

电子束重复增量扫描生成三维结构的研究*

郝慧娟[†] 张玉林 卢文娟 魏 强

(山东大学控制学院 电子束研究所, 济南 250061)

摘要: 针对三维曝光图形的结构特点, 结合自行设计的图形发生器, 提出了电子束重复增量扫描方式及曝光剂量与刻蚀深度关系和灵敏度的计算方法. 根据计算得到的剂量关系, 按照重复增量扫描方式, 在 SDS-3 电子束曝光机上进行了曝光实验, 显影后得到了轮廓清晰的梯锥和圆锥的三维结构. 因此, 重复增量扫描方式可以用于三维结构的加工, 并且关于曝光剂量与刻蚀深度关系和灵敏度的计算可以为提供符合实际曝光的参数.

关键词: DSP; 图形发生器; 电子束光刻; 三维加工; 灵敏度

PACC: 4180D; 6146; 6480G

中图分类号: TN305.7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)07-1326-05

1 引言

微光刻技术的发展要求真正的三维结构和器件的制造与生产, 像闪耀光栅 (blazed gratings)、各类衍射光学元件 (diffractive optical elements, DOEs) 和计算机全息图 (computer generated holograms, CGH)、微阵列等, 这些复杂元件要求加工不同的深度和特定的曲面轮廓. 显影中, 不同曝光剂量的抗蚀剂溶解速率不同, 刻蚀深度也就不同^[1]. 辐射剂量大的区域, 溶解速率快, 刻蚀深度就深; 辐射剂量小的区域, 溶解速率慢, 刻蚀深度就浅. 传统的三维变剂量加工方法就是利用了正性抗蚀剂的这个特性, 不同深度的位置用不同的电子剂量曝光, 得到了不同深度轮廓的三维结构^[2,3]. 电子的辐射剂量与束流大小和强度、停留时间、束斑密度以及抗蚀剂的灵敏度都有关系. 但大多数电子束曝光机的束流在加工过程中恒定不变, 曝光剂量通常是由电子束的扫描时间 (频率) 的改变来控制的. 因此, 传统的三维加工方法在电子束一次作图中, 需要多次改变扫描频率来调节曝光剂量, 这就要求图形发生器的工作时钟频率在一定范围内连续可调. 在剂量变化受到限制的电子束曝光系统中, 不能改变剂量, 就无法使用该方法. 另外, 扫描频率受到系统内部的限制, 限制了曝光级别, 在曝光曲面图形时, 限制了图形的曲面平滑度.

由于受到硬件的限制, 图形发生器能够接受的单元图形一般只有矩形、梯形、圆形和圆环. 因此, 对

于具有曲面结构的光学器件的光刻, 需要分割图形, 这就产生了大量的图形分割数据, 增加了数据计算时间. 即使这些图形数据通过上位机曝光前脱机处理后, 其传输也要花费很多的时间, 成为影响曝光速度和产量的重要因素. DOEs 图形多是旋转对称的带状图形, 如圆形、圆环 (菲涅尔波带等). 鉴于 DOEs 的特殊结构, 结合自行设计的图形发生器的特点, 提出了重复增量扫描方式. 该扫描方式适用于具有对称结构的图形. 对三维图形的加工, 无需进行复杂的图形分割, 可根据器件的加工要求, 产生简单、灵活的扫描数据; 该扫描方式也无需改变曝光剂量. 通过重复、重叠的多次曝光, 使光刻图形不同的地方得到不同的曝光总剂量. 增大重复曝光次数, 可生成带曲面的三维结构, 再经溅射导电层和微电镀工艺^[4]得到微三维器件掩模.

