

文章编号: 1001-4322(2007)08-1377-04

用反差确定电子束曝光剂量与刻蚀深度的关系*

卢文娟^{1,2}, 张玉林¹, 孔祥东³, 郝慧娟¹

(1. 山东大学 控制学院 电子束研究所, 济南 250061; 2. 山东科技大学 信息与电气工程学院, 山东 青岛 266510;
3. 东营职业学院, 山东 东营 257091)

摘 要: 为了精确地确定电子束曝光剂量与刻蚀深度间的关系, 根据抗蚀剂的灵敏度曲线, 采用反差经验公式来确定剂量与刻蚀深度间的关系。选用正性抗蚀剂 PMMA 进行曝光实验, 将计算值进行曲线拟合, 得到的关系曲线与实验结果基本相符。当剂量在 $20 \sim 35 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 间时, 实验值与计算值间的差值最小, 说明当剂量在此范围内时该方法能够更加精确地确定剂量与刻蚀深度间的关系。采用该方法节省了实验时间, 提高了刻蚀效率。

关键词: 电子束光刻; 曝光剂量; 刻蚀深度; 反差; 吸收能量密度

中图分类号: TN305.7

文献标识码: A

随着微机电系统的深入研究, 需要精密地制作复杂曲面和各种形状的 3 维微结构。当前用于 3 维微结构加工的技术主要有体微加工技术、LIGA 技术和 IH 3 维光刻技术等。体微加工技术和 LIGA 技术能够制作高精度、高深宽比的陡直微细结构, 但是难于加工各种微曲面和结构较为复杂的器件^[1-2]; IH 3 维光刻技术从理论上能加工出任意曲面和任意高深宽比的复杂结构, 但其 x 和 y 方向的扫描是靠机械移动来完成的, 加工精度较低, 分辨率目前仅为亚 μm 级^[3]。因此这些微 3 维加工技术不能很好地适应微机电系统的高速发展, 需要寻求更高精度的加工手段。

电子束刻蚀技术是微细加工技术中的一种高分辨率的加工方法。在显影过程中, 曝光过的抗蚀剂的溶解速度与电子束的曝光剂量成一定的比例关系^[4-5]。例如: 对于正性抗蚀剂辐射剂量大的区域, 溶解速度快, 刻蚀深度深; 辐射剂量小的区域, 溶解速度慢, 刻蚀深度浅。一般来说, 曝光剂量的变化是通过改变抗蚀剂的曝光时间来控制。对于同一种抗蚀剂, 不同的曝光剂量对应着不同的刻蚀深度, 在电子束光刻 3 维加工过程中, 精确地确定曝光剂量与刻蚀深度间的关系, 对曝光实验的指导具有重要作用。本文采用抗蚀剂的反差经验公式来确定曝光剂量与刻蚀深度间的关系, 从而可以根据不同的深度要求比较精确地确定曝光剂量, 以指导曝光实验。

1 原 理

对于通用电子束曝光系统而言, 曝光过程中一般电子束的束流保持不变, 曝光剂量的改变通常是由工作台移动或电子束扫描的速度变化来控制实现的^[6]。不同的深度对应着不同的曝光剂量, 改变剂量就可以比较容易地加工出曲面图形。刻蚀原理如图 1 所示^[7]。利用该原理, 可以加工出具有不同深度等级的微结构图形。束斑参数保持不变, 每一行栅格对应着不同的扫描频率, 即对应不同的曝光效果。受电子束在抗蚀剂中散射效应的影响, 电子束的有效刻蚀深度比较小, 一次曝光很难刻蚀较厚的胶层。为了达到一定的深度要求, 需要进行多次曝光来完成。

采用变剂量的方法可以产生不同深度的微结构图形。精确地确定了曝光剂量与刻蚀深度间的关系后, 就可以根据该关系来确定微结构不同位置处的曝光剂量, 节省实验时间。剂量与深度的关系可以通过实验直接确定, 但其受入射电子能量、胶层厚度, 衬底材料、胶的性能和显影条件等诸多因素的影响, 改变其中一个条件, 相应的实验数据都会发生变化, 关系曲线也需要重新确定。

