

结合实际刻蚀数据的离子刻蚀产额优化建模方法

高扬福 孙晓民 宋亦旭 阮聪

An optimization method for ion etching yield modeling combined with factual etching data

Gao Yang-Fu Sun Xiao-Min Song Yi-Xu Ruan Cong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 248201 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.248201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于刻蚀速率匹配的离子刻蚀产额优化建模方法

[An optimization method for ion etching yield modeling based on etching velocity matching](#)

物理学报.2014, 63(4): 048201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.048201>

基于压缩表示的离子刻蚀仿真三维表面演化方法

[A 3D profile evolution method of ion etching simulation based on compression representation](#)

物理学报.2013, 62(20): 208201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.208201>

基于三维元胞模型的刻蚀工艺表面演化方法

[A three-dimensional surface evolution algorithm based on cellular model for etching process](#)

物理学报.2013, 62(10): 108201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.108201>

染料敏化太阳能电池内部光路折转对电子传输特性的影响

[Effect of light path folding on the properties of electron transport in dyesensitized solar cell](#)

物理学报.2012, 61(16): 168201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.168201>

晶粒生长演变相场法模拟界面表达的物理模型

[A physical model to express grain boundaries in grain growth simulation by phase-field method](#)

物理学报.2011, 60(6): 068201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.068201>

# 结合实际刻蚀数据的离子刻蚀产额优化建模方法\*

高扬福 孙晓民 宋亦旭† 阮聪

(清华大学计算机科学与技术系, 智能技术与系统国家重点实验室, 清华大学信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

(2014年5月19日收到; 2014年8月10日收到修改稿)

刻蚀表面仿真是研究等离子体刻蚀工艺过程机理的重要手段. 在刻蚀表面仿真方法中, 刻蚀表面演化模型和离子刻蚀产额模型直接决定了刻蚀表面演化结果. 但现有的刻蚀表面演化模型不够精确, 且目前离子刻蚀产额模型主要来自分子动力学仿真和物理实验, 而实际加工过程十分复杂, 等效的离子刻蚀产额包含很多因素. 针对这些问题, 首先对当前的刻蚀表面演化模型进行改进, 同时重新定义了离子刻蚀产额模型的优化目标, 并利用实际刻蚀加工数据来优化离子刻蚀产额模型. 为缩短优化模型所用时间, 采用并行方法来加速优化过程. 最后, 将得到的离子刻蚀产额模型参数应用于采用元胞自动机法的刻蚀工艺实际仿真过程中. 实验结果表明, 该优化建模方法确实提高了仿真的精确度, 同时优化过程所用时间也大大减少.

**关键词:** 实际刻蚀数据, 刻蚀产额模型, 刻蚀速率, 多目标进化算法

**PACS:** 82.20.Wt, 81.65.Cf, 81.16.-c

**DOI:** 10.7498/aps.63.248201

## 1 引言

微电子产业的迅猛发展带动了对半导体芯片制造技术的深入研究. 在半导体芯片制造过程中, 刻蚀工艺则发挥了重要的作用. 目前主要有两种刻蚀工艺: 湿法刻蚀和等离子体刻蚀. 随着刻蚀特征尺寸越来越小, 相比于湿法刻蚀, 等离子体刻蚀工艺不仅有良好的特征尺寸控制, 而且有良好的侧壁形貌. 然而, 等离子体刻蚀工艺机理非常复杂, 在刻蚀过程中直接受到多种刻蚀工艺控制参数的影响. 为获取符合条件的刻蚀工艺控制参数, 传统的解决方法是“试错”, 通过多次实验找到合适的控制参数, 但成本高且耗时长. 随着计算机仿真技术的兴起, 刻蚀工艺可以依靠仿真技术求取刻蚀工艺参数, 但是需要模拟刻蚀表面演化过程. 因此, 如何构建合适的刻蚀工艺模型是仿真技术研究的重点.

目前模拟刻蚀表面演化过程的方法中应用最广的是元胞自动机法<sup>[1,2]</sup>. 元胞自动机法在物理其他领域也有着广泛的应用<sup>[3,4]</sup>. 与线算法<sup>[5,6]</sup>和水

平集方法<sup>[7,8]</sup>相比, 元胞自动机法可以在演化规则中考考虑理化作用从而利于机理研究. 然而, 由于对一些演化规则缺少认知, 当前的元胞自动机法在模拟特定工艺条件下的刻蚀过程时与实验结果相差甚远. 因此, 分析刻蚀工艺实际结果, 加深对演化规则的研究, 有助于更精确地模拟刻蚀表面演化过程.