2 重复增量扫描方式

以往电子束曝光机图形发生器^[5]是以生成集成电路用掩模为目标设计的, 没有考虑加工三维结构的功能. 我们设计的图形控制器除具有普通二维图形加工的功能, 还可以方便地加工三维结构. 新图形发生器采用 TI 公司的 TMS320VC33^[6] DSP (digital signal processing) 芯片为主控制器, 承担实时计算任务. 其基本二维图形有矩形、梯形、圆形、圆环; 压缩图形有图组和图库. 数据处理计算机可脱机处理版图中各种图形在特定电子束参数和胶厚下相邻图形间的相互影响而引起的尺寸修正、图形在实

*国家自然科学基金重大研究计划 (批准号: 90307003), 山东省自然科学基金 (批准号: Y2003G03) 和山东省科技攻关计划基金 (批准号: 022090105) 资助项目

[†]通信作者. Email: haohuijuan0302@163.com

2005-11-27 收到, 2006-02-24 定稿

际扫描时所处的扫描场畸变所需的校正等参数的繁杂计算,最后产生各种图形的精简标志和参数.这些标志和参数在实际扫描时由控制计算机传给图形发生器.传送的标志仅是扫描图形的坐标、图形(矩形、梯形、圆形、圆环等)标志和纵横向曲度标志及参数,图形发生器中 DSP 根据这些标志和参数来计算各扫描点的扫描速度.这就大大减少了上位机到图形发生器的数据传输量.

利用重复增量扫描方式,新图形发生器可以完成对三维图形的扫描.以梯锥 1 为例,其数据格式为:

$$FF00 \quad xy \quad x \quad y \quad (1)$$

$$FF0B \quad Update, n \quad (2)$$

其中 FF00 为矩形 1(长宽型)的标志;FF0B 为重复增量扫描标志,后面的图形要扫描 n 次, x , y 每次都要在上次的基础上增加 $2Update$.其他坐标、参数如图 1 所示.梯形类同矩形;圆的圆心坐

标不变, r 每次增加 $Update$.用该扫描方式可以完成的三维基本图形有梯锥、圆锥、圆形曲面等,如图 2 所示.图中的坐标为曝光中上位机向图形发生器传输的数据.

