the scale diffraction theory. Choosing 4-step and 8-step blazed grating as an example, we simulated systematically main registering-etch errors and their interactions of binary optical element using computer. The results of computer simulation agree well with that of the analytic method. It can provide theoretical basis and experiment parameter for practical fabrication.

Key words binary optical element, error analysis, computer simulation, depth error, alignment error, blazed grating.