离子刻蚀产额模型作为演化过程的一个重要模型, 直接决定刻蚀表面仿真的形貌. 因此构建合适的离子刻蚀产额模型并求取模型参数, 对刻蚀表面演化过程很有意义. 目前有三类方法被用于求取离子刻蚀产额模型参数: 基于实验的方法、基于仿真的方法以及实验与仿真相结合的方法. 基于实验的方法是离子轰击实验法<sup>[9]</sup>; 基于仿真的方法是分子动力学方法<sup>[10]</sup>. 由于实验的局限性, 两种仿真方法都没能很好结合实际加工环境, 因此所求得的离子刻蚀产额模型往往只能体现某种趋势, 而非实际的刻蚀过程.

实验与仿真相结合的方法是基于刻蚀速率匹

\* 国家重大科技专项(批准号: 2011ZX2403-002)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: songyixu@163.com

配的离子刻蚀产额优化建模方法<sup>[11]</sup>. 目前优化方法已被多次应用于物理过程<sup>[12,13]</sup>. 而在进行刻蚀仿真过程之前, 已经有大量的刻蚀实验积累并被应用于演化规则的分析研究. 基于这些实验数据, 可以采用优化算法优化相应的目标函数来求取离子刻蚀产额模型参数. 与其他两种方法相比, 该方法可以克服没有利用实际刻蚀数据的缺点. 然而, 随着不同宽度刻蚀剖面数量的增加, 该方法优化目标的数量也增加, 导致最优可行解的数目急剧增加, 大大增加了寻找最优解的难度<sup>[14]</sup>. 同时, 目前应用于优化的实际刻蚀数据只有初始时刻刻蚀条件, 各个时刻的刻蚀剖面信息均是通过仿真方法获取的, 因而求取的实际刻蚀速率缺少实验数据的支持. 另外, 在运行时间上, 特别是数据量大的情况下, 所采用的多目标优化算法相当耗时.

本文的工作是在基于刻蚀速率匹配的离子刻蚀产额优化建模方法的基础上完成的. 为了解决该方法所面临的问题, 本文首先对当前的刻蚀表面演化模型进行改进, 研究不同掩膜形状对刻蚀表面演化模型造成的影响. 同时重新定义了离子刻蚀产额模型的优化目标, 并利用实际刻蚀加工数据来优化离子刻蚀产额模型. 为缩短优化模型所用时间, 本文采用并行方法来加速优化过程. 最后, 将得到的刻蚀产额模型参数应用于基于元胞自动机的刻蚀工艺实际仿真过程中.

## 2 离子刻蚀产额优化建模

文献<sup>[11]</sup>中已经详细讨论了如何利用基于刻蚀速率匹配的离子刻蚀产额优化建模方法来求取离子刻蚀产额模型参数. 然而, 由引言内容可知该方法仍有不少缺陷, 以下对其缺陷进行相应的改进.

### 2.1 掩膜形状对刻蚀表面演化模型的影响

在利用元胞自动机法模拟刻蚀过程时<sup>[15]</sup>, 为减少计算复杂度, 所使用的掩膜侧壁形状均为为竖直, 不考虑掩膜形状对刻蚀表面演化的影响, 如图<sup>1</sup>所示.

然而, 随着刻蚀硅片的宽度增大, 仿真结果与刻蚀实验结果差距越来越大. 在刻蚀实验结果中, 底部两侧会出现角度越来越大的尖角, 而仿真结果

中, 底部只存在极细的尖角, 如图<sup>2</sup>所示. 而且在整个演化过程保持掩膜侧壁竖直的条件下, 修改其他与实验条件相关的刻蚀工艺参数, 对仿真结果影响不大. 因此, 在模拟宽度较大的刻蚀剖面演化过程中, 如果掩膜侧壁始终保持竖直状态时, 就无法模拟出与实验结果相符的沟槽形状.

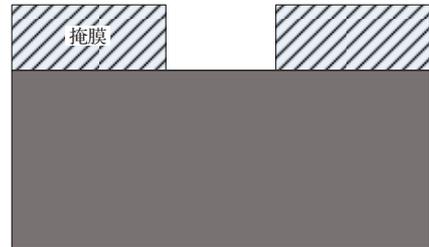


图1 刻蚀表面演化模型的初始状态

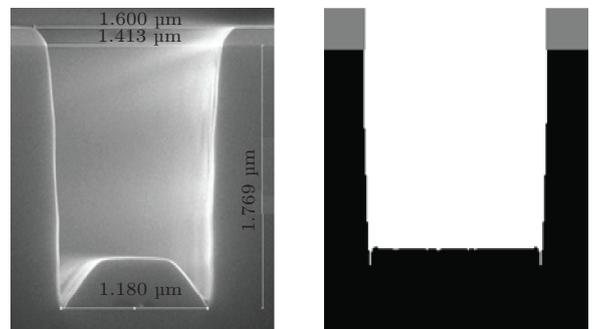


图2 实际刻蚀表面结果与仿真结果对比

在实际刻蚀过程之前, 会先加工掩膜侧壁, 使之保持一定的倾斜角. 这样当离子入射到侧壁时, 能够通过反射充分地入射到沟槽底部两侧. 同时在刻蚀过程中, 随着刻蚀深度的加大, 掩膜侧壁受到离子的不断轰击, 会出现掩膜退缩现象, 使得掩膜侧壁倾斜角逐渐变小. 由于倾斜角度的变化与刻蚀时间有关, 我们定义公式<sup>(1)</sup>求取掩膜倾斜角, 以反映演化过程倾斜角的变化情况:

$$\theta = \begin{cases} \theta_0 - \alpha t & (t < \theta_0/\alpha), \\ 0 & (t \geq \theta_0/\alpha), \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\theta_0$  是掩膜侧壁初始倾斜角,  $t$  是刻蚀时间,  $\alpha$  是用于调整倾斜角的参数.

因此, 在原来刻蚀表面演化模型的基础上, 我们考虑掩膜侧壁形状对表面演化过程的影响, 整个流程如图<sup>3</sup>所示. 首先, 在初始化模型时使侧壁与初始刻蚀表面呈一定角度; 然后在每执行一定步数之后, 利用<sup>(1)</sup>式调整相应掩膜侧壁的倾斜角.

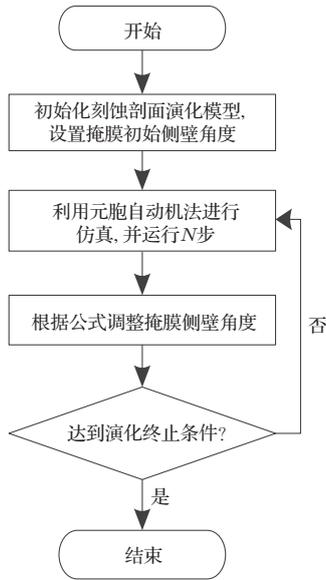


图3 考虑掩膜形状的刻蚀表面演化模型流程

## 2.2 利用刻蚀实验结果求取刻蚀速率

### 2.2.1 设计刻蚀加工实验

正确求取刻蚀表面选定点的实际刻蚀速率是离子刻蚀产额优化模型的关键。原来求取刻蚀速率的方法<sup>[11]</sup>是根据实验的初始条件, 利用水平集方法求取刻蚀表面选定点的刻蚀速率。然而由于水平集方法的局限性, 求取的刻蚀速率与实际刻蚀速率误差最大时会相差一个数量级, 严重影响后面的优化过程。

相比原先求取刻蚀速率的工作, 本文利用实际

刻蚀加工数据来求取刻蚀表面选定点的刻蚀速率。由于刻蚀实验耗时长, 代价高, 因此出于所求刻蚀速率的精确性和整个实验的成本的需求, 应该设计合理高效的刻蚀实验。

为求取刻蚀表面点的刻蚀速率, 首先需要获取刻蚀过程不同时刻的刻蚀剖面。但是, 在实际等离子体刻蚀加工过程中, 对于同一个刻蚀硅片, 无法通过每隔一段时间就用扫描电镜扫描的方式来获取不同时刻的刻蚀剖面图片。因为在每次使用扫描电镜扫描之前, 都需要对硅片进行相应的处理, 从而使得下一次的刻蚀环境与上一次不同。为克服这个问题, 本文选用多个相同材质和尺寸的硅片, 并在刻蚀前对其进行相同的预处理, 然后在相同的刻蚀环境下对不同编号硅片刻蚀不同的时间。由于环境一致, 通过这个方法可以近似重现一个硅片在不同时刻的刻蚀形貌, 因此综合这些硅片的刻蚀剖面结果可作为同一个硅片在不同时刻的刻蚀结果, 如图4所示。

### 2.2.2 求取表面选定点刻蚀速率

对于同一刻蚀宽度不同时刻的刻蚀剖面, 通过图像处理方法提取相应刻蚀线于同一个图片上并表示成元胞模型, 如图5所示。在元胞模型中, 被刻蚀线占据的元胞, 其属性设成1; 未被刻蚀线占据的元胞, 其属性设成0。下面我们利用该模型求取刻蚀线上选定点的刻蚀速率。

