

深蚀刻二元光学技术制作准分子曝光系统均匀器*

徐 平 李景镇

(深圳大学科技研究院光电子技术工程系, 深圳 518060)

摘要 利用深蚀刻二元光学理论和技术设计并制作了用于准分子激光器曝光系统的深蚀刻二元光学均匀器. 与原来使用的积分均匀器(石英棒列阵)相比, 该均匀器具有重量轻, 安装调控方便, 光能利用率高, 光束均匀性好等特点. 对该器件的设计性能和参数进行了研究、分析和计算机模拟; 在高精度台阶仪上对所制作的深蚀刻二元光学均匀器进行了精密检测; 用深蚀刻元件制作误差理论并引入“边界误差”概念, 对元件的表面浮雕检测结果进行了深入的分析. 理论与实验结果符合得很好.

关键词 深蚀刻 二元光学 元件 均匀器 误差分析

在大规模集成电路中, 光刻分辨率是决定曝光系统性能的关键因素, 不断提高光刻分辨率一直是人们追求的目标. 由 Reyleigh 分辨率公式, 光学光刻分辨率 R 与使用波长 λ 和数值孔径 NA 的关系为 $R = C \cdot \lambda / NA$, 其中条件系数 C 与照明均匀性、部分相干系数、光学像质以及工艺参数等有关. 由于有效线宽是物强度的函数, 因而照明均匀性是影响 C 的最基本因素. 另一方面, 照明系统像面(掩模面)的光能分布均匀性直接影响感光面上的光能分布, 由此决定着制作元件的质量, 因此曝光系统中光能分布均匀性是很重要的.

在曝光照明系统中, 均匀器是关键元件, 目前一般采用积分均匀器、楔形棱镜组均匀器、光学隧道均匀器等. 由于受其制作方法的限制, 这些均匀器不同程度地存在结构复杂、体积较大、耗材多、填充因子不够高、调整控制不易、难以大规模批量生产等缺点. 鉴于此, 寻找新的制作方法与技术或许是改善均匀器质量的有效途径.

近年来, 在光学领域出现了一个新兴的分支学科——二元光学, 它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他器件不可比拟的特点. 为了有效克服上述困难, 进一步提高均匀器的均匀效果, 本文利用我们在目前一般二元光学技术的基础上发展的深蚀刻二元光学理论和技术^[1~3], 设计并制作了用于准分子激光器的深蚀刻二元光学均匀器. 与原来使用的积分均匀器(石英棒列阵)相比, 该均匀器具有重量轻、调控灵巧方便、填充因子 100%、光能利用率高、光束均匀性好、便于大规模生产等系列特点.

1 元件设计与模拟

1.1 KrF 准分子激光照明系统

图1是准分子激光均匀照明系统工作原理示意图。由激光器发出的光束经楔形棱镜分成上下两束,然后叠加,经扩束器后成为平行光束。在积分透镜前表面处光能量上下均匀;经过积分透镜后在其后端形成 $N \times N$ 个小光源的像,最后由场镜把每一小光源的像成到物镜的入瞳处,使从每个小“光源”发出的光线在照明系统的出瞳处(掩模面)的整个视场内形成均匀分布,所有的小“光源”都如此叠加,从而在掩模面上实现均匀分布光场。

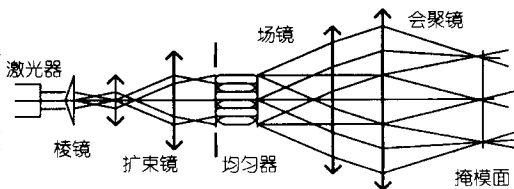


图1 KrF 准分子激光均匀照明系统工作原理示意图

1.2 二元光学均匀器设计参数与性能

二元光学技术是利用计算全息方法与大规模集成电路技术和微细加工技术相结合,在任意片基材料上制作出位相深度为 2π 的、多台阶微浮雕结构的衍射微光学元件。深蚀刻二元光学技术^[1],是在目前一般二元光学技术基础上发展的一种新颖的、蚀刻位相深度超过 2π 的、具有高深度比的(aspect-ratio)二元光学技术。尤其在制作 FAST 宽带微透镜列阵(fast broadband microlens array)、分色光学(color separation optics)、焦平面微透镜列阵等方面有特殊用途。本文为了改善上述积分透镜性能,利用该技术设计一个由填充因子为 100% 的二元微 Fresnel 透镜列阵组成的均匀器,该列阵无死区,光能利用率极高。其示意图如图2。考虑到所设计出的均匀器有实际用途¹⁾,二元光学均匀器的参数作如下选择:

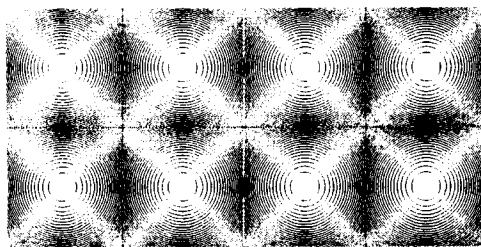


图2 均匀器平面图

孔径	30 mm × 30 mm
焦距	15.9 mm
使用波长	248 nm
台阶数	8
列阵数	80 × 80
每个单元的环带数	4.5
每个单元的孔径	0.375 mm × 0.375 mm

现对上面设计的深蚀刻二元光学均匀器的性

能简要讨论如下:

轻便灵巧 很显然,用二元光学技术制作的微透镜列阵均匀器,重量轻,体积小,厚度薄,便于安装和调整,也有利于计算机对该器件的智能化控制,同时还可大幅度节约石英材料。

光能利用率高 该列阵的填充因子为 100%,无死区,因此光能量利用率极高。

光束均匀性好 由前面对 KrF 准分子激光照明系统中均匀器的工作原理分析,由于均匀器列阵中每一个单元的光束都参与了照明系统的出瞳处(掩模面)的整个视场内均匀光场的叠

1) 该均匀器是针对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的 KrF 准分子激光照明系统中的技术要求设计的

加,显然,列阵的单元数越多,参与叠加的光束越多,光场的均匀性就越好.因此,这里设计的 80×80 的微透镜列阵与原来使用的 9×9 棒状阵列相比,会使该照明系统的均匀性提高许多倍.

当然,列阵数目不能无限增加,这要受系统相对孔径要求的限制.该列阵元件每个单元相对孔径为 $(D/f) = 0.023\ 6$,比系统要求的相对孔径(0.014)要大,满足相对孔径的要求.

提高制作精度 根据文献[1]的讨论,该列阵元件的最小间隔(即最外带半径间隔)为

$$\Delta r_{\min} = R - \sqrt{R^2 - 2\lambda f/L}, \quad (1)$$

由于 $R = \sqrt{2} \times 0.375/2\ \text{mm}$, $\lambda = 2.48 \times 10^{-4}\ \text{mm}$, $F = 15.9\ \text{mm}$, $t = 2$, $L = 8$,因此

$$\Delta r_{\min} = \frac{\sqrt{2} \times 0.375}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2} \times 0.375}{2}\right)^2 - 2 \times 2.48 \times 10^{-4} \times 15.9 \times 2/8} = 0.003\ 77\ (\text{mm}).$$

上式中在计算焦距时利用了深蚀刻元件的焦距缩短效应^[1],即实际焦距 $F = f/t$,从而设计焦距 $f = t \cdot F = 2 \times 15.9\ \text{mm}$.如果不采用深蚀刻技术,则将 $f = 15.9\ \text{mm}$ 代入(1)式,得相应列阵元件的最小间隔则为 $0.001\ 866\ \text{mm}$.就目前光刻水平而言,在很普通的曝光机上就可较容易刻好 $3.7\ \mu\text{m}$ 的线宽,而要曝好 $1.8\ \mu\text{m}$ 的线条,则对实验条件要求相对苛刻一些.最小线宽大一些,从而使得相对对位误差减小,由文献[2]的讨论可知,对位误差是制作技术中的关键,因此采用深蚀刻方法进行设计,可以提高制作精度.

