

用于光刻胶刻蚀过程模拟的二维动态 CA 模型

周再发, 黄庆安, 李伟华, 卢 伟

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 针对光刻工艺模拟, 首次建立了光刻胶刻蚀过程模拟的 2-D 动态元胞自动机 (CA) 模型, 通过制定规则来确定模拟过程中不断更新的表面元胞, 使得模拟只需要计算表面元胞的刻蚀过程. 模型既有稳定性好的优点, 又有运算速度快的优点. 采用一些公认的光刻速率分布测试函数非常有效地模拟了光刻过程, 模型在刻蚀速率变化非常大的区域也非常稳定.

关键词: 元胞自动机; 工艺模拟; 光刻模拟; 工艺模型

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 05-0906-05

A Two Dimensional Dynamic Cellular Automata Model for Simulation of Photoresist Etching Process

ZHOU Zai-fa HUANG Qing-an LI Wei-hua LU Wei

(Key Laboratory of MEMS of the Education Ministry, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096 China)

Abstract A two dimensional dynamic cellular automata (CA) model is presented for simulation of photoresist etching process for the first time. In the dynamic model only etching front cells are processed in relevant etching steps, so the dynamic model is stable and fast. The model has been successfully tested using some well-known etch-rate distribution test functions.

Key words cellular automata; process simulation; photolithography simulation model

1 引言

随着 MEMS 结构日渐复杂, 结构尺寸进一步变小, 对工艺模拟的精度要求不断提高, 开发出合适的工艺模拟软件, 快速精确地实现对各向异性刻蚀、光刻、氧化、RIE 等 MEMS 加工工艺的模拟, 等于有了一个虚拟实验室, 这对于提高 MEMS 的设计和制造技术水平, 缩短 MEMS 产品的设计周期, 降低 MEMS 产品开发成本, 具有重要意义.

光刻是 MEMS 和 IC 加工过程中必不可少的一道工艺步骤. 模拟光刻工艺, 可以准确的描述光刻胶曝光、显影过程中一些效应对关键尺寸变化的影响. 这样设计者可以根据模拟结果, 优化版图设计, 满足关键结构设计的精度要求, 提高结构的可靠性. 另外, 依据模拟结果, 可以比较省力地查找最优工艺条件, 充分利用现有设备的潜能^[1]. 这对于光刻技术本身、IC 和 MEMS 的发展都具有促进作用. 光刻过程模拟基本上都包含下面四步: 空间成像 (Aerial image)、曝光 (Exposure)、曝光后烘烤 (Postbake)、显影 (Development), 一些光刻模拟的文献中也把显影称为刻蚀 (Etching). 空间成像模拟主要是计算衬底表面光学图像的分布, 曝光和曝光后烘烤过程的模拟, 可以得到光刻胶的刻蚀速率分布函数, 随后的刻蚀模拟中采用该刻蚀速率分

布函数得到光刻过程模拟的最终结果, 其中光刻胶刻蚀过程模拟是耗时最多的一个模拟步骤^[4], 要提高模拟速度, 提高光刻胶刻蚀过程模拟的速度是关键. 目前, 刻蚀过程的模拟主要基于 Cell removal String Ray-tracing 和 Cellular automata (CA) 四种模型^[2-6]. Cell removal 模型稳定性较高但运算速度较慢; String 模型运算速度快, 需要的内存少, 但有稳定性不够好的缺点; Ray-tracing 模型运算速度比较快, 需要的内存也比较少, 但有时初始射线选择不合适, 会导致某些区域不会被模型覆盖, 不能计算这些区域的刻蚀情况. 一方面, 与其它三种模型相比较, CA 模型有可能实现稳定性和运算速度的结合^[5]; 另一方面, 考虑到 MEMS 加工工艺模拟需要实现光刻、淀积、氧化、RIE 等多步工艺的模拟, 模拟过程中将会不断引入新的界面, 而 CA 模型采用一系列元胞组成的阵列在较低层次上代表几何体, 元胞之间只发生局部作用, 对多步工艺模拟过程中多个界面的处理比较有优势, 所以 CA 模型在光刻工艺模拟方面具有较大的潜力. 然而, 目前用于刻蚀过程模拟的 2-D 连续 CA 模型每一时间步长都要处理一些不被刻蚀的元胞, 仍然造成了计算机资源的浪费, 影响了模型的运算速度^[6], 这成为 2-D 模型推广为 3-D 模型的巨大障碍. 为了进一步提高模型的运算速度, 本文建立了光刻过程模拟

的 2-D 动态 CA 模型, 通过制定规则来确定模拟运算过程中不断更新的表面元胞, 使得模拟过程中只需要计算表面元胞的刻蚀过程, 运算量大大减少. 为了验证一种新的模型, 不论是 CA 模型还是其它模型, 能够用于光刻胶刻蚀过程的模拟, 一般采用一些公认的刻蚀速率分布测试函数对该模型进行测试^[5, 7-8], 其中模型的运算速度、稳定性、模拟得到的刻蚀形貌是基本的考察内容. 另外, 一种模型在由 2-D 模型扩展为 3-D 模型之前, 一般也要先验证 2-D 模型的效果.

本文采用一些已有的刻蚀速率分布函数非常有效地模拟了光刻胶的刻蚀过程, 验证了该模型的效果. 模型有稳定性好、运算速度快的优点, 在刻蚀速率变化非常大的区域也十分稳定. 对于 200×100 的元胞阵列, 2-D 动态 CA 模型的运算速度相对于 2-D 连续 CA 模型约有一个数量级的提高, 考虑到 3-D 模型基本上都是由 2-D 模型推广而来, 因而, 这解决了 2-D CA 模型推广为 3-D CA 模型后, 3-D CA 模型运算时间太长的的问题. 因此, 2-D 动态 CA 模型的建立对于建立 3-D 动态 CA 模型, 以及实现 MEMS 三维结构的整个加工过程的模拟和日趋重要的 IC 三维效应分析, 具有重要意义.

2 2-D 动态 CA 模型的基本思想

由于 CA 方法具有稳定性好, 精度较高的优点, 已经被用于光刻、淀积等工艺过程的模拟^[8]. 但 CA 方法模拟精度与模拟速度之间会相互制约. 例如其它条件不变, 增加元胞数目, 可以提高模拟精度, 但运算时间会增加. 要提高速度, 就要求减少元胞数目, 这样又会降低模拟精度. 此外, 目前用于光刻胶刻蚀过程模拟的 2-D 连续 CA 模型每一时间步长都要处理一些不被刻蚀的元胞, 仍然造成了计算机资源的浪费, 影响了模型的运算速度^[6]. 建立动态 CA 模型, 在每一时间步长只计算表面元胞的刻蚀过程, 有利于改善这一状况. 下面描述一下光刻胶刻蚀过程模拟的 2-D 动态 CA 模型的基本思想.

把要刻蚀的光刻胶细分成小的边长为 a 的正方形组成的阵列, 每个正方形作为 CA 的一个元胞. 在此, CA 模型采用如图 1 所示的摩尔邻域. (i, j) 元胞的刻蚀过程可以看作是由四个相邻元胞和四个对角相邻元胞流入的显影液对

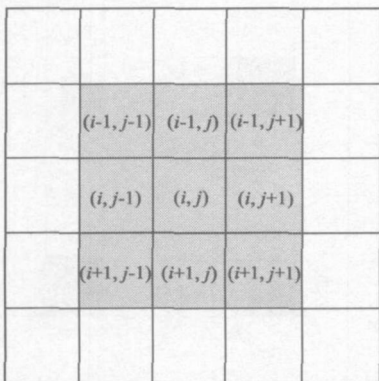


图 1 CA 的摩尔邻域

它的刻蚀, 在 $(t+T)$ ($t \geq 0$) 时刻, (i, j) 元胞的状态由 t 时刻它本身的状态和 t 时刻它邻域内元胞的状态决定. 采用相

应的二维矩阵来模拟光刻过程, 在某一时刻 t 元胞的状态 $C_{ij}(t)$ 定义为此时元胞被刻蚀面积 A_e 与整个元胞面积 A_c 的比值:

$$C_{ij}(t) = A_e / A_c \quad (1)$$

模拟过程中, 元胞的状态值 C_i 将在 0 (未刻蚀) 和 1 (完全刻蚀) 之间分布. 每个元胞的刻蚀速率 R 可以由曝光过程的模拟得到, 本文直接采用文献中曝光过程模拟得到的刻蚀速率分布测试函数, 某一元胞中心的刻蚀速率即为该元胞的刻蚀速率.

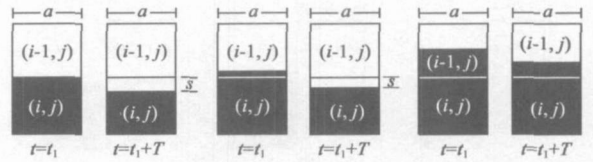


图 2 一个未被刻蚀的表面元胞的刻蚀与一个相邻元胞状态的关系. (a)、(b) 相邻元胞的状态标志为“0” (c)、(d) 相邻元胞的状态标志为“1” (e)、(f) 相邻元胞的状态标志为“2”

每个表面元胞都具有部分被刻蚀的相邻元胞或完全被刻蚀的相邻元胞, 如果只考虑如图 2 所示的两个相邻元胞的计算, 设 R_{ij} 为 (i, j) 元胞的刻蚀速率, 模拟的时间步长为 T , 则在 $t = t_1$ 时刻, 如图 2(a) 所示, (i, j) 元胞的状态值为:

$$C_{ij}(t_1) = 0 \quad (2)$$

而在 $t = t_1 + T$ 时刻, 如图 2(b) 所示, (i, j) 元胞的状态值变为:

$$C_{ij}(t_1 + T) = aR_{ij}T/a^2 = R_{ij}T/a \quad (3)$$

然而实际的情况会比这复杂得多, 不但邻居数目增多, 而且邻居的状态也更多样. 在建立的动态 CA 模型中, 模拟过程只计算表面元胞的刻蚀过程. 一个体内元胞成为表面元胞的条件是, 该元胞的 8 个相邻元胞中至少有一个元胞已经被刻蚀. 在此, 采用与状态值有关, 且不同于状态值的四种状态标志: “0”、“1”、“2”、和“3”, 来表示元胞相对于刻蚀界面及与相邻元胞状态的关系:

“0”表示元胞已经被完全刻蚀

“1”表示元胞是表面元胞, 即该元胞周围八个相邻元胞至少有一个元胞已经被刻蚀, 且元胞本身状态值满足 $1 > C_{ij} > (1 - R_{ij}T/a)$.

“2”表示元胞是表面元胞, 即该元胞周围八个相邻元胞至少有一个元胞已经被刻蚀, 且元胞本身状态值满足 $0 \leq C_{ij} \leq (1 - R_{ij}T/a)$.

“3”表示元胞是体内元胞, 即该元胞周围八个相邻元胞都未被刻蚀.

根据在某一时间步长 t_1 时, 一个表面元胞 (i, j) 的状态与邻域内表面元胞状态的关系, 可逐步推出表面元胞 (i, j) 状态改变的规则. 最为简单的情况之一便是如图 2(a) 所示, 状态标志为“2”的 (i, j) 元胞的一个相邻元胞的状态标志为“0”, 则 (i, j) 元胞的状态在下一时间步长的状态改变由公式 (3) 决定. 状态标志为“2”的表面元胞的一个相邻元胞的状态标志为“1”时, 如图 2(c) 所示, 在一个时间步长

内, $(i-1, j)$ 元胞会被全部刻蚀, (i, j) 元胞的状态将会改变:

$$C_{ij}(t_1 + T) = \frac{R_{ij}T}{a} - \frac{R_{ij}(1 - C_{i-1,j}(t))}{R_{i-1,j}} \quad (4)$$

状态标志为“2”的表面元胞的一个相邻元胞的状态标志也为“1”时,如图 2(e)所示,此时完全刻蚀 $(i-1, j)$ 元胞的时间仍可用公式(3)计算,但在这一时间步长内, $(i-1, j)$ 元胞的刻蚀不会影响 (i, j) 元胞的状态,即 (i, j) 元胞的状态不变:

$$C_{ij}(t_1 + T) = C_{ij}(t_1) = 0 \quad (5)$$

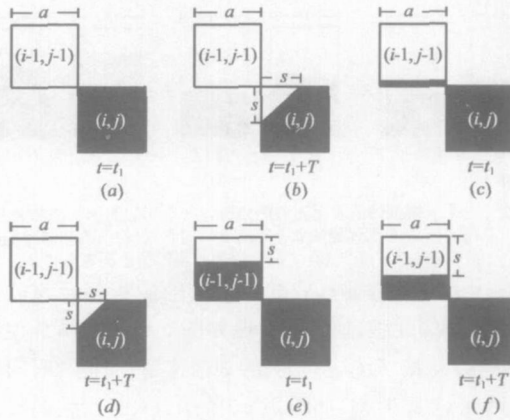


图3 一个未被刻蚀的表面元胞的刻蚀与一个对角相邻元胞状态的关系。(a)、(b) 对角相邻元胞的状态标志为“0”; (c)、(d) 对角相邻元胞的状态标志为“1”;(e)、(f) 对角相邻元胞的状态标志为“2”

与相邻元胞的情况类似,对于元胞的对角相邻元胞,如图 3所示,当状态标志为“2”的表面元胞的一个对角相邻元胞的状态标志为“0”时,如图 3(a)、(b)所示, (i, j) 元胞的状态改变为: $C_{ij}(t_1 + T) = D \frac{R_{ij}^2 T^2}{2a^2}$ (6)

由于显影液由对角相邻元胞流入是间接流入,而由相邻元胞流入是直接流入,所以选择一个参数 D 作为修正值,来描述这种间接流入与直接流入的差异。

状态标志为“2”的表面元胞 (i, j) 的一个对角相邻元胞的状态标志为“1”时,如图 3(c)、(d)所示。那么在这一时间步长内 $(i-1, j)$ 元胞的刻蚀会影响 (i, j) 元胞的状态:

$$C_{ij}(t_1 + T) = D \frac{(1/2)R_{ij}^2(T - t_b)^2}{a^2} = D \frac{R_{ij}^2(T - a(1 - C_{i-1,j}(t)))R_{i-1,j}^2}{2a^2} \quad (7)$$

状态标志为“2”的表面元胞的一个对角相邻元胞的状态标志也为“2”时,那么在这一时间步长内 $(i-1, j)$ 元胞的刻蚀不会影响 (i, j) 元胞的状态,即 (i, j) 元胞的状态不变,如图 3(e)、(f)所示。

此外,还需考虑某一表面元胞具有两个相邻元胞的情况。当两个相邻元胞的状态标志都为“3”或者“2”时或者一个为“2”一个为“3”时,根据上面的分析,在当前时间步长内, (i, j) 元胞的状态不会因为 $(i-1, j)$ 元胞和 $(i, j+1)$ 元胞的影响而改变。如果两个相邻元胞的状态标志一个为“3”

一个为“1”、一个为“3”一个为“0”,或者一个“2”一个为“1”时,可以分别等效于前面一个相邻元胞的情况。当两个相邻元胞的状态标志都为“1”、都为“0”,或者一个为“1”一个为“0”,则会出现交叠现象。两个相邻元胞的状态标志都为“1”,如图 4(e)、(f)所示,结合前面的分析,可以得出 (i, j) 元胞的状态改变公式为:

$$C_{ij}(t_1 + T) = \frac{s_1 a + s_2 a - s_1 s_2}{a^2} = \frac{aR_{ij}(T - t_{b1}) + aR_{ij}(T - t_{b2}) - R_{ij}^2(T - t_{b1})(T - t_{b2})}{a^2} \quad (8)$$

同理可得:

$$C_{ij}(t_1 + T) = \left\{ \frac{R_{ij}T}{a} - \frac{R_{ij}(1 - C_{i-1,j}(t))}{R_{i-1,j}} \right\} + \left\{ \frac{R_{ij}T}{a} - \frac{R_{ij}(1 - C_{i,j+1}(t))}{R_{i,j+1}} \right\} - ((R_{ij}^2(T - a(1 - C_{i-1,j}(t)))R_{i-1,j})(T - a(1 - C_{i,j+1}(t)))R_{i,j+1})/a^2) \quad (9)$$

当两个相邻元胞的状态标志一个为“1”一个为“0”时,如图 4(c)、(d)所示,此时只是公式(8)中的 t_b 的值为 0 此时有

$$C_{ij}(t_1 + T) = \frac{R_{ij}T}{a} + \left\{ \frac{R_{ij}T}{a} - \frac{R_{ij}(1 - C_{i,j+1}(t))}{R_{i,j+1}} \right\} - \frac{R_{ij}^2(T/R_{i-1,j}(T - a(1 - C_{i,j+1}(t)))R_{i,j+1})}{a^2} \quad (10)$$

而当两个相邻元胞的状态标志都为“0”时,如图 4(a)、(b)所示。则此时公式(8)中的 t_{b1} 、 t_{b2} 都为 0

$$C_{ij}(t_1 + T) = \frac{2sa - s^2}{a^2} = \frac{2aR_{ij}T - R_{ij}^2 T^2}{a^2} \quad (11)$$

对于有两个对角相邻元胞的情况,独立考虑两个对角相邻元胞,由此带来的误差可以忽略。

3 2-D 动态 CA 模型的建立

模型中在 $(t_1 + T)$ ($t_1 \geq 0$) 时刻,一个元胞的状态根据

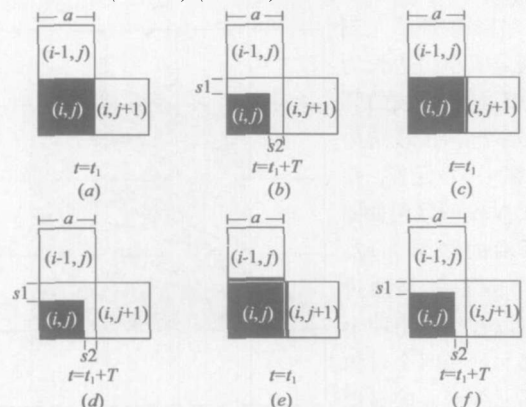


图4 一个未被刻蚀的表面元胞的刻蚀与两个相邻元胞状态的关系。(a)、(b) 两个对角相邻元胞的状态标志都为“0”;(c)、(d) 两个对角相邻元胞的状态标志一个为“0”一个为“1”;(e)、(f) 两个对角相邻元胞的状态标志都为“1”

t_i 时刻它本身的状态和 t_i 时刻它邻域元胞的状态决定, 所以当 $C_{ij}(t_i) \neq 0$ 时, 上一节推出的求 $C_{ij}(t_i + T)$ 的公式都要再加上 $C_{ij}(t_i)$ 的值. 由于模型采用如图 1 所示的摩尔邻域, 根据上面推导出来的各个方程, 考虑时间步长推进过程, 进而考虑到前面讨论的相邻元胞和对角相邻元胞对 (i, j) 元胞的刻蚀过程的影响不一样. 元胞自动机的规则可以描述为:

$$C_{ij}(t+T) = C_{ij}(t) + F_1(C_{i-1,j}(t), C_{i,j-1}(t), C_{i,j+1}(t), C_{i+1,j}(t)) + F_2(C_{i-1,j-1}(t), C_{i-1,j+1}(t), C_{i+1,j-1}(t), C_{i+1,j+1}(t)) \quad (12)$$

模型中某个表面的刻蚀过程要考虑的邻域内元胞的数目最多可达 8 个, 这 8 个元胞可分为相邻元胞和对角相邻元胞两类. 根据前面的分析以及经验可知^[7], F_2 的值可直接由公式 (6) 和公式 (7) 计算, 且随着对角相邻元胞数目的增加, F_2 的计算只是个逐个相加的问题. 而随着相邻元胞数目的增加 F_1 的计算不是简单的逐个相加的问题, 这时还要考虑如何减去重叠部分, 如式 (9) 和式 (10). 由于每个元胞有状态标志, 因而根据相邻元胞的状态标志, 很容易解决这个问题. 对于时间步长 T 的值, 一个较好的选择为 $T = a/4R_{max}$ ^[8], 其中 R_{max} 为元胞的最大刻蚀速率. 经验参数 D 的值取 0.18

把要刻蚀的光刻胶细分成小的边长为 a 的正方形组成的阵列, 每个正方形被看作 CA 的一个元胞, 采 $n \times m$ 矩阵来代表正方形元胞阵列. 模拟开始时, 通过改变某些元胞的初始值作为初始条件, 随着光刻模拟的进行, 不断有新的表面元胞产生, 利用指针数组来指向这些下一时间步长将要计算的表面元胞. 图 5 为 2-D 动态 CA 模型模拟程序的流程图.

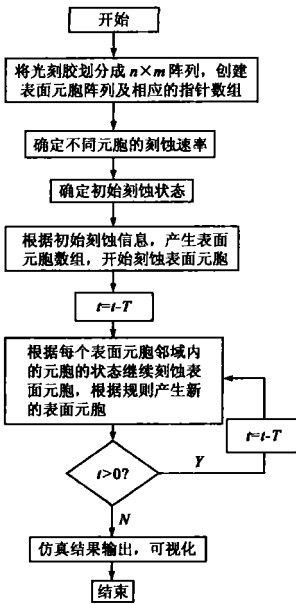


图 5 2-D 动态 CA 模型模拟程序的流程图

4 模拟与讨论

一方面, 为了验证上面建立的 2-D 动态 CA 模型能够用于光刻过程的模拟; 另一方面, 一种模型在由 2-D 模型扩展为 3-D 模型之前, 一般要先验证 2-D 模型的效果. 下面采用一些通用的刻蚀速率分布测试函数^[8,9]模拟光刻过程, 验证 2-D 动态 CA 的效果, 其中模型的运算速度、稳定性、模拟得到的刻蚀形貌是基本的考察内容. 首先采用的一个刻蚀速率分布函数为:

$$R_{(x,z)} = \exp(-4x^2) \mu\text{m s}^{-1} \quad (13)$$

公式中 x 为沿衬底表面的距离, z 为光刻胶的深度, 式 (13) 表明刻蚀速率在 z 轴方向不变. 把 $2\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 光刻胶细分成 200×100 的元胞阵列, 某一元胞中心的刻蚀速率作为该元胞的刻蚀速率, 相应的模拟结果如图 6 所示, 图中黑色区域为被刻蚀部分.

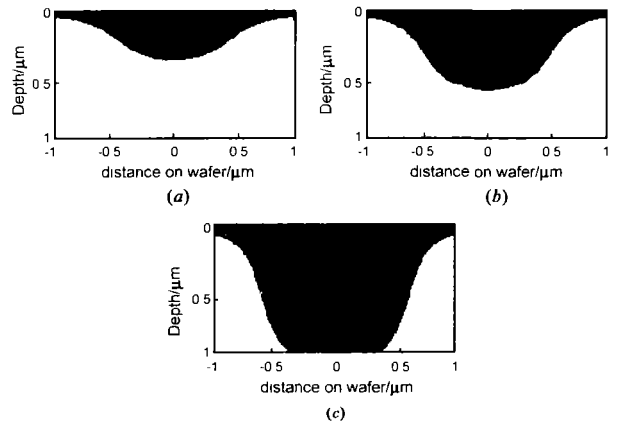


图 6 刻蚀速率分布函数为公式 (13) 时得到的模拟结果 (a)、(b)、(c) 为刻蚀过程中不同时刻的相应模拟结果

式 (13) 没有考虑到实际曝光过程中的驻波效应 (Standing waves). 当光 90° 射入衬底表面, 反射光会穿过光刻胶, 和入射光干涉造成增强/减弱, 使光刻胶有些区域曝光能量高, 某些区域能量低, 刻蚀速率分布出现波动, 显影后光刻胶侧壁呈波浪状^[10]. 一个由光刻胶的曝光过程模拟得到的刻蚀速率分布函数:

$$R_{(x,z)} = \exp(-4x^2) (1.05 - \cos(12\pi z)) \mu\text{m s}^{-1} \quad (14)$$

光刻胶的厚度为 $1\mu\text{m}$ 时, 采用式 (14) 得到的模拟结果如图 7 所示. 模拟结果表明, 在刻蚀速率变化相当快的区域, 模型依然十分稳定. 需要指出, 上面采用的是刻蚀速率分布测试函数, 在实际的光刻工艺中, 采用一些减小驻波的方法, 光刻胶边缘驻波的横向幅度要远小于于如图 7 模拟结果的横向幅度.

利用文献[9]提供的 Shipley SNR 248 负性化学放大胶曝光、后烘模型及参数, 采用光刻胶刻蚀过程模拟的 2-D 动态 CA 模型模拟光刻胶刻蚀过程, 其中曝光能量密度为

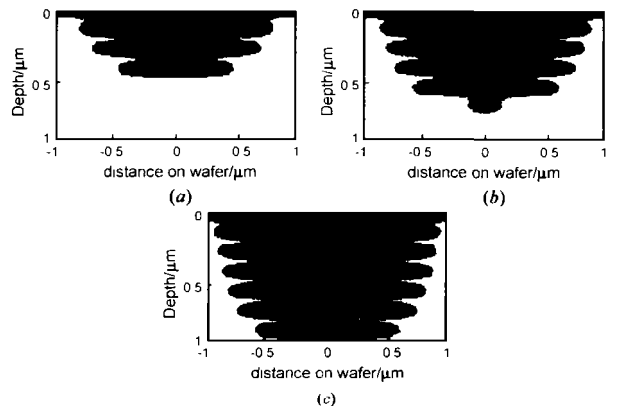


图 7 刻蚀速率分布函数为公式 (14) 时得到的模拟结果 (a)、(b)、(c) 为刻蚀过程中不同时刻的相应模拟结果

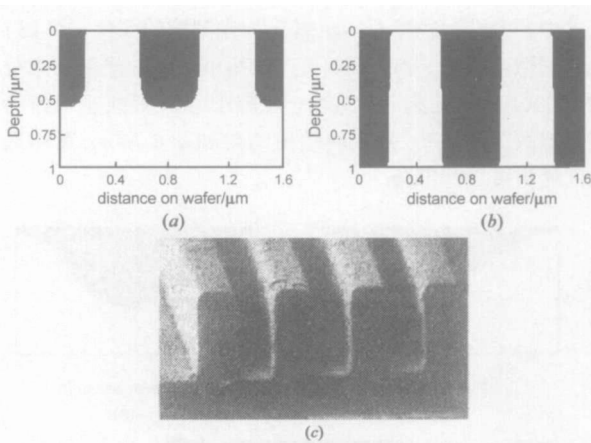


图8 Shipley SNR-248负化学放大胶光刻过程的模拟结果与实验结果,曝光能量密度为 $30\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。(a)、(b)为对应于不同的刻蚀时间的模拟结果;(c)为相应的实验结果^[9]。

$30\text{mJ}/\text{cm}^2$,后烘温度和后烘时间分别为 130°C 和 60s 对应于不同显影时间的模拟结果如图8(a)、(b)所示,模拟结果与如图8(c)所示的实验结果^[9]一致。

在Pentium III/833MHz计算机上编程实现2-D动态CA模型对光刻胶刻蚀过程的模拟,采用两种最常用的刻蚀速率测试函数对建立的2-D动态CA模型进行了测试,模型在刻蚀速率变化相当快的区域,依然十分稳定。把 $2\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 光刻胶细分成 100×50 的元胞阵列,2-D动态CA模型运算时间为 2.1s 而相同条件下,2-D连续CA模型的运算时间约为 11.1s 当同样的光刻胶划分为 200×100 的元胞阵列时,2-D动态CA和2-D连续CA模型的运算时间分别约为 8.0s 和 84.3s 当同样的光刻胶划分为 400×200 的元胞阵列时,2-D动态CA和2-D连续CA模型的运算时间分别为 29.6s 和 638.2s 这是由于2-D连续CA模型在模拟过程中需要处理所有元胞,且考虑到模型的时间步长与元胞尺寸成反比关系,因而2-D连续CA模型的模拟速度与 n^3 成正比关系, n 为某个方向上元胞的数目。相对于2-D连续CA模型,2-D动态CA模型只处理与显影液接触的表面元胞,而刻蚀过程中,光刻胶与显影液的接触界面是曲线,因而在同样的条件下,2-D动态CA模型的模拟速度与 n^2 成正比关系。这样,2-D动态CA模型的建立,基本消除了由2-D模型推广为3-D模型后运算时间太长的障碍。

5 结束语

本文针对光刻过程模拟,首次建立了2-D动态CA模型,模拟过程中只需要计算表面元胞的刻蚀过程。模型具有稳定性好、运算速度快的优点。利用文献中给出的一些光刻速率分布测试函数,有效地模拟了光刻过程,验证了该模型的效果。相对于2-D连续CA模型,2-D动态CA模型在运算速度上约有一个数量级的提高,这样基本解决了由2-D模型推广为3-D模型后模型运算时间太长的障碍。这对于实现MEMS三维结构的整个加工过程的模拟以及

日显重要的IC三维效应分析,具有重要意义。

致谢 感谢Democritus大学的Karafyllidis I博士与作者进行了有益的讨论,并对比较动态CA模型和连续CA模型提供了帮助。

参考文献:

- [1] Cole D C, Barouch E, Conrad E D, et al Using advanced simulation to aid micro lithography development [J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(8): 1194-1213
- [2] Jewett R E, Hagouel P I, Neureuther A R, et al Line profile resist development simulation techniques [J]. Polymer Engineering Science, 1977, 17(6): 381-384
- [3] Hagouel P I, Neureuther A R. Modeling of X-ray resists for high resolution lithography [J]. ACS Organic Coating and Plastics Preprints 1975, 35(2): 258-265.
- [4] Dill F H, Neureuther A R, Tuttle J A, et al Modeling projection printing of positive photoresist [J]. IEEE Transactions on Electron Devices 1975, ED-22(9): 456-464
- [5] Scheckler E W, Tam N N, Pfau A K, et al An efficient volume removal algorithm for practical three-dimensional lithography simulation with experimental verification [J]. IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems 1993, 12(9): 1345-1356
- [6] Karafyllidis I, Thanailakis A. Simulation of two-dimensional photoresist etching process in integrated circuit fabrication using cellular automata [J]. Modeling Simulation and Material Science Engineering 1995 3(5): 629-642
- [7] Toh K K H, Neureuther A R, Scheckler E W. Algorithms for simulation of three-dimensional etching [J]. IEEE Transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems 1994 13(5): 616-624
- [8] Karafyllidis I, Hagouel P I, Thanailakis A, et al An efficient photoresist development simulator based on cellular automata with experimental verification [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 2000 13(1): 61-75
- [9] Ferguson R A. Modeling and simulation of reaction kinetics in advanced resist processes for optical lithography [D]. California University of California Berkeley, 1991
- [10] Campbell S A. 微电子制造科学原理与工程技术 (M). 曾莹, 严利人, 王纪民, 等. 译. 北京: 电子工业出版社, 2002

作者简介:

周再发 男, 1978年12月出生于湖南省蓝山县, 东南大学电子工程系微电子学与固体电子学专业博士。目前主要从事微电子与机械加工工艺的模拟研究。E-mail: zhouzaif@ yahoo.com.cn

黄庆安 男, 1963年1月出生于河南省洛阳市, 东南大学电子工程系长江学者特聘教授, 博士生导师。主要从事MEMS相关研究, 已经在国内外发表SCI/EI论文100余篇。