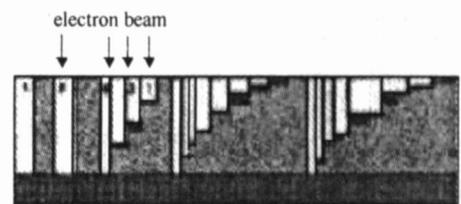


Fig. 1 Schematic of changing-dose etching
图 1 变剂量刻蚀原理图

* 收稿日期: 2007-03-15; 修订日期: 2007-07-10

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 卢文娟(1981—), 女, 山东荣成人, 博士研究生, 主要从事电子束曝光、3 维微加工、MEMS 加工技术研究; wsjuanzi@126.com。

2 反差定义及计算

反差是抗蚀剂的一个很重要的参数,表示抗蚀剂对入射剂量变化的敏感程度,它是以抗蚀剂的灵敏度曲线的线性部分的斜率来定义的,一般以 γ 表示。图 2 为正性抗蚀剂 PMMA 的灵敏度曲线,设 D_1 为抗蚀剂开始变化(归一化厚度为 1.0)时的外推剂量, D_0 为抗蚀剂全部变化(归一化厚度为 0)时的外推剂量,则反差定义为^[8]

$$\gamma = - (\lg \frac{D_1}{D_0})^{-1} \quad (1)$$

由灵敏度曲线可知,曲线的斜率越陡, D_1 与 D_0 的间隔就越近,反差值就越大,就越能得到清晰的图形轮廓和高分辨率。一般抗蚀剂的反差均在 0.9 ~ 2.0 之间,正性抗蚀剂的反差比负性抗蚀剂的反差大,正性抗蚀剂 PMMA 的反差一般为 2。

深度剂量函数 是指材料穿透深度 z 处的吸收能量密度(单位 eV/cm^3)。计算出不同深度 z 处的吸收能量密度就可以估算出电子束能够穿透该深度所需的辐射剂量。以低原子序数材料为衬底的抗蚀剂层,受电子束辐照曝光时,其吸收能量密度 表示为^[9]

$$= \frac{Q}{e} \frac{E_0}{R_G} (f) \quad (2)$$

式中: Q 是单位面积上的入射电荷(单位 C/cm^2); E_0 为入射能量(单位 keV); e 为电子电荷(C); R_G 为 Grun 射程(cm); $(f) = 0.74 + 4.7f - 8.9f^2 + 3.5f^3$,是用 Grun 射程归一化的深度剂量函数, $f = z/R_G$ 。

由(2)式可得

$$Q = eR_G/E_0 (f) \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式,则反差可以表示为

$$= (\lg \frac{D_0}{D_1})^{-1} = [\lg \frac{f_0(f)}{f_1(f)}]^{-1} \quad (4)$$

式中: f_1, f_0 分别表示抗蚀剂归一化厚度为 1.0 和 0 时的吸收能量密度; $f_1(f), f_0(f)$ 分别表示抗蚀剂归一化厚度为 1.0 和 0 的深度剂量函数。

吸收能量密度是抗蚀剂曝光的一个基本参数,取决于胶涂层的散射电子的能量丢失和来自衬底的背散射电子的能量丢失,而且是二者的能量丢失的累积结果。吸收能量密度的理论计算很复杂,但其分布规律具有普遍性,因此可以通过 Monte Carlo 模拟近似分析函数拟合得到。

假设把入射电子束看成为理想的 函数束,即入射电子束的宽度为零。由于胶和衬底的吸收能量密度分布规律具有普遍性,用双高斯近似分布函数来拟合吸收能量密度分布^[10],即

$$f(r, z) = (r, z) = k(z) [e^{-r^2/\tau^2(z)} + (z) \frac{\tau^2(z)}{b^2(z)} e^{-r^2/b^2(z)}] \quad (5)$$

式中: r 是离开 函数束入射中心的距离; $k(z), \tau(z), b(z)$ 和 (z) 都是深度 z 的函数; τ, b 分别表示前散射和背散射分布的“特征半宽度”,而 (z) 定义为背散射电子在 z 方向的能量丢失与前散射电子在 z 方向的能量丢失之比。实际上,入射电子束往往不满足 函数分布,也不是均匀分布,而是呈高斯圆形和矩形分布。这两种形状的入射束的吸收能量密度,都可以利用数学上的卷积求得。设高斯圆束的密度分布的半宽度为 σ ,则在深度 z ,离高斯中心任意径向距离 r 处的吸收能量密度为

$$a(r, z) = \int_0^2 \int_0^{\pi} r dr (r, z) \exp(-r^2/2\sigma^2) \quad (6)$$

式中: θ 表示散射角, r 均表示变量, r 等同于(5)式中的 r 。

将(5)式代入(6)式,就可通过积分运算获得实际入射高斯圆束的吸收能量密度。本文采用 20 kV 的加速电压,对厚度分别为 200 nm 和 400 nm 的 PMMA 进行 Monte Carlo 模拟,确定其吸收能量密度,代入(4)式计算得到的反差分别为 2.028, 2.093,与参考文献[11]中的给定值 2~3 一致,说明(4)式可用于电子束抗蚀剂反差的计算。

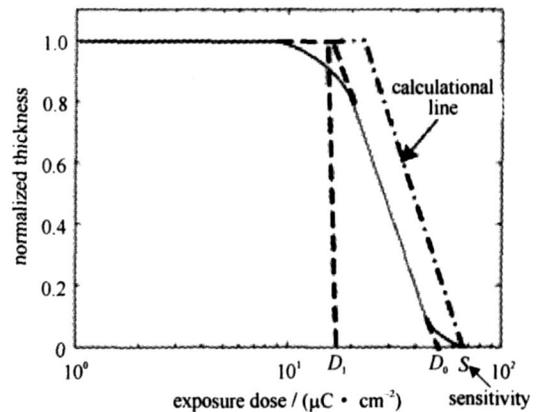


Fig. 2 Sensitivity curve of PMMA

图 2 PMMA 的灵敏度曲线

3 PMMA 灵敏度计算

抗蚀剂灵敏度定义为能显影出满足设计要求的图形所需之最小剂量。对正性抗蚀剂而言,灵敏度为辐照时抗蚀剂全清点的最小曝光剂量。灵敏度受很多因素的影响,如电子能量、胶层厚度、衬底材料,邻近效应、胶的相对分子质量及其分布、显影液温度和浓度等,其中某一条件变化,灵敏度也将会发生变化。我们从吸收能量密度出发来寻找一种表示灵敏度的最佳办法。

根据显影阈值能量理论^[12],只要抗蚀剂某一深度处单位体积内的吸收能量密度大于阈值能量密度,曝光后该处的抗蚀剂就能被溶解掉。若某抗蚀剂的显影阈值为 σ_0 ,令 $\sigma = \sigma_0$,则由(3)式可以估算出不同深度处的抗蚀剂能够全部清除所需的最小剂量,此时的辐射剂量即为灵敏度 S ,如图 2 所示。PMMA 显影阈值能量密度的典型值^[12]为 $6.8 \times 10^{21} \text{ eV/cm}^3$,用(3)式计算得到 20 keV 和 15 keV 下厚度为 200 nm 的 PMMA 的 Q 值分别为 $58 \mu\text{C/cm}^2$ 和 $47 \mu\text{C/cm}^2$,与文献[11]基本一致。因此,(3)式可以用于灵敏度的计算。

4 曝光剂量与刻蚀深度间的关系

从图 2 可以看出,以反差 σ 为斜率的外推直线在 D_0 (约 $50 \mu\text{C/cm}^2$) 附近的剂量值低于实际的灵敏度,如果用过 D_0 点的外推直线表示剂量与深度的关系,则计算得到的曝光剂量值就会小于实验图形所展示的实际剂量,曝光时需要全清点的区域就不能完全被清除。因此,我们需要对该直线进行修正,选用以 σ_0 为斜率并经过灵敏度点 S 的直线为计算直线,如图 2 点画线所示,该直线表示曝光同样深度所需的剂量比灵敏度曲线上的值略大。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。该直线可以表示为

$$H(D) = - \lg D + b \tag{7}$$

当 $D = S$ 时, $H = 0$,则 $b = \lg S$,代入(7)式得

$$H(D) = (\lg S - \lg D) \tag{8}$$

当 $H = 1$ 时,对应的剂量值为 D_1 ,如图 2 所示,该值应大于 D_0 。

综上所述,抗蚀剂的归一化刻蚀深度与曝光剂量的关系如下

$$H(D) = \begin{cases} 0, & D < D_1 \\ 1 - (\lg S - \lg D), & D_1 \leq D \leq S \\ 1, & D > S \end{cases} \tag{9}$$

5 实验结果

利用 SDS-3 型电子束曝光机,对厚度为 570 nm 的 PMMA 进行曝光,加速电压为 20 kV,显影液为 7% 的 NaOH 溶液,显影时间为 50 s。通过改变扫描次数来改变曝光图形的剂量,单次曝光剂量为 $5 \mu\text{C/cm}^2$,则各次曝光对应剂量分别为 5,10,15,20,25,30,35,40 $\mu\text{C/cm}^2$,各级刻蚀深度分别为 49,127,236,344,450,513,520,528 nm。图 3 为 PMMA 显影后得到的不同台阶的 AFM 图。实验结果表明:不同的剂量对应着不同的刻蚀深度。将 PMMA 的灵敏度、 D_1 及反差的计算结果代入(9)式,得到的结果进行多项式曲线拟合,得到剂量与刻蚀深度的曲线关系如图 4 所示。

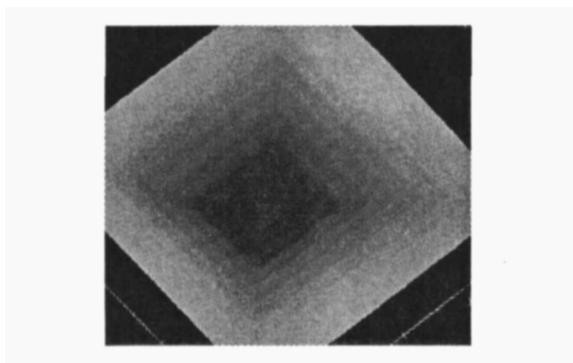


Fig. 3 AFM image by the changing-dose method

图 3 采用变剂量方法的 AFM 效果图

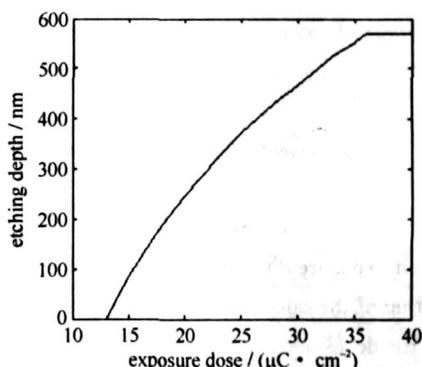


Fig. 4 Exposure dose vs etching depth

图 4 曝光剂量与刻蚀深度间的关系曲线

6 结 论

实验结果表明:随着曝光剂量的增加,刻蚀深度也不断增加。当剂量低于 D_1 时,抗蚀剂的归一化深度为

1, 即抗蚀剂不被显影; 当剂量高于灵敏度 S 时, 归一化深度为 0, 即抗蚀剂可以被全部清除。当剂量处于 $20 \sim 35 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 间时, 计算值与实验值的差值最小, 说明当剂量在此范围内时该方法能够更加精确地确定剂量与刻蚀深度间的关系。

综上所述, 利用反差来确定曝光剂量与刻蚀深度间的关系是可行的。不同的剂量对应着不同的台阶, 更好地体现了剂量与深度间的关系。在给定刻蚀深度的情况下, 可以根据该剂量与深度的关系来确定曝光剂量, 节省实验时间, 提高刻蚀效率。

参考文献:

- [1] Men Z W, Mohr J, Paul O. 微系统技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 197-354. (Men Z W, Mohr J, Paul O. Microsystem Technology. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 197-354)
- [2] 孔祥东, 张玉林, 魏守水. 基于电子束光刻的 LIGA 技术研究[J]. 微细加工技术, 2004, (1): 18-22. (Kong X D, Zhang Y L, Wei S S. Study of LIGA based on electron beams. *Microfabrication Technology*, 2004, (1): 18-22)
- [3] Ikuta K, Maruo S, Kojima S. New micro stereo lithography for freely movable 3D micro structure—super IH process with submicron resolution[C]// Proc of IEEE. 1998: 290-295.
- [4] Br ünger W, Kley E B, Schnabel B, et al. Low energy lithography: energy control and variable energy exposure[J]. *Microelectronic Engineering*, 1995, **27**: 135-138.
- [5] 孔祥东, 冯圣玉, 卢文娟, 等. 电子束重复增量扫描曝光技术[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(3): 503-506. (Kong X D, Feng S Y, Lu W J, et al. Electron beam lithography based on overlapped increment scanning. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(3): 503-506)
- [6] 席德勋. 一种新的电子束扫描电流产生方法[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(1): 113-116. (Xi D X. A new current generating method for electron beam scan. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1): 113-116)
- [7] Stemmer A, Zarschizky H, Knapke E, et al. Efficiency enhancement of diffractive optical elements by variable relief profiling[J]. *Microelectronic Engineering*, 1995, **27**(1-4): 171-174.
- [8] 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[J]. *Microelectronic Engineering*, 2003, 67-68: 381-389.
- [9] 卢文娟, 张玉林, 孔祥东. 电子束能量、剂量对固化厚度影响的研究[J]. 微细加工技术, 2005, (4): 7-11, 64. (Lu W J, Zhang Y L, Kong X D. Study of effect of electron beam energy and dose on curing depth of liquid resists. *Microfabrication Technology*, 2005, (4): 7-11, 64)
- [10] Chang T H P. Proximity effect in electron-beam lithography[J]. *J Vac Sci Technol*, 1975, **12**(6): 1271-1275.
- [11] 蒋欣荣. 微细加工技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 1990: 46-57. (Jiang X R. Microfabrication technology. Beijing: Electronics Industry Press, 1990: 46-57)
- [12] Greeneich J S, Van Duzer T. An exposure model for electron sensitive resists[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1974, **21**(5): 286-299.

Determining relationship between electron-beam dose and etching depth by empirical formula of contrast

LU Wen-juan^{1,2}, ZHANG Yu-lin¹, KONG Xiang-dong², HAO Hui-juan¹

(1. *Electron beam Laboratory, School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;*

2. College of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China;

3. Department of Scientific Research, Dongying Vocational College, Dongying 257091, China)

Abstract: According to the sensitivity curves of resists, the empirical formula of contrast was adopted to determine the relationship between exposure dose and etching depth accurately. Exposure experiments were carried out with positive resist PMMA. With curve fitting of the calculated results, the depth-dose curve is obtained and keeps consistent with the experimental results basically. When the doses are in the range of $20 \sim 35 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, the difference between the experimental results and the calculated ones is least. Using the contrast method in the etching can save experimental time and raise the etching efficiency.

Key words: Electron beam lithography; Exposure dose; Etching depth; Contrast; Absorbing energy density