次焦点光能的利用 由文献[1]的讨论可知,由于采用深蚀刻技术,在台阶数不大时,主焦点的光能量中有少部分转移到次焦点上,而使主焦点的衍射效率略有下降.由衍射理论可知,这些次焦点的孔径角比主焦点的要大^[1],结合上面讨论的均匀器的工作原理(图 1),这些次焦点所产生的衍射光线,除了射到出瞳口径之外的部分光线,其余全部充满整个出瞳面.这样一方面使均匀器的均匀效果更好,另一方面使理论上降低了的衍射效率又得以部分补偿,使得实际工作的均匀器的衍射效率有可能高于这个理论值.因此,在所设计的深蚀刻二元光学均匀器中,次焦点的出现除了很少部分能量损失外,对系统几乎无其他干扰.由此可见,采用深蚀刻技术设计制作的二元光学均匀器用于曝光照明系统,充分地应用了深蚀刻元件的优良特性,同时较好地克服了前面讨论的深蚀刻技术可能带来的效率下降问题,有其突出的独特优点,是深蚀刻技术合理应用的成功例子.

1.3 二元光学均匀器焦平面模拟

对上面设计的均匀器,采用数字离散技术,对均匀器焦平面(相当于图 1 中积分透镜后端面处的位置)上的光能分布进行计算机模拟,初步考查该器件的性能.图 3(a)是该器件的表面浮雕结构局部图,图 3(b)则是根据图 3(a)计算出的该均匀器焦面上的光能量分布,图 3(c)和 3(d)是相应的剖面图.显然,模拟结果表明设计参数令人满意.

2 元件制作与检测

2.1 套刻掩模的设计与制作

根据上面给出的均匀器的设计参数,为了套刻制作需要,还应设计出相应的一套套刻掩模.根据深蚀刻二元光学元件理论^[1],

$$r_1 = \sqrt{2\lambda f},$$

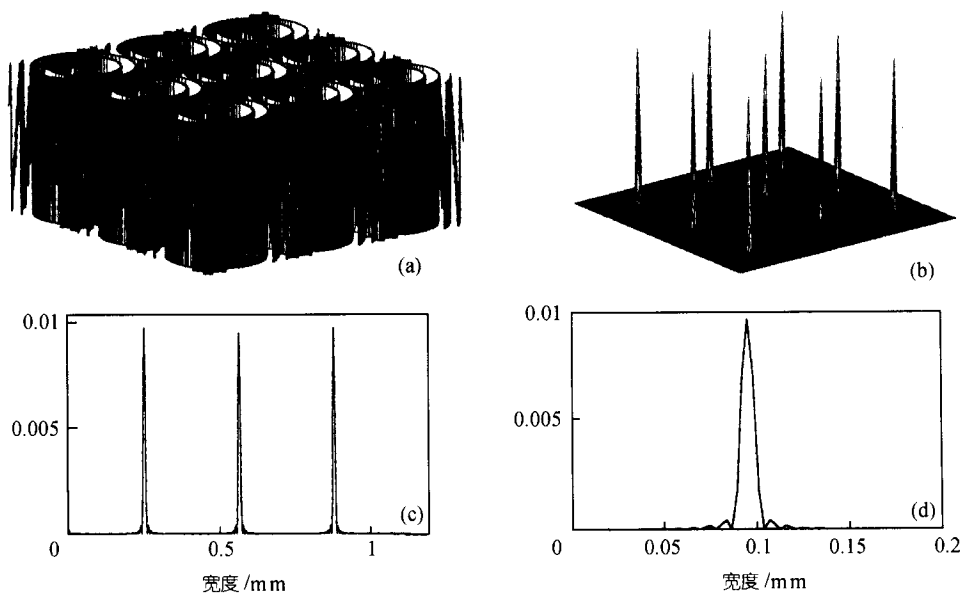


图 3 均匀器模拟结果

(a) 表面浮雕轮廓,(b) 焦平面强度分布,(c) 部分剖面图,(d) 中心斑剖面图

$f = t \cdot F$,
 $L = 2^S \quad (S = 1,2,3,\cdots)$,
 $r_{m,l} = r_1 \cdot \sqrt{(m-1) + l/L} \quad (m = 1,2,\cdots,M; l = 1,2,\cdots,L)$,
 M 是主带数, L 是量化台阶数, S 是掩模数量. 这里取 $M = 4.5$, $t = 2$, 则 $f = t \cdot F = 2 \times 15.9$ mm, 将 $S = 1,2,3$ (相应的 $L = 2,4,8$) 分别代入上式, 则可计算出 3 组半径值, 这就是所设计的 3 幅掩模图的数据. 该掩模版各环带的详细数据如表 1.

表 1 二元 Fresnel 透镜套刻掩模版数据(单位: mm)

		$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$	$l = 4$	$l = 5$	$l = 6$	$l = 7$	$l = 8$
掩模 1	$m = 1$	0.088 8	0.125 6						
	$m = 2$	0.153 8	0.177 6						
	$m = 3$	0.198 6	0.217 5						
	$m = 4$	0.235 0	0.251 2						
	$m = 5$								
掩模 2	$m = 1$	0.062 8	0.088 8	0.108 8	0.125 6				
	$m = 2$	0.140 4	0.153 8	0.166 1	0.177 6				
	$m = 3$	0.188 4	0.198 6	0.208 3	0.217 5				
	$m = 4$	0.226 4	0.235 0	0.243 2	0.251 2				
	$m = 5$	0.258 9							
掩模 3	$m = 1$	0.044 4	0.062 8	0.076 9	0.088 8	0.099 3	0.108 8	0.117 5	0.125 6
	$m = 2$	0.133 2	0.140 4	0.147 3	0.153 8	0.160 1	0.166 1	0.172 0	0.177 6
	$m = 3$	0.183 1	0.188 4	0.193 5	0.198 6	0.203 5	0.208 3	0.212 9	0.217 5
	$m = 4$	0.222 0	0.226 4	0.230 7	0.235 0	0.239 1	0.243 2	0.247 2	0.251 2
	$m = 5$	0.255 1	0.258 9	0.262 7					

由以上掩模的设计数据, 绘出的 3 幅二元掩模如图 4 所示. 该图应该是 80×80 的列阵, 这里只画出了其中的一部分.

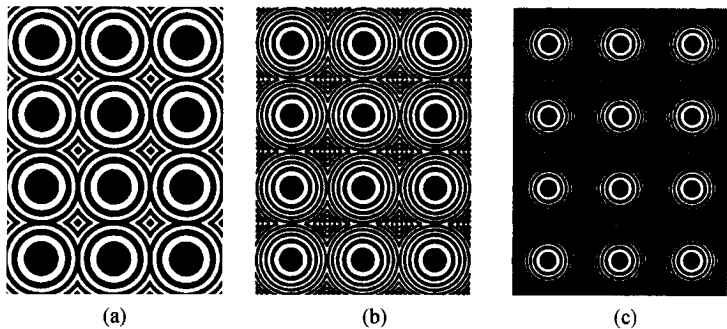


图 4 掩模图
(a) 掩模 1, (b) 掩模 2, (c) 掩模 3

2.2 光刻与蚀刻

现在利用这套掩模版,采用本文提出的深蚀刻技术来制作所设计的二元光学均匀器. 首先采用 S9912 胶在 KW-4 型匀胶台上制备石英衬底光刻胶版;然后用接触法在国产 H94-17 型 $\varnothing 100$ 大面积曝光机上光刻,显影、坚膜后在 ME-3 型多功能磁增强反应离子刻蚀机上蚀刻,分别使用掩模 1,掩模 2 和掩模 3,这样重复光刻和蚀刻 3 次,最后就在石英片基上得到所需的二元光学元件(光刻、蚀刻过程见图 5).



图 5 光刻与反应离子蚀刻过程

在开始使用第 2 块掩模版光刻时,就会出现对位问题. 由文献 2 的讨论可知,对位误差是影响元件性能的关键因素,因此,在掩模上设计对位标记的技巧性不容忽视,这样可以将对位误差控制在最小值.

2.3 元件性能检测

二元光学元件是浮雕调制的衍射元件,表面浮雕结构是决定元件性能的关键因素. 现对所制作出的元件表面浮雕结构进行检测. 图 6 是所制作均匀器的表面轮廓不同位置处的局部照片.

图 7(a)是在测量精度可达纳米量级的 Alpha-Step 500 型台阶仪(美国产)上测量出的该元件的表面浮雕结构图. 图 7(b)是另一块有较大对位误差均匀器的浮雕结构图. 为了定量分析制作元件的质量,对图 7(b)所示的均匀器表面浮雕轮廓图的 8 个台阶尺寸作了精确测量,并将这些台阶的设计值和检测数据同时列于表 2 中以便分析比较.

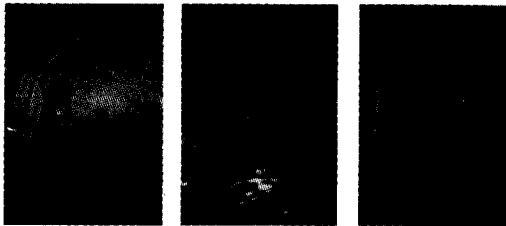


图 6 均匀器表面照片

3 元件质量分析

从 Alpha 台阶仪上测量出的表面浮雕结构图 7(a)来看,制作该元件时对位误差控制得较好. 下面将应用文献[2]提出的误差分析理论对表面轮廓稍差一些的另一块均匀器(如图 7(b))的制作质量进行分析.

表 2 均匀器浮雕结构设计值与测量数据(对应图 7(b))

宽度数据				深度数据			
宽度	设计值 / μm	实验值 / μm	绝对误差 / μm	深度	设计值 / μm	实验值 / μm	绝对误差 / μm
$w_1/2$	44.4	41.1	-3.3	h_1	0.122	0.1389	0.0169
w_2	18.4	17.75	-0.65	h_2	0.122	0.1263	0.0043
w_3	14.1	13.2	-0.9	h_3	0.122	0.1321	0.0101
w_4	11.9	11.64	-0.26	h_4	0.122	0.1167	-0.0053
w_5	10.5	8.4	-2.1	h_5	0.122	0.1363	0.0143
w_6	9.5	9.4	-0.1	h_6	0.122	0.1183	-0.0037
w_7	8.7	7.81	-0.89	h_7	0.122	0.1342	0.0122
w_8	8.1	7.9	-0.2				
W	125.6	117.2	-8.4	H	0.854	0.9028	0.0488

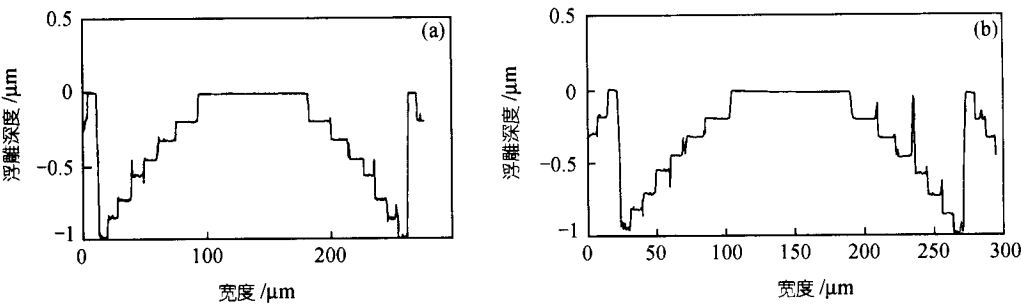


图 7 均匀器表面浮雕轮廓(a)和具有较大对位误差均匀器的表面浮雕轮廓(b)

3.1 深度误差的影响

按二元光学元件套刻特点,无论有否蚀刻误差,八个台阶中的 h_1, h_3, h_5, h_7 四个深度应该是相等的. 但从表 2 中可以看出,这四个值只是很接近,而并不相等. 为解释这种现象,可作如下分析.

由图 8 所示的一般二元光学元件套刻工艺,先来研究一下各台阶深度与每次套刻误差之间的关系. D_1, D_2, D_3 是 3 个掩模依次套刻时的刻蚀深度, $\Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3$ 则是相应的深度误差, $h_1, h_2, \cdots, h_7$ 分别是 8 个台阶的深度, h_0 是每个台阶的设计深度. 根据图 8 所示的二元光学刻蚀规律,可以得到

$$D_1 = 4h_0 + \Delta d_1, D_2 = 2h_0 + \Delta d_2, D_3 = h_0 + \Delta d_3,$$
$$h_1 = D_3 = h_0 + \Delta d_3,$$
$$h_2 = D_2 - D_3 = h_0 + \Delta d_2 - \Delta d_3,$$
$$h_3 = D_3 + \zeta_2 = h_0 + \Delta d_3 + \zeta_2,$$
$$h_4 = D_1 - h_1 - h_2 - h_3 = h_0 + \Delta d_1 - \Delta d_2 - \Delta d_3 - \zeta_2,$$
$$h_5 = D_3 + \zeta_3 = h_0 + \Delta d_3 + \zeta_3,$$
$$h_6 = (D_2 + \zeta_1) - h_5 = h_0 + \Delta d_2 - \Delta d_3 + \zeta_1 - \zeta_3,$$
$$h_7 = D_3 + \zeta_4 = h_0 + \Delta d_3 + \zeta_4,$$

其中 $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ 称作边界误差,是 4 个很小的深度误差,它们描述处于不同平面上的各台阶由于边界条件不同,在相同的时间内产生不同的刻蚀深度. 一般情形下可忽略不计.

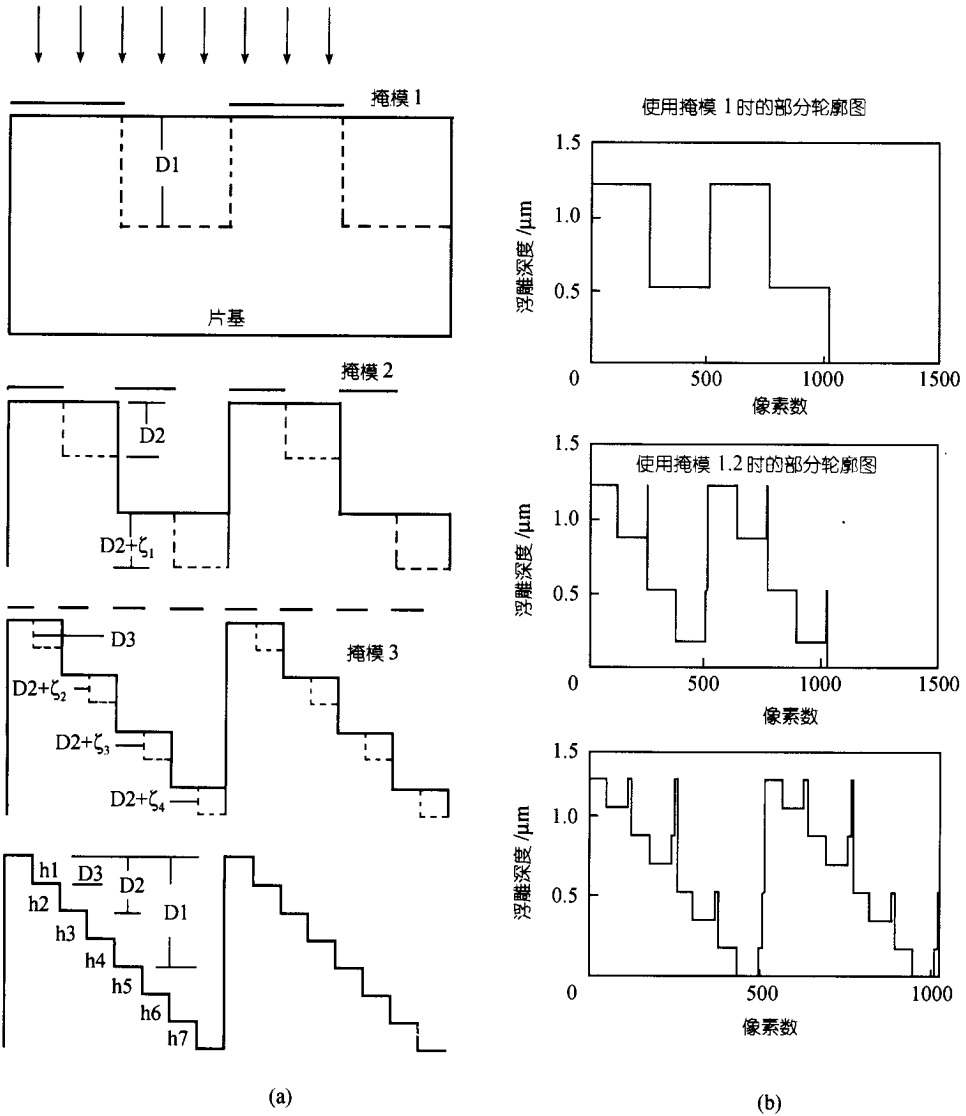


图 8 套刻二元光学元件深度误差(a)和对位误差产生过程(b)

将表 2 中 $h_1, h_2, \dots, h_7$ 的 7 个值分别代入(4)~(10)式中,则可依次算出 $\Delta d_3, \Delta d_2, \zeta_2, \Delta d_1, \zeta_3, \zeta_1$ 和 ζ_4 的值分别为

$$\Delta d_1 = 0.026 \mu\text{m}, \Delta d_2 = 0.0212 \mu\text{m}, \Delta d_3 = 0.0169 \mu\text{m}, \quad (11)$$

$$\delta d_1 = \Delta d_1 / D_0 = 3.04\%, \delta d_2 = \Delta d_2 / D_0 = 2.48\%, \delta d_3 = \Delta d_3 / D_0 = 1.98\%, \quad (12)$$

$$\zeta_1 = -0.0106 \mu\text{m}, \zeta_2 = -0.0068 \mu\text{m}, \zeta_3 = -0.0026 \mu\text{m}, \zeta_4 = -0.0047 \mu\text{m}. \quad (13)$$

从数值上来看,这些 ζ 的值比 Δd 的值小很多,与预计的情形一致;另外值得注意的是,所有 ζ 均为负值,这至少表明处于较深几个台阶比表面台阶的刻蚀速率要稍慢一点; ζ_1 的绝对值比 $\zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ 大得多,而 $\zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ 相差不大,这说明台阶深度差越大,对该台阶向下刻蚀速率的影响越大。导致上述现象的原因可能是因为与表面位置相比,在较深的位置处,被溅射出

的废物及反应废气中有部分未来得及抽走而污染反应表面的几率稍大一点,由于这些污染造成表面的淀积物从而影响反应刻蚀继续进行,最终导致刻蚀速率有所下降.

将上面测量结果得出的(12)式的3个掩模的深度误差数据代入到文献[2]中给出的经验公式中,

$$\eta_D = \eta_0 - C_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n |\delta d_i| \right)^2 - C_2 \cdot \sigma^2, \quad (14)$$

其中 $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (|\delta d_i| - \overline{\delta d})^2 / n}$, $\overline{\delta d} = \sum_{i=1}^n |\delta d_i| / n$, $\eta_0 = 81.06\%$, $C_1 = 769$, $C_2 = 6\ 012$. 由此可以得到仅仅考虑深度误差后,该元件的衍射效率为 $\eta_0 = 76.45\%$.

3.2 对位误差的影响

对图 7(b)进行仔细分析可知,造成这种结果是由于两个掩模对位时都发生了向左的偏移. 其形成过程如图 8(b)所示. 从对位误差的角度来看,因掩模 2、掩模 3 的对位误差对台阶 2,4,6,8 的宽度无影响,但使台阶 1,3,5,7 的宽度变成

$$w'_1 = w_1 - (\Delta A_1 + \Delta A_2), \quad (15)$$

$$w'_3 = w_3 - (\Delta A_2 - \Delta A_1), \quad (16)$$

$$w'_5 = w_5 - (\Delta A_1 + \Delta A_2 - \Delta A_1), \quad (17)$$

$$w'_7 = w_7 - (\Delta A_2 + \Delta A_1), \quad (18)$$

其中 w_1, w_3, w_5, w_7 为台阶的设计宽度. 将这几式对照表 2 和图 7(b)分析可知,实际上第 2 个台阶凸出部分的宽度就是 $\Delta A_2 - \Delta A_1$,第 4 个台阶上凸出部分底部的宽度是 $\Delta A_2 - \Delta A_1$ 与 ΔA_1 之和(即 ΔA_2),上部的宽度是 ΔA_1 . 因此 $\Delta A_1 = 1.2\ \mu\text{m}$, $\Delta A_2 = 2.1\ \mu\text{m}$ (附带说明一下,对位造成 8 个台阶总的宽度误差是 $7.2\ \mu\text{m}$,还有 $1.2\ \mu\text{m}$ 是线宽等其他误差造成的),从而

$$\delta A_1 = \Delta A_1 / w_0 = 1.2 / 125.6 = 0.009\ 6(\text{L}), \delta A_2 = \Delta A_2 / w_0 = 2.1 / 125.6 \approx 0.017(\text{L}), \quad (19)$$

将这个测量结果代入到下面的经验公式^[2]中,

$$\eta_A = \eta_0 - C_3 |\delta A_1 - \delta A_2|, \quad C_3 = 956, \quad (20)$$

可以得到单纯考虑对位误差时,该元件的衍射效率为 $\eta_A = 73.12\%$. 显然,对位误差比深度误差对衍射效率的影响大.

同时考虑深度误差和对位误差,该元件的衍射效率为

$$\eta = \eta_0 - C_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n |\delta d_i| \right)^2 - C_2 \cdot \sigma^2 - C_3 \cdot |\delta A_1 - \delta A_2| = 68.18\%. \quad (21)$$

应该指出,在制作该元件时,我们考虑了深蚀刻对位误差对衍效影响的有关结论^[2],即在尽量减小 ΔA_1 和 ΔA_2 大小的同时,要尤其注意使它们的偏向一致,从而可将对位误差对衍射效率的影响控制在最小. 例如,在上面的结果中,假如保持对位误差的大小不变,而使两次对位误差的方向相反,即

$$\delta A_1 = 0.009\ 7(\text{L}), \delta A_2 = 0.017(\text{R}) \quad \text{或} \quad \delta A_1 = 0.009\ 7(\text{R}), \delta A_2 = 0.017(\text{L}),$$

这时,仅仅对位误差就将衍射效率降为 53.98% ,其影响已是很严重了. 因此,深蚀刻元件制作误差的研究对于实际制作具有重要的指导意义.

以上分析了质量较差的那块均匀器的衍射效率可达 68%, 考虑到前面所说的次焦点的能量补偿, 实际衍射效率比这个值要高; 因此, 质量更好的那块均匀器, 其衍射效率估计在 80% 左右. 实测衍射效率为 79%.

4 结束语

本文利用我们提出的深蚀刻理论和技术设计并制作了用于准分子激光器的深蚀刻二元光学均匀器. 与原来使用的积分均匀器(石英棒列阵)相比, 该均匀器具有重量轻, 调整方便, 光能利用率高, 光束均匀性好等特点. 对该器件的设计性能和参数进行了研究、分析和计算机模拟. 用高精度台阶仪对所制作的深蚀刻二元光学均匀器进行了精密检测, 用深蚀刻元件制作误差理论并引入“边界误差”概念, 对元件的表面浮雕检测结果进行了深入的分析; 理论分析及计算与实验结果符合得很好. 这是首次将二元光学深蚀刻理论和技术成功的应用于微细加工曝光照明系统中.

顺便指出, 由于光刻、蚀刻对环境要求很高, 而目前实验条件有限, 各种污染仍很严重, 对于光刻和蚀刻都有很大影响, 会使元件表面产生污点(图 6 的照片)等. 有限的实验条件和环境的污染对于表面清洗、曝光、显影、去胶、对位、线宽、台阶平整度、蚀刻速率等各个方面都会带来不利的影响. 改善实验条件和环境后, 实验结果会比上面的更好.

致谢 感谢四川大学信息光学研究中心郭履容教授、郭永康教授的指导; 感谢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对本文工作的大力支持; 感谢杜春雷博士、李展博士、周明宝博士和周礼书同志的有益讨论和关心.

参 考 文 献

- 1 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): 1 796 ~ 1 801
- 2 徐 平, 郭履容, 郭永康, 等. 深刻蚀二元光学元件制作误差模拟. 中国激光, 1997, 24(2): 536 ~ 543
- 3 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, 23(9): 819 ~ 823