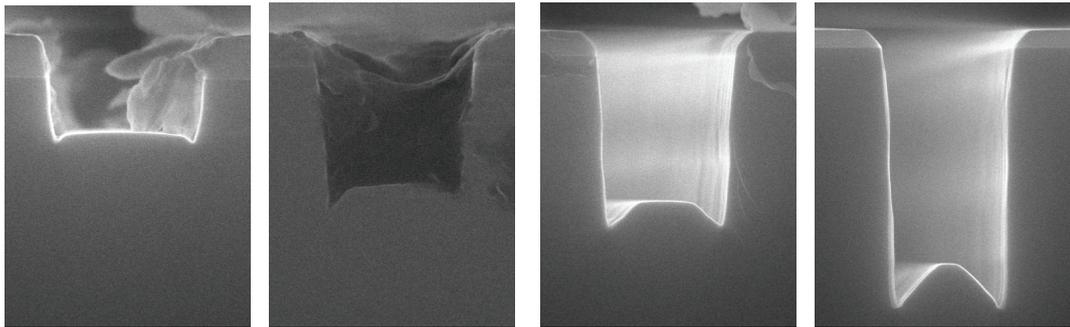


图4 硅片在1, 2, 3, 4.5 min时的刻蚀剖面

对于如图6所示的元胞化刻蚀模型, 为求取刻蚀表面选定点 $O$ 的实际刻蚀速率, 需要知道两个信息: 点 $O$ 的法向量和点 $O$ 沿法向量方向与下一时刻刻蚀线的交点 $O'$ 。法向量的求取可通过拟合点 $O$ 一定距离范围内的被占据元胞, 然后根据得到的表达式来获得。而对于交点 $O'$ , 由于刻蚀线上点的

分布并没有特定规律, 因此直接求取其位置。传统的解决方法是让点 $O$ 沿着法向量以一定步长前进, 直到与下一时刻刻蚀线相交, 该交点即为 $O'$ 点。当元胞模型较大时, 该方法效率较低。下面介绍一种二分法用于快速求取 $O'$ 点位置。

首先, 在沿着法向量方向足够长的位置寻找一

点 $Y$ 使之位于刻蚀线下方, 并设点 $X$ 为点 $O$ . 然后取 $X$ 和 $Y$ 的中点 $Z$ , 判断 $Z$ 点是否位于刻蚀线上. 如果是, 则 $Z$ 点即为所求的点 $O'$ ; 如果 $Z$ 点位于刻蚀线的下方, 令 $Y$ 为 $Z$ 点, 否则令 $X$ 为 $Z$ 点. 重复条件判断过程, 直到找到点 $O'$ .

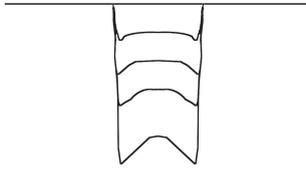


图5 从相应刻蚀剖面提取的刻蚀线

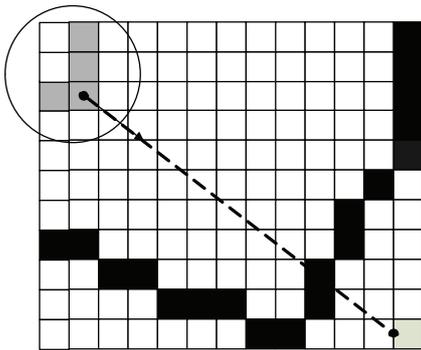


图6 元胞化刻蚀模型

由于刻蚀速率本身很小, 因此可以采用(2)式来近似求取 $O$ 点刻蚀速率:

$$v_o = \frac{OO'}{\Delta t}, \quad (2)$$

其中 $OO'$ 是 $O$ 点到 $O'$ 的距离,  $\Delta t$ 是两个刻蚀线的时间间隔.

在选取刻蚀表面选定点上, 如果在刻蚀线上均匀选取点作为选定点, 很难反映整个刻蚀线上刻蚀速率的分布情况, 尤其是在沟槽底部两端, 不同分布选取点所求得的刻蚀速率相差很大. 因此, 为能精确表征刻蚀速率情况, 不同区域选取点的密度不同, 应重点选取刻蚀线上刻蚀速率变化较大的位置.

### 2.3 离子刻蚀产额优化目标

在等离子体刻蚀加工过程, 可以通过最小化实际刻蚀速率和模拟刻蚀速率之间的误差来求取最优离子刻蚀产额模型参数. 文献[11]给出一种离子刻蚀产额优化目标函数:

$$f(x) = (e_1(x), e_2(x), \dots, e_p(x)), \quad (3)$$

其中 $e_i(x)$ 是指第 $i$ 个宽度下不同刻蚀线上实际刻蚀速率和模拟刻蚀速率之间的误差.

该离子刻蚀产额优化目标函数综合考虑不同 $e_i(x)$ , 这对于寻找在整个刻蚀工艺加工过程的最优参数是非常重要的. 然而, 随着目标数目的增加, 最优可行解的数目也相应增加, 致使大量随机生成的解都有可能成为最优可行解, 具体概率如图7所示, 从而大大增加了从一堆最优可行解中找到符合条件的最优解的难度.

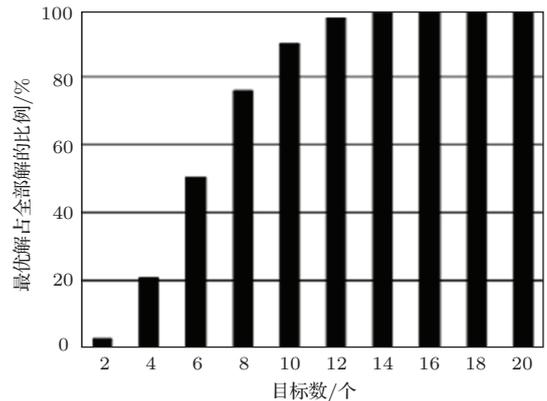


图7 最优解所占比例随目标数变化<sup>[14]</sup>

事实上, 为了考察全体刻蚀剖面误差情况, 还重点研究了单个刻蚀剖面误差对全局的影响, 可以利用不同宽度刻蚀剖面的累加误差总和以及单个宽度下刻蚀剖面的最大误差作为优化目标, 来达到综合评价不同 $e_i(x)$ 的目的. 基于此, 定义(4)式作为新的优化目标函数, 从而把目标数量降低到两个:

$$f(x) = \left( \sum e_i(x), \max(e_i(x)) \right). \quad (4)$$

### 2.4 基于分解的并行多目标进化算法

基于分解的多目标进化算法<sup>[16]</sup> (MOEA/D) 已经被应用于离子刻蚀产额优化模型. 本文同样选取MOEA/D作为优化算法. 然而原始的MOEA/D算法运行时间较长, 因此利用并行方法来加速该算法是减少运行时间的一种有效途径.

目前利用并行方法加速MOEA/D<sup>[17]</sup>主要有两种方式: 主从式和粗粒度式. 主从式并行算法通过在多个处理单元中并行计算目标函数的值来达到并行的目的. 粗粒度式并行算法把整个种群分成多个子种群, 然后子种群独自演化, 在演化到一定程度后彼此互换最优信息. 在本工作中, 由于每计

算一次目标函数值都会消耗不少计算资源, 整个算法运行过程中计算资源消耗最大的就是计算目标函数, 因此利用主从式 MOEA/D 并行算法即可达到加速目的.

主从式 MOEA/D 并行算法执行流程如图 8 所示. 为减少并行过程的数据传送, 在并行算法执行之前, 先将与刻蚀相关的实验数据传送到相应的计算节点, 这样使得在每次计算适应度值时只需传输相应的参数数据即可.

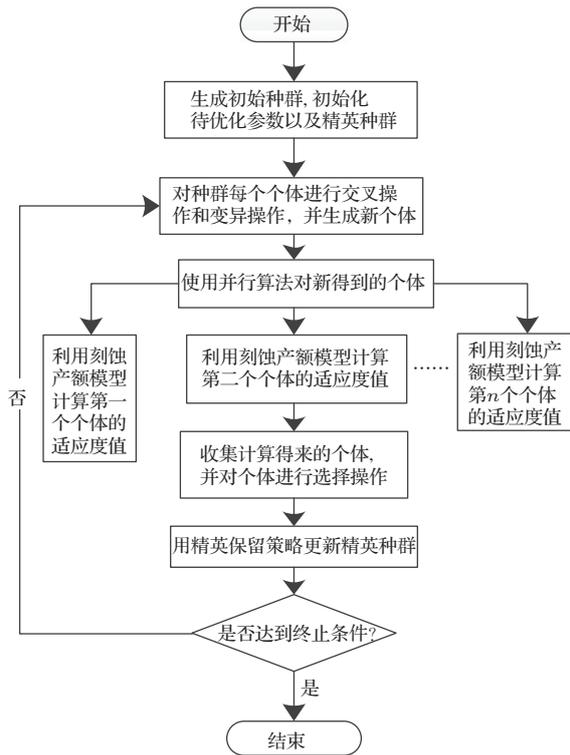


图 8 主从式 MOEA/D 并行算法执行流程图

### 3 结果与讨论

#### 3.1 利用总流量信息求取刻蚀表面选定点流量信息

文献 [11] 中已经有详细方法利用总流量信息求取刻蚀表面选定点的流量信息. 但是利用该方法求取刻蚀速率时, 会出现以下问题: 如果在刻蚀过程沟槽底部两端有尖角, 底部两端尖角处实际刻蚀速率会大于底部中间实际刻蚀速率, 而模拟刻蚀速率却始终无法超过底部中间模拟刻蚀速率. 主要原因是没有考虑掩膜侧壁的倾斜角. 在实际情况中, 等离子体会通过掩膜侧壁反射到沟槽底部两端, 因此到达底部两端的实际离子数会多于底部中间.

在计算选定点流量信息时, 我们依然通过计算选定点邻域流量信息来逼近选定点流量信息. 此时, 相应的选定点邻域离子入射流量包括直接入射到选定点邻域的和经过反射后入射到选定点邻域的和. 如图 9 所示.

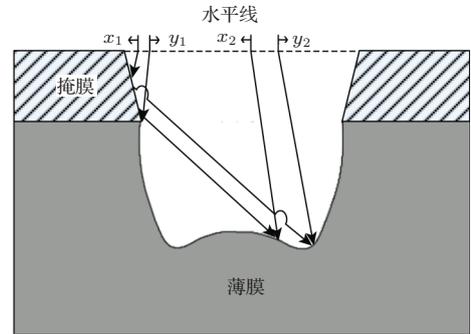


图 9 衬底离子流量入射情况

此时, 对于以特定入射角度  $\theta$  入射到选定点区域的离子, 需要分三种情况考虑:

- 1) 所有离子都是直接入射到选定点区域, 此时根据文献 [11] 方法处理;
- 2) 所有离子都是通过掩膜反射后入射到离子表面, 此时需要考虑掩膜斜角  $\alpha$  的影响, 对应离子的原来入射角度应该为  $\theta - 2\alpha$ , 并且根据反射作用确定离子在水平线上的区域;
- 3) 一部分离子直接入射到选定点区域, 另一部分通过反射后入射到选定点区域, 此时应当确定哪部分离子是直接入射到选定点区域, 并对两个区域的离子分别按照情况 1) 和 2) 来计算流量信息.

我们首先与文献 [11] 中的数据进行对比. 图 10 是利用 CFD-ACE 得到的实际刻蚀速率图. 图 11 是改进前的方法求取的刻蚀速率分布与改进后求取的刻蚀速率分布对比图.

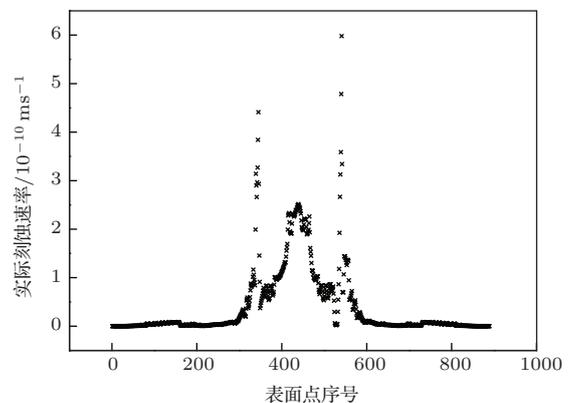


图 10 CFD-ACE 得到的实际刻蚀速率

与改进前方法相比,改进后的方法在底部两端刻蚀速率均大于底部中间的刻蚀速率,在整个图形曲线两端上也没有出现类似改进前方法两端的峰值,同时最大值也更接近于实际刻蚀速率.因此,改进后的方法要优于改进前的方法.

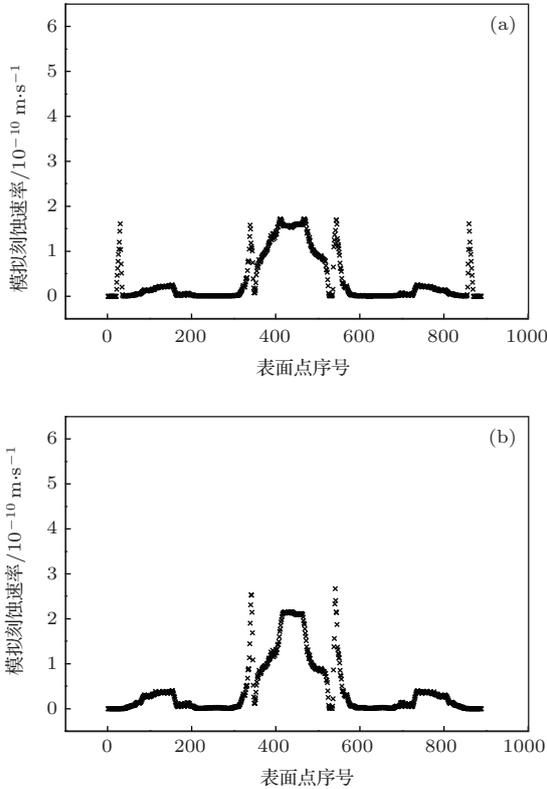


图 11 改进前的方法 (a) 和改进后的方法 (b) 模拟刻蚀速率对比

### 3.2 并行前后算法运行时间对比

我们首先测试目标函数的计算在串行算法运行过程中所占用的时间比例.表 1 是计算目标函数次数不同时所占用的时间情况.

由表 1 可知,算法最重要的时间损耗在计算目标函数上,因此可以利用主从式并行方法来加速目标函数的计算.下面在相同的运行环境下,分别用 1, 2, 4, 6 核来测试本文并行算法的性能.

我们设定目标函数的最大评价次数为 1000.分别用 1, 2, 4, 6 核运行之后,得到的实验结果如表 2 所示.

由表 2 可知,随着核数的增大,算法运行的相应时间也相应地减少,但算法运行的时间并不与核数成反比.后期随着核数的增大,通信所用时间也大大增大,运行时间会逐渐减少到某个最小值后变大.

### 3.3 优化后离子刻蚀产额曲线

首先,为求取实际刻蚀速率,我们使用一台 Oxford100 型刻蚀机进行离子增强刻蚀实验,最终得到刻蚀宽度分别为 1.0, 1.5  $\mu\text{m}$  的沟槽在 1, 2, 3, 4.5 min 时的刻蚀剖面图.利用上述方法,可以求取相应的刻蚀表面选定点的实际刻蚀速率.然而,刻蚀表面细节形貌复杂,求取的实际刻蚀速率会带有噪声.此时我们需要去除与周围刻蚀速率偏差很大的点.图 12 是宽度为 1  $\mu\text{m}$  时刻蚀表面选定点在 3 min 时的实际刻蚀速率分布.选定点主要集中在沟槽的底部.

表 1 计算目标函数次数不同时,算法运行过程和目标函数计算占用时间

目标函数 计算次数	整个算法运行 时间/ms	目标函数计算 时间/ms
200	60253	60227
400	120166	120119
600	179242	179168

表 2 核数不同时,算法运行过程和目标函数计算占用时间

核数	算法运行时间/ms
1	291645
2	176756
4	107322
6	88933

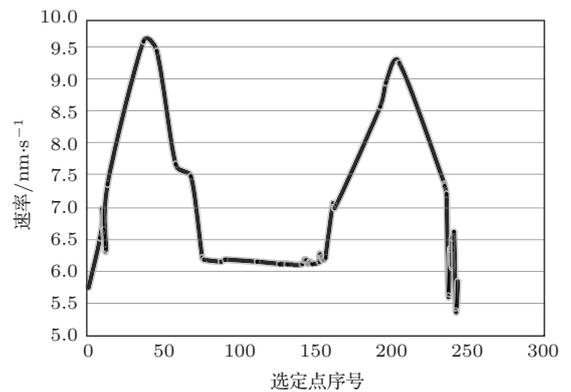


图 12 宽度为 1  $\mu\text{m}$  的沟槽在 3 min 时的速率分布

为求取模拟刻蚀速率,我们采用与文献 [11] 一样的离子刻蚀产额公式,共涉及 6 个参数,同时各个参数的变化范围也一致.然后利用主从式 MOEA/D 算法来优化离子刻蚀产额模型参数,通过对比不同参数,最终得到如表 3 所示的离子刻蚀产额模型参数.对应的归一化后离子刻蚀产额曲线

如图 13 所示.

表 3 优化后的离子刻蚀产额模型参数

$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
1.728	2.09	33.66	53.34	1.39	-89.90	56.11

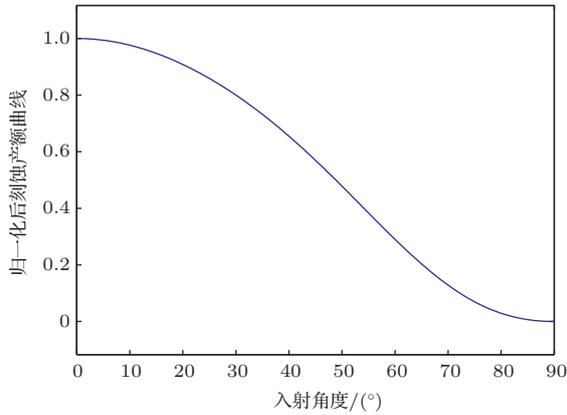


图 13 归一化后的离子刻蚀产额曲线

### 3.4 与实际刻蚀仿真结果对比

为了验证本方法的有效性, 本文把得到的离子刻蚀产额模型参数应用到采用元胞自动机的刻蚀仿真模拟方法中. 图 14 是为刻蚀时间为 2 min, 刻蚀宽度为 500 nm 和 1.0  $\mu\text{m}$  时仿真结果和实际刻蚀结果对比. 表 4 是实际沟槽宽度与优化后的宽度对比. 由图 14 可知, 利用本方法得到的沟槽底部信息更加接近实际刻蚀实验结果, 在沟槽底部均能出现比较明显的微槽, 同时沟槽的深度也很接近实际刻蚀结果, 误差在 3% 以内.

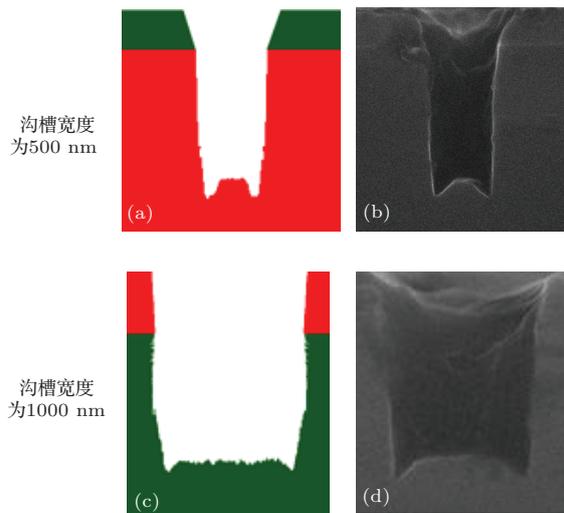


图 14 (网刊彩色) 仿真结果与实际刻蚀结果比较 (a) 仿真刻蚀结果; (b) 实际刻蚀结果; (c) 仿真刻蚀结果; (d) 实际刻蚀结果

表 4 不同宽度沟槽实验结果对比

	500 nm 的 宽度/nm	1000 nm 的 宽度/nm
实际沟槽深度	751.8	768.8
优化后仿真沟槽深度	758.6	746.1

## 4 结 论

本文为解决基于刻蚀速率匹配的离子刻蚀产额优化建模方法所面临的问题, 首先研究不同掩膜形状对刻蚀表面演化模型造成的影响, 然后重新定义了离子刻蚀产额模型的优化目标, 并利用实际刻蚀加工数据来优化离子刻蚀产额模型, 同时利用并行方法来加速整个优化过程. 与初始方法的实验结果对比, 本方法求取的刻蚀速率更接近实际刻蚀速率, 同时仿真结果也更优, 沟槽底部信息也更接近实际刻蚀结果.

## 参考文献

- [1] Kawai H 2008 *Ph. D. Dissertation* (Cambridge: Massachusetts Institute of Technology)
- [2] Saussac J, Margot J, Chaker M 2009 *J. Vac. Sci. Technol. A* **27** 130
- [3] María E L, Luis A 2014 *Chin. Phys. B* **23** 050701
- [4] Song Y R, Jiang G P, Gong Y W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 040502
- [5] Levinson J A, Shaqfeh E S G, Balooch M, Hamza A V 2000 *J. Vac. Sci. Technol. B* **18** 172
- [6] Tuda M, Nishikawa K, Ono K 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 960
- [7] Osher S, Sethian J A 1988 *J. Comput. Phys.* **79** 12
- [8] Osher S, Fedkiw R P 2001 *J. Comput. Phys.* **169** 463
- [9] Chang J P, Arnold J C, Zau G C H, Shin H S, Sawin H H 1997 *J. Vac. Sci. Technol. A* **15** 1853
- [10] Gou F, Kleyn A W, Gleeson M A 2008 *Int. Rev. Phys. Chem.* **27** 229
- [11] Gao Y F, Song Y X, Sun X M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 048201 (in Chinese) [高扬福, 宋亦旭, 孙晓民 2014 物理学报 **63** 048201]
- [12] Liu H H, Liu Y H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 026102
- [13] Liu J F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2615
- [14] Ishibuchi H, Sakane Y, Tsukamoto N, Nojima Y 2009 *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* San Antonio, USA, October 11-14, 2009 p1758
- [15] Zheng S L, Song Y X, Sun X M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 108201 (in Chinese) [郑树琳, 宋亦旭, 孙晓民 2013 物理学报 **62** 108201]
- [16] Zhang Q, Li H 2007 *IEEE T. Evolut. Comput.* **11** 712
- [17] Nebro A J, Durillo J J 2010 *Learning and Intelligent Optimization* (Venice: Springer Berlin Heidelberg) pp303-317

# An optimization method for ion etching yield modeling combined with factual etching data\*

Gao Yang-Fu Sun Xiao-Min Song Yi-Xu<sup>†</sup> Ruan Cong

(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, State Key Laboratory on Intelligent Technology and Systems, Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

( Received 19 May 2014; revised manuscript received 10 August 2014 )

## Abstract

The profile surface simulation is an important method to study the ion etching mechanism. In profile surface simulation, the result of surface evolution is primarily determined by the surface evolution model and the etching yield optimization model as well. However, the currently available surface evolution model is not accurate enough. What's more, most of the data used in etching yield optimization model are based on simulation, while no factual data are used to optimize the parameters of ion etching yield model. In order to solve these problems, the accuracy of current evolution model is improved, the optimal objects of etching yield model are redefined, and the factual etching data are introduced to optimize the etching yield model for the first time. In this paper, parallel method is also adopted to speed up the optimization process, whose optimized parameters are then applied to the etching simulation process that is based on cellular automata. The experimental results show that our proposed approach does improve the accuracy of simulation and greatly shorten the optimization process.

**Keywords:** factual etching data, etching yield model, etching velocity, multi-object evolution algorithm

**PACS:** 82.20.Wt, 81.65.Cf, 81.16.-c

**DOI:** [10.7498/aps.63.248201](https://doi.org/10.7498/aps.63.248201)

---

\* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2011ZX2403-002).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [songyixu@163.com](mailto:songyixu@163.com)