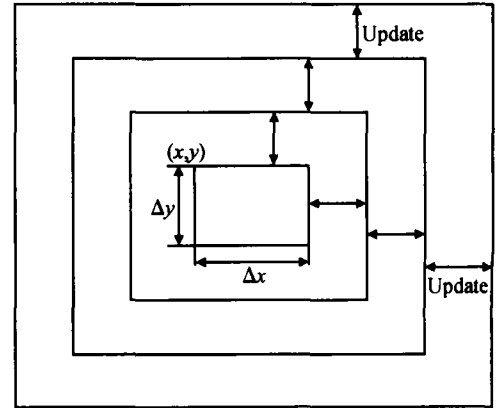


图 1 重复增量扫描示意图

Fig. 1 Sketch map of overlapped increment scanning

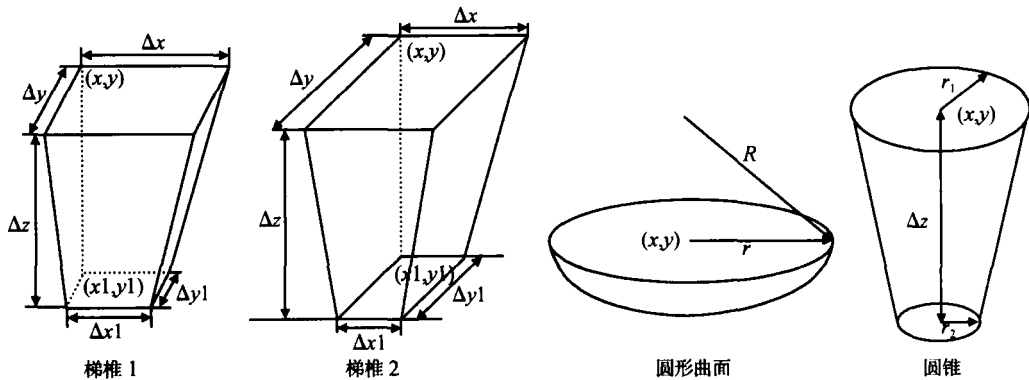


图 2 三维基本图形

Fig. 2 3D figures

在重复增量扫描策略下,只传输 1 个基本图形数据和相应的增量、重复次数以及标志即可表达传统方式中需传输的多个图形数据,大大降低了数据传输量,减少了总曝光时间,提高了曝光效率.采用 20 级 ($n = 19$) 曝光 1 个梯锥,传统方式需要传输 1600 字节的数据,重复增量扫描方式只需 64 字节.该方式也不受系统内部扫描频率的限制,曝光次数不受限制,可以通过增加曝光次数,来提高曲面的平滑度.对重复增量扫描方式来说,增加曝光次数,只是增大了 n 值,数据传输量没有增加.曝光上述梯锥,曝光级别增加到 50 级 ($n = 49$),重复增量扫描方式传输数据字节不变(64 字节),传统方式却需要传输 4000 字节的数据.

3 曝光计算

对三维基本图形曝光,首先要根据胶厚选择总

能量,使该能量下的电子穿透深度大于胶的厚度.电子的穿透深度用 Grun 公式^[7]计算.选定能量后,计算该能量下的曝光剂量和刻蚀深度的关系,从而选择曝光图形最深处的曝光剂量^[8] S 以及最浅处的曝光剂量 D_s ,并根据其差值选择曝光级别,计算 $Update$ 及曝光时间,完成一次重复增量扫描.

3.1 曝光剂量和刻蚀深度的关系

无论是传统的变剂量三维加工法,还是本文的重复增量扫描方式,都需要精确地确定曝光剂量与刻蚀深度之间的关系,从而根据关系曲线来确定元件不同位置的曝光剂量,进而确定总曝光时间.这种关系曲线可以通过实验直接测定,但其受到入射电子能量、衬底材料、胶的性质和厚度等多种条件的影响,改变其中一个条件,都要重新确定曲线,因此,实验方法较为麻烦.本文根据胶反差的经验公式来确

定这种关系.

在电子束能量、抗蚀剂厚度、基片类型和显影条件不变的情况下,正性抗蚀剂的反差是以被去除的抗蚀剂厚度与入射电子剂量的对数关系来表征的,是抗蚀剂灵敏度曲线的线性部分的斜率.图 3 为 PMMA 的灵敏度曲线以及反差的定义示意图.反差^[9]可以表示为:

$$= \frac{1}{\lg D_0 - \lg D_s} \quad (3)$$

其中 D_s, D_0 分别表示灵敏度曲线线性部分外推到归一化厚度为 1.0 和 0 时的剂量.从图 3 可以看出,以为斜率的直线(外推直线)在 D_0 ($50\mu\text{C}/\text{cm}^2$) 附近的值低于实际的灵敏度,而灵敏度定义为显影时抗蚀剂全部清除点所需要最小曝光剂量,如果要用外推直线直接表示剂量与深度的关系,并指导实

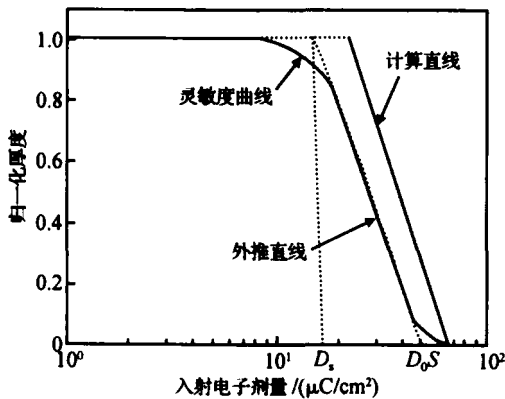


图 3 PMMA 的灵敏度曲线
Fig.3 Sensitivity curve of PMMA

际曝光,那么在需要全部清除抗蚀剂的区域,就不能完全清除,因而需要对该直线进行修正才能正确表示这种关系.本文选用以为斜率,并经过灵敏度点 S 的直线(计算直线)来表示.该直线表示的关系曝光同样的深度需要的剂量比灵敏度曲线上的值大.由于抗蚀剂的灵敏度受聚合物的分子量分布、原始分子量等多种因素的影响,再加上实际曝光时邻近效应、显影时间等多种因素的影响,实际曝光中通常可以考虑适当增加曝光剂量,保证显影后没有残留抗蚀剂.计算直线可以表示为:

$$H(D) = - \lg D + b \quad (4)$$

把 $D = S, H = 0$ 代入上式,得到 $b = \lg S$,则:

$$H(D) = (\lg S - \lg D) \quad (5)$$

其中 S 为灵敏度.求出 $H = 1$ 处的剂量值即为 D_s .

综合起来,胶的归一化厚度与剂量的关系可以表示为:

$$H(D) = \begin{cases} 1, & D < D_s \\ (\lg S - \lg D), & D_s \leq D \leq S \\ 0, & D > S \end{cases} \quad (6)$$

实际曝光中,用曝光总剂量对 D 近似,就会得到曝光剂量与深度的对应关系,再结合三维图形的基本特点,按照深度的要求,选择 S, D_s 的值,并根据其差值,选择重复曝光次数 n ,使 $S = (n + 1) D_s$.

3.2 灵敏度 S 的计算

正胶的灵敏度为其全清点的最小曝光剂量,可以通过实验方法测定,但其受到入射电子能量、衬底材料、胶的性质和厚度等多种因素的影响,为了减少实验次数和由于测量带来的误差,选用吸收能量密度经验公式来计算.

低原子序数材料衬底上的胶受电子束曝光时,深度 z 处的吸收能量密度^[10]的影响可以表示为:

$$= \frac{E_0 Q}{R_G e} (f) \quad (7)$$

其中 $(f) = 0.74 + 4.7f - 8.9f^2 + 3.5f^3$,是采用格林射程归一化的深度剂量函数, $f = z/R_G$; Q 是单位面积上的入射电荷剂量; E_0 为入射电子能量, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$; R_G 为格林射程,可以由 Grun 公式得到:

$$R_G = (46/) E_0^{1.75} \quad (8)$$

由(7)式可以得到:

$$Q = \frac{e R_G}{E_0} (f) \quad (9)$$

根据显影的阈值能量模型理论,只要抗蚀剂吸收能量密度大于阈值能量密度,曝光图形就可以被显影剂溶解.若取显影的阈值能量密度,根据(9)式得到的剂量值就为不同深度的抗蚀剂能够显影的最小剂量.取正胶的厚度为 z ,用(9)式计算得到的剂量对其曝光,则辐照区的胶就能够全部清除,那么此时的辐射剂量 Q 即为灵敏度.

PMMA 的显影阈值能量密度的典型值^[11]为 $6.8 \times 10^{21} \text{eV}/\text{cm}^3$.用(9)式计算得到的 20keV 和 15keV 下 PMMA 的 Q 值分别为 $58\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 和 $47\mu\text{C}/\text{cm}^2$,与文献[12]一致.因此,(9)式可以用于灵敏度的计算来指导实际曝光.把计算得到的灵敏度值代入(6)式,就可得到不同能量下的曝光剂量与深度的关系.

3.3 与实验结果的比较

为了验证计算的灵敏度值以及曝光剂量与深度关系的精确度,本文对 10keV 入射电子能量下 80nm 的 PMMA 进行了计算,并根据(6)式给出了曝光剂量与深度的关系曲线,如图 4 所示.图中胶的遗留厚度为显影后 AFM 测量所得.从图中计算曲

线与实验值的比较可以看出,计算结果与实验值基本一致.从而说明,3.1,3.2节的计算方法可以用于指导实际的三维加工.

