

# 电子散射效应对电子束光刻的影响

孙毓平

(中国科学院半导体研究所)

自七十年代中期,第一批计算机控制的亚微米对准精度的扫描电子束光刻机问世以来不到十年,一个引人注目的新技术领域——微细加工技术随之发展起来。人类有可能用这新技术来获得亚微米级( $<1\mu\text{m}$ )、毫微米级( $\text{nm}$ )的尺寸。电子束光刻在微细加工技术中扮演着重要角色。超大规模集成电路、高速器件、超导结器件、声表面波换能器、高密度磁泡存贮器、集成光学元件、材料科学以及生物学等领域,都需要加工更小的尺寸。微细加工技术通常包括微光刻技术、干法腐蚀技术、离子注入技术和超薄层形成技术等。微光刻技术是形成微细图形和转移图形的重要技术。历史悠久的紫外光光刻波长较长( $0.4\text{--}0.5\mu\text{m}$ ),在加工尺寸接近或小于波长时,遇到了光学衍射效应的限制。为了克服衍射效应的障碍,人们便寻找短波长的粒子。几乎可以想象,得到的各种短波长的粒子都已在实验中采用。短波长的光子和电子,首先被证实可用于细线条光刻。离子、激光近来亦被证实可能用于光刻技术中。

电子束光刻在装置的研制、工艺的应用和工艺物理研究等方面均有长足的进展。事实上,电子束光刻已居领先地位。据报道,电子束光刻制作集成电路,每小时可完成最细线宽  $1\mu\text{m}$  的 3 英寸片子 10—20 枚,最细线宽为  $2\mu\text{m}$  的 3 英寸片子 20—45 枚<sup>[1]</sup>。4 英寸片子 13 枚,4 英寸掩模板 15 枚<sup>[2]</sup>。电子束光刻的主要优点:(1)电子的等效波长短(在  $15\text{--}30\text{keV}$  时,波长为  $0.1\text{--}0.07\text{\AA}$ )。当前电子束加工的最细线宽为几十埃的量级,加工的可工作的器件的最细线宽约为  $1500\text{\AA}$ ,衍射效应可忽略不计,具有高的分辨率。(2)计算机控制的扫描电子束光刻系统具有自动产生图形的能力。电子束图形

发生器比光学图形发生器效率高。例如,64 KMOS 随机存贮器的图形加工,用光学图形发生器需 24 小时,用电子束可缩短 1—2 个数量级<sup>[3]</sup>。电子束光刻的缺点是存在电子散射效应和辐照损伤。本文只讨论前者,它与电子束光刻工艺过程有关。已见报道的电子束光刻有以下几种:(1)电子束湿法显影光刻;(2)电子束汽化显影光刻<sup>[4]</sup>;(3)电子束等离子显影光刻<sup>[5]</sup>;(4)电子束无显影光刻<sup>[6]</sup>。当前第一种电子束光刻较为成熟,用得较广。本文以其为背景讨论与散射效应有关的问题。电子束光刻中具有能量 ( $5\text{--}30\text{keV}$ ) 的电子同有衬底的高聚合物固体膜( $0.1\text{--}3.0\mu\text{m}$ )的相互作用,包括聚合物中的电子散射、能量淀积及有关的问题(如 Chapiro 效应<sup>[7]</sup>,隐象与显象,内部邻近效应和外部邻近效应等),引起了学者们的广泛兴趣。

## 一、电子束辐照灵敏的抗蚀剂

电子束辐照灵敏的抗蚀剂即电子抗蚀剂(俗称电子胶),大多为高分子聚合物。电子束光刻是在电子抗蚀剂上形成图形并将此图形转移到衬底上的过程。在电子抗蚀剂上图形形成过程中,既有物理过程,也有化学过程。Chapiro 效应可以解释高分子聚合物受电子束作用产生的裂解和交联作用。高聚物分子是以碳原子为主干的长链构成,长链是由单体单元的聚合而成,如图 1(a)所示。裂解是高分子经电子束辐照后,高能电子使主干链损伤,于是分裂成小分子,如图 1(b)所示。交联是高聚物经电子束辐照后,在同一分子内单体单元和邻近链上单体单元之间连接起来形成的新键,如图 1(c)所示。高聚物电子抗蚀剂固体膜是一种无定型结构。

主干键的刚性影响其机械的和热力学的性能。侧链的化学性能决定其粘附性和抗蚀性。

电子抗蚀剂吸收电子束能量，产生以裂解为主或以交联为主的效应，其平均事件数为<sup>[8]</sup>

$$\eta = \frac{\epsilon M_0}{\rho N_A} (G_{CS} - G_{CI}), \quad (1)$$

其中  $\epsilon$  为单位体积的吸收能， $M_0$  为辐照前的平均分子量， $\rho$  为质量密度， $N_A$  为阿伏加德罗常数， $G_{CS}$  和  $G_{CI}$  分别为裂解和交联的辐射灵敏度。当  $G_{CS} \gg G_{CI}$  时，为正性电子抗蚀剂；当  $G_{CI} \gg G_{CS}$  时，为负性电子抗蚀剂；当  $G_{CS} = G_{CI}$  时，为性能低劣的电子抗蚀剂。同一聚合物中两种事件产生的几率往往不等。在不同的电子束辐照条件下，同一种聚合物有时表现为以裂解为主，有时表现为以交联为主。例如，聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 电子抗蚀剂，一般电荷剂量下为正性电子抗蚀剂，但当剂量增加到某值时 (如 20keV 时，大于  $20\text{pC} \cdot \mu\text{m}^{-2}$ )，则变为负性电子抗蚀剂。

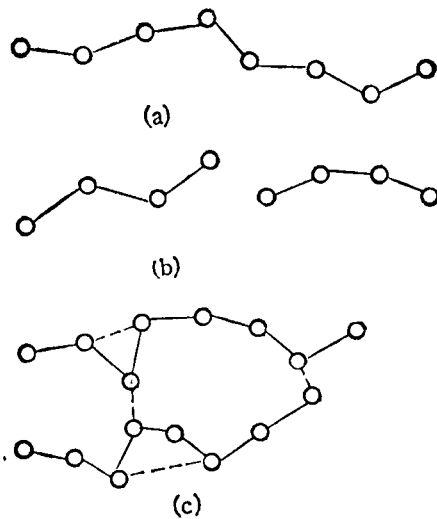


图 1  
(a) 聚合物链；(b) 裂解；(c) 交联

## 二、电子散射和能量耗散

电子束与固体相互作用<sup>[9]</sup>和蒙特卡罗法已有介绍<sup>[10]</sup>，国内也已有蒙特卡罗法的专著<sup>[11]</sup>。这

里就电子束光刻中电子散射和能量耗散的某些典型分析结果简要介绍一下。

入射电子束在电子抗蚀剂中产生正向散射和背散射，同时在衬底上产生背散射也进入电子抗蚀剂中。于是，在电子抗蚀剂中吸收的能量密度  $\epsilon_\delta(r, z_0)$  由三部分组成<sup>[12]</sup>：

$$\epsilon_\delta(r, z_0) = \epsilon_{\delta p}(r, z_0) + \epsilon_{\delta r}(r, z_0) + \epsilon_{\delta s}(r, z_0), \quad (2)$$

式中  $\epsilon_{\delta p}$ 、 $\epsilon_{\delta r}$  和  $\epsilon_{\delta s}$  分别为正向散射、抗蚀剂中的背散射和衬底的背散射的贡献，但第二项通常较小。图 2 是分别利用 Lenz 的复散射理论

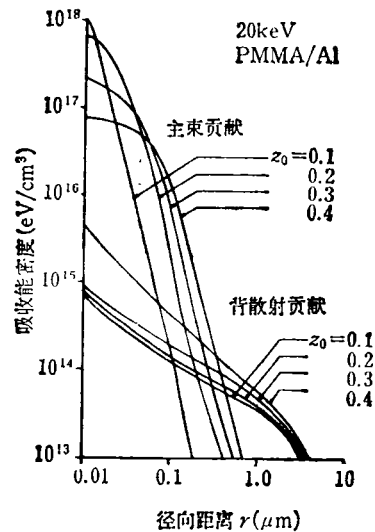


图 2 主束和背散射的吸收能量密度

和 Everhort 的改进的背散射模型，计算正向散射和背散射贡献所得到的吸收能量密度随径向距离变化的结果。电子抗蚀剂为 PMMA，厚度  $0.4\mu\text{m}$ ，衬底为铝材料，入射电子能量为 20keV， $z_0$  为吸收深度， $r$  为径向距离。吸收能量密度随径向距离增加而减小。主束 (入射束) 的展宽较小，背散射的展宽较大。在小的径向距离时，正向散射的吸收能密度，比背散射的吸收能密度大几个数量级。背散射能量的展宽范围可达衬底射程的量级，但能量亦随之降低。电子束光刻中电子的轨迹和行为的分析，也可采用著名的统计方法——蒙特卡罗法进行模拟。对于点源入射 100 个电子，电子能量为 10keV 和 20 keV，抗蚀剂为 PMMA，厚度  $0.4\mu\text{m}$ ，衬底为

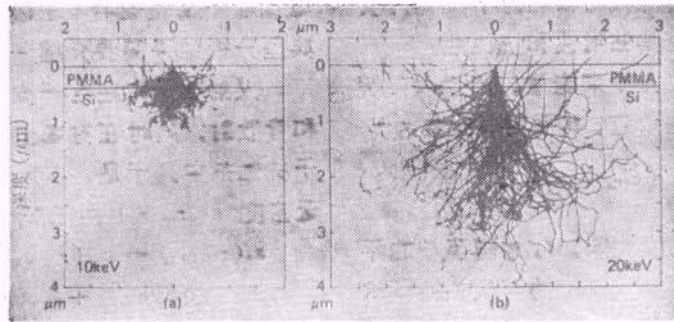


图3 利用蒙特卡罗法模拟点源入射 PMMA/Si 样品的 100 个电子的轨迹  
(a) 电子能量 10keV; (b) 电子能量 20keV

硅材料,进行蒙特卡罗模拟,其深度——径向二维表示的电子轨迹如图 4 所示<sup>[13]</sup>。模拟是根据多散射理论进行的。10keV 时背散射电子的展开距离约为 1 $\mu\text{m}$ ; 20keV 时背散射电子的展开距离为 3—4 $\mu\text{m}$ 。

### 三、隐象与显象

电子束曝光后的电子抗蚀剂中形成了与非曝光区不同的物理和化学性能的区域,形成了潜在的象——隐象。显象是把隐象经过化学处理(显影)显现出来。显象的横断面为显影剖面。正、负性电子抗蚀剂的显影剖面,分别通过曝光区高聚物移去、曝光区高聚物留下而形成。负性电子抗蚀剂在化学湿法显影和后烘中发生膨胀和收缩,难以保持与隐象相一致,所以理论上认为模拟比较困难。显象接近隐象的程度由显影条件决定。隐象与显影剂无关。隐象的模拟可通过描画等能吸收轮廓线得到。通常显影剖面与曝光和显影有关。理论分析显影过程,已提出阈值灵敏度模型和弦法模型。阈值灵敏度模型假定对于高反差的显影剂系统,剖面形状对应于等能耗散轮廓;对于正性电子抗蚀剂,显影剂溶去了所有的能耗大于和等于阈值能密度的区域,并且与显影时间无关。这显然不适合低入射剂量的情形。对较厚的胶膜也不适宜,例如当 PMMA 厚度大于 0.7 $\mu\text{m}$  时,阈值灵敏度模型就不适用了。弦法模型假定,当显影的过程起主导作用时,在饱和显影液条件下,显

影剖面与显影过程和显影时间均有关,它对薄、厚抗蚀剂的情形均可适用。图 4 为弦法模型的原理图。图 4(a) 为显影开始时的电子抗蚀剂

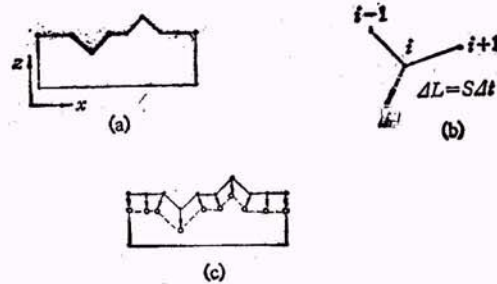


图4 弦法原理

表面,可用连接各点的直线段(称弦)表示。图 4(b) 为经过  $\Delta t$  时间的显影后,显影象从表面第  $i$  点前进至新的点  $p$ , 这前进的方向由第  $i$  点的两相邻弦之间的夹角的平分线决定。前进长度  $\Delta L$  正比于第  $i$  点的溶解度速率  $S(x_i, z_i)$ ,  $S(x_i, z_i)$  由溶解度方程决定<sup>[14]</sup>。

$$S(x_i, z_i) = B \left[ \frac{g \epsilon(x_i, z_i)}{\rho N_A} \right]^A, \quad (3)$$

对于 PMMA,  $A = 3.86$ ,  $B = 7.51 \times 10^{12} \mu\text{m}/\text{s}$  (由实验确定),  $A$  与电子抗蚀剂反差有关,  $B$  与显影温度、显影剂配比有关,  $g$  是吸收能为  $0.75 \times 10^{-2} \text{eV}$  时的化学事件数,  $\epsilon(x_i, z_i)$  为第  $i$  点处的能量密度 ( $\text{eV} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $\rho = 1.18 \text{g}/\text{cm}^3$  为质量密度,  $N_A$  为阿伏加德罗常数。图 4(c) 表示显影经过  $\Delta t$  时间间隔以后的电子抗蚀剂的剖面(虚线表示)。

由此可见,将隐象的能密度值代入弦法显

影模型中,就可得到实际的电子抗蚀剂显影象的模拟。图 5 为模拟的显影剖面 and 实验的显影剖面的对比<sup>[5]</sup>。图 5(a) 为 PMMA 厚  $1\mu\text{m}$ , 曝光  $0.5\mu\text{m}$  线宽, 电荷剂量分别为 1.0、0.8 和 0.6  $\text{pC}\cdot\mu\text{m}^{-2}$ , 相隔 20 秒的显影轮廓的理论模拟。

图 5(b) 为 PMMA 的实际的显影剖面的扫描电子显微镜照片。显影液为甲基乙丁基酮和异丙醇的等比混合物, 显影时间为 180 秒, 其它工艺条件与模拟条件相同。由图 5(a) 和图 5(b) 的比较可见, 理论模拟与实验结果一致性较好, 证

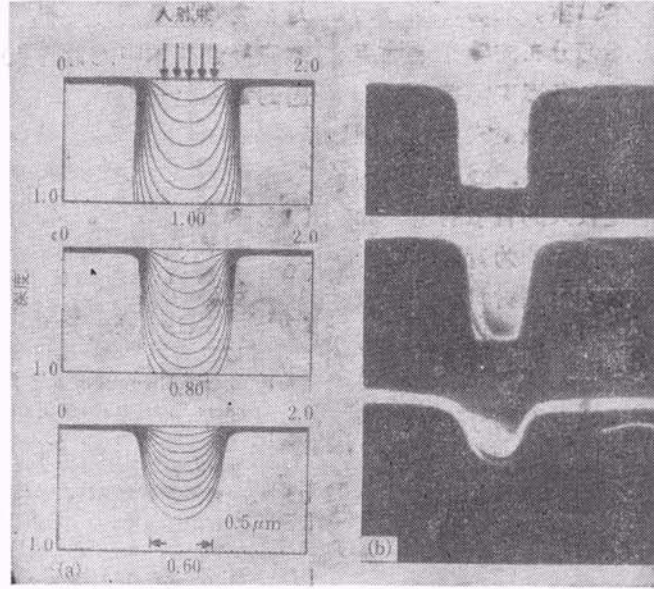


图 5 显影剖面

(a) 理论模拟的显影剖面; (b) 实验结果的显影剖面

明了蒙特卡罗模拟方法的有效性。

#### 四、内部邻近效应和外部邻近效应

邻近效应是指电子抗蚀剂中邻近地址点上电子束曝光引起显影线宽特征的变化。存在两种形式: 内部邻近效应和外部邻近效应。图 6 为邻近效应的示意图。内部邻近效应发生在同一连续的图形中, 各均匀地址点上入射相同的剂量, 但该图形中各点实际接受到的剂量并不一样。例如矩形, 其中心处接受到曝光最强, 矩形边上强度为中心的一半, 角上的强度仅为中心强度的四分之一。又如, 粗线条实际接受到较强的曝光, 故细线条要求较高的人射剂量才能和粗线条同时在相同的时间内显影出来。外部邻近效应发生在两个靠近的图形结构之间, 曝光引起两图形膨胀, 形成小桥结构, 严重时两图形沟通。显然, 孤立的线条(外部邻近效应为

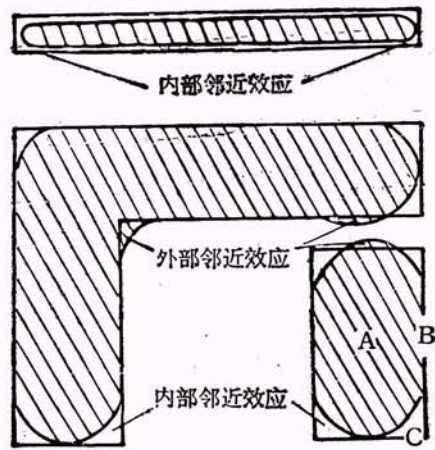


图 6 内部邻近效应和外部邻近效应

零, 内部邻近效应不为零)比靠近的线条需要更大的剂量。外部邻近效应是两图形间距的强函数, 当间距为亚微米时显得格外严重。邻近效应是电子束曝光中一个著名的物理现象。不论是内部邻近效应, 还是外部邻近效应, 都起源于

电子的散射效应。内部邻近效应是由特征图形区域本身的背散射电子引起的抗蚀剂曝光。外部邻近效应则是附近的另一特征图形区域的背散射电子引起的曝光。内部和外部邻近效应均起源于衬底的背散射。电子的正向散射和背散射是决定显影线宽的两个因素，后者比前者的展宽大。当一线条中各均匀分布的曝光地址点上的入射电子剂量相同时，各点实际接受到的电荷剂量却不同，这只能用背散射来解释。理论上和实验上都已证实了这一点。线条之间的邻近效应，显然更是展宽较大的背散射电子的贡献。邻近效应的作用距离，即为背散射电子的射程，是入射电子能量和衬底材料原子序数的函数。对于同一种衬底材料，入射能量大，射程增加。邻近效应实际是衬底背散射电子的曝光效应。十分明显，邻近效应影响分辨率。预先计算并补偿邻近效应，对于电子束光刻、特别是亚微米电子束光刻尤其重要。Chang 提出了模拟函数<sup>[46]</sup>

$$J(r) = \frac{I}{\pi} [\alpha^2 \exp(-\alpha^2 r^2) + b\beta^2 \exp(-\beta^2 r^2)], \quad (4)$$

$J(r)$  为扫描平面内距入射轴  $r$  处的电流强度， $I$  为入射电流， $\alpha$ 、 $\beta$  和  $b$  为可调整的参数。实际接受到的总有效辐照电流为

$$I_T = \int_0^\infty 2\pi J(r) dr = I(1+b) = I \frac{D_c}{Q_c}, \quad (5)$$

$b$  为增强系数， $Q_c$  为入射临界剂量， $D_c$  为实际接受到的临界剂量。模拟邻近效应就是确定合适的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $b$  和  $D_c$  参数。 $b$  为背散射电子的贡献。Chang 给出  $\alpha \approx 5-10 \mu\text{m}^{-1}$ ， $\beta \approx 0.8-1 \mu\text{m}^{-1}$ ， $b \approx 0.3-0.7$ 。

邻近效应的修正和补偿是必要的，也是可能的。Parikh<sup>[17]</sup>的等平均剂量补偿法的优点是具有唯一解，缺点是增加了计算机计算时间和过多的机器的扫描时间。Sewell<sup>[18]</sup>的变图形的

补偿法，是在一定的曝光、显影和腐蚀的条件下，改变图形形状，使显影后的图形达到所希望的尺寸。它对扫描电子束曝光系统和电子束投影系统均适用。Youngman 和 Wittels<sup>[19]</sup>的变剂量和变图形相结合的补偿方法的效果更好，但是也需要大量的计算机时间。进一步简化邻近效应补偿技术中的计算机算法，成为该领域突出的课题之一。

### 参 考 文 献

- [1] R. D. Moore et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **19** (1981), 950.
- [2] J. Kelly et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **19**(1981), 936.
- [3] J. Ballantyne, *J. Vac. Sci. Technol.*, **12**(1975), 1257.
- [4] L. F. Thompson and M. J. Bowden, *J. Electrochem. Soc.*, **120** (1973), 1722.
- [5] M. Tsuda and S. Oikawa et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **19** (1981), 259.
- [6] 孙毓平、韩阶平等, 半导体学报, **1**(1980), 335.
- [7] A. Chapiro, *Radiation Chemistry of Polymeric Vol 15 Wiley, New York*, (1963).
- [8] H. Y. Ku and L. C. Scala, *J. Electrochem. Soc.*, **116** (1969), 980.
- [9] 吴自勤, 物理, **8**(1979), 440, 552; **9**(1980), 77.
- [10] 毛允静、陈永祺, 物理, **11-3**(1982), 158.
- [11] 裴鹿成、张孝译, 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用, 科学出版社, (1980), 498.
- [12] J. S. Greeneich and T. Van Duzer, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-20-6**, (1974), 286.
- [13] D. F. Kyser and N. S. Viwanathan, *J. Vac. Technol.*, **12**(1975), 1350.
- [14] J. C. H. Phang and H. Ahmed. *IEE Proceedings, I, Solid-State and Electron Devices*, **128**, Part I, 1, (1981), 1.
- [15] A. R. Neurenther, et al., *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-26** (1979), 686.
- [16] T. H. P. Chang, *J. Vac. Sci. Technol.*, **12** (1975), 1271.
- [17] M. Parikh, Proc. 8th Int. Conf. on Electron and Zon Beam Sci. Techn., Englewood, N. J., (1978), 382.
- [18] H. Sewell, *J. Vac. Sci. Technol.*, **15**(1978), 927.
- [19] C. I. Youngman and N. D. Wittels, Development in Semiconductor Microlithography III, S. P. I. E., **135** (1978), 54.