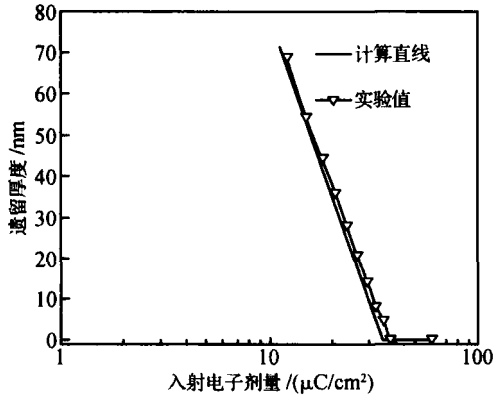


图 4 PMMA 的遗留厚度与剂量的关系

Fig. 4 Relation between remaining thickness and dose

4 实验图形分析

利用 SDS-3 电子束曝光机,按照重复增量扫描方式进行了曝光实验.图 5 和 6 分别为显影后的正梯锥 1 和圆锥的 AFM 图.正性光致抗蚀剂 S-1805 的厚度为 570nm.曝光中的电子束加速电压为 20kV,Update 取 1μm,曝光剂量为 5μC/cm²,进行了 7 次重复增量扫描 (n=7),那么最深处(图 1 中最

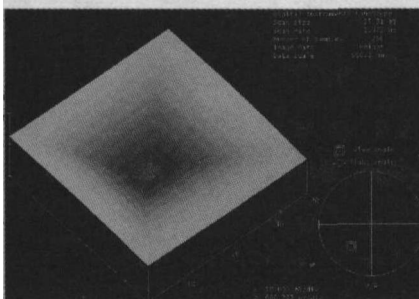


图 5 梯锥 1 的 AFM 图

Fig. 5 AFM photograph of the conic of trapezoid 1

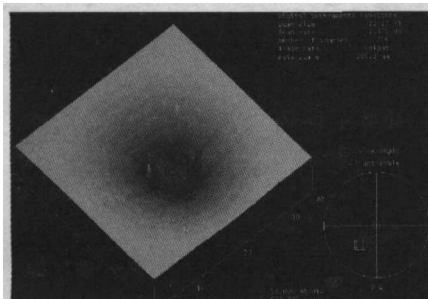


图 6 圆锥的 AFM 图

Fig. 6 AFM photograph of the conic

内层矩形)的曝光剂量 S 为 8 次曝光剂量之和(即 $40\mu\text{C}/\text{cm}^2$).显影液为 7% 的 NaOH 溶液,显影时间为 50s.图 5 中 x_1 为 $4\mu\text{m}$, y_1 为 $2\mu\text{m}$, x 为 $18\mu\text{m}$, y 为 $16\mu\text{m}$.图 6 中 r_2 为 $2\mu\text{m}$, r_1 为 $16\mu\text{m}$.AFM 测量可知,最大曝光深度为 528nm,其他各级深度分别为:49,127,236,344,450,513 和 520nm.从图 5 和 6 可以看出,梯锥 1 和圆锥的三维轮廓清晰,各曝光级别之间的界线明显,说明重复增量扫描方式可以用于电子束三维加工.

5 结论

本文提出了重复增量扫描方式的三维加工策略,采用反差和吸收能量密度的经验公式得出了曝光剂量与深度的关系.显影后的梯锥 1 和圆锥的三维轮廓清晰,说明该扫描方式可以用于电子束的三维加工,关于曝光剂量与深度关系的计算也是符合实际曝光情况的.该扫描方式适用于具有对称结构的曲面图形的加工,无需进行复杂的图形分割,降低了数据传输量,提高了曝光效率;该扫描方式也无需改变曝光剂量,为剂量变化受到限制的系统提供了三维加工方法;该扫描方式的曝光级别也不受限制,增加重复曝光次数,可以得到连续曲面,再经溅射导电层和微电铸工艺可得到微三维器件掩模.重复曝光次数与曲面的关系将有待进一步研究,今后将加强这方面的理论和实验研究.

参考文献

- [1] Brunger W, Kley E B, Schnable B, et al. Low energy lithography: energy control and variable energy exposure. *Microelectron Eng*, 1995, 27: 135
- [2] Grella L, Fabrizio E D, Gentili M, et al. Proximity correction for e-beam patterned sub-500nm diffractive optical elements. *Microelectron Eng*, 1997, 35: 495
- [3] Reimer K, Henke W, Quenzer H J, et al. One-level gray-tone design-mask data preparation and pattern transfer. *Microelectron Eng*, 1996, 30: 559
- [4] Yu Yi, Ren Tianling, Liu Litian. Deposition and characterization of AlN thin films on silicon. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(1): 42 (in Chinese) [于毅,任天令,刘理天. 硅基 AlN 薄膜制备技术与测试分析. *半导体学报*, 2005, 26(1): 42]
- [5] Rothuizen H, Prongue D, Vasey F, et al. A conic primitive-based pattern generator for electron-beam lithography of diffractive optical elements. *Microelectron Eng*, 1997, 34: 243
- [6] TMS320C3X User's Guide, 1991
- [7] Brewer G K. *Electron beam lithography technology*. Beijing: National Defence Industry Press, 1986 (in Chinese) [布鲁尔 G K(美). *电子束刻蚀技术*. 北京: 国防工业出版社, 1986]
- [8] Kang Xiaohui, Li Zhigang, Liu Ming, et al. A new method to retrieve proximity effect parameters in electron-beam lithography. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(3): 455

- [9] Bogdanov A L , Holmqvist T , Jedrasik P , et al. Dual pass electron beam writing of bit arrays with sub-100 nm bits on imprint lithography masters for patterned media production. *Microelectron Eng* ,2003 ,67/ 68 :381
- [10] Wu Kehua. E-beam exposure technology. Beijing :Space Navigation Press ,1985 (in Chinese) [吴克华. 电子束扫描曝光技术. 北京 :宇航出版社 ,1985]
- [11] Greenneish J S , van Duzer T. An exposure model for electron-sensitive resist. *IEEE Trans Electron Devices* ,1974 ,21 (5) : 286
- [12] Jiang Xinrong. Microfabrication technology. Beijing : Publishing House of Electronic Industry ,1990 (in Chinese) [蒋欣荣. 微细加工技术. 北京 :电子工业出版社 ,1990]

Three-Dimensional Fabrication by Electron Beam Lithography Using Overlapped Increment Scanning *

Hao Huijuan[†] , Zhang Yulin , Lu Wenjuan , and Wei Qiang

(*Institute of Electron Beam , Shandong University , Ji 'nan 250061 , China*)

Abstract : Overlapped increment scanning in electron beam lithography and the calculation methods for the exposure doses and the etching depth and sensitivity are presented for the structural characteristics of three-dimensional patterns as well as the self-devised pattern generator of an e-beam lithography system. Based on the calculated dose relations according to the scanning mode , the exposure experiments are conducted in an SDS-3 e-beam lithography system. After the development , the distinct three-dimensional structures of the conic of trapezoid 1 and the conic are obtained. Overlapped increment scanning therefore can be used for three-dimensional fabrication , and the calculation of the relations between exposure doses and the etching depth and sensitivity can provide the practical parameters for it.

Key words : DSP; pattern generator; e-beam lithography; three-dimensional lithography; sensitivity

PACC : 4180D; 6146; 6480G

Article ID : 0253-4177 (2006) 07-1326-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 90307003) , the Natural Science Foundation of Shandong Province (No. Y2003G03) , and the Foundation of Key Technology Research and Development Program of Shandong Province (No. 022090105)

[†] Corresponding author. Email : haohuijuan0302 @163. com

Received 27 November 2005 , revised manuscript received 